

Biofertilizantes integrales con microorganismos nativos como motor de innovación y sostenibilidad en comunidad agrícolas rurales

Comprehensive Biofertilizers with Native Microorganisms as a Driver of Innovation and Sustainability in Rural Agricultural Communities

Biofertilizantes integrados com microrganismos nativos como motor de inovação e sustentabilidade em comunidades agrícolas rurais

Yessica Lorena Perdomo Useche¹, <https://orcid.org/0000-0003-1980-2321>, yperdomo11@areandina.edu.co
Hildelina Ochoa Bermúdez¹, <https://orcid.org/0009-0005-7856-090X>, hochoa3@estudiantes.areandina.edu.co
Luis Alberto Quintero López¹, <https://orcid.org/0000-0002-3498-3469>, lquintero34@areandina.edu.co

¹ Fundación Universitaria del Areandina, Colombia.

Autor de correspondencia: yperdomo11@areandina.edu.co

Fecha de recepción: 25 de agosto de 2025

Fecha de aprobación: 29 de noviembre de 2025

Resumen. La demanda agrícola es una de las actividades económicas de mayor impacto en el suelo. **Objetivos**, Identificar el potencial de la mezcla de Biochar, Hongos Formadores de micorrizas (HFM) y Materia Orgánica del biodigestor (MOB) en el crecimiento vegetal, además de evidenciar la percepción de la comunidad agrícola, frente la migración a nuevas tecnologías agropecuarias. **Metodología**, en vivero se aplicó el diseño experimental con cuatro tratamientos, un control y tres repeticiones, inoculados con HFM nativos del Bosque seco tropical mediante cultivos trampa; se evaluó crecimiento de las plántulas de maíz, así como el análisis fisicoquímico de los suelos de cada tratamiento. La evaluación de la percepción de la comunidad se evaluó mediante encuestas estructuradas. Análisis estadístico software estadístico R studios. **Resultados**, Se evidenció diferencias significativas entre los tratamientos aplicados en plántulas, observándose una altura superior y mayor longitud de las hojas en el tratamiento que incluye Biochar, HFM y MOB, además de presentar las mejores condiciones fisicoquímicas en los análisis de suelos. En cuanto a la comunidad, se observa una actitud favorable frente la innovación agrícola siempre que se adapte a sus realidades económicas y fortalezca su autonomía productiva. **Conclusiones**, la aplicación conjunta de Biochar, MOB y HFM en suelos de bosque seco tropical mejora significativamente las propiedades edáticas y el vigor de las plántulas de maíz. La evaluación social con agricultores reveló una alta disposición a adoptar estas tecnologías agroecológicas, siempre que se les garantice capacitación técnica, demostraciones de campo y acceso económico a los insumos.

Palabras Clave. Agricultura, Comunidad rural, Sostenibilidad, Microorganismo, Transferencia de conocimiento.

Abstract. Agricultural demand is one of the economic activities with the greatest impact on soil. **Objectives**, This study aimed to identify the potential of a mixture of biochar, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), and organic matter from a biodigester (OMB) on plant growth, as well as to assess the perception of the agricultural community regarding the adoption of new agricultural technologies. **Methodology**, in a nursery, an experimental design with four treatments, including one control and three replicates, was applied. The treatments were inoculated with native AMF from the tropical dry forest obtained through trap cultures. Seedling growth of maize was evaluated alongside physicochemical soil analyses for each treatment. Community perception was assessed through structured surveys, and statistical analyses were performed using R Studio software. **Results**, Significant differences were observed among the treatments, with the mixture of biochar, AMF, and OMB producing seedlings with greater height and longer leaves, as well as better soil physicochemical conditions. Regarding the community, a favorable attitude towards agricultural innovation was noted, provided it adapts to their economic realities and strengthens their productive autonomy. **Conclusions**, the combined application of biochar, OMB, and AMF in tropical dry forest soils significantly improves soil properties and maize seedling vigor. The social evaluation revealed a high willingness among farmers to adopt these agroecological technologies, contingent upon access to technical training, field demonstrations, and affordable inputs.

Keywords. Agriculture, rural community, sustainability, microorganism, knowledge transfer.

Resumo. A demanda agrícola é uma das atividades econômicas com maior impacto no solo. **Objetivos**, identificar o potencial da mistura de biochar, fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e matéria orgânica proveniente de biodigestor (MOB) no crescimento das plantas, assim como avaliar a percepção da comunidade agrícola em relação à adoção de novas tecnologias agrícolas. **Metodologia**, em um viveiro, foi aplicado um delineamento experimental com quatro tratamentos, incluindo um controle e três replicações. Os tratamentos foram inoculados com FMA nativos da floresta seca tropical, obtidos por meio de culturas armadilha. Foi avaliado o crescimento das mudas de milho, juntamente com análises físico-químicas do solo em cada tratamento. A percepção da comunidade foi avaliada por meio de questionários estruturados, e as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R Studio. **Resultados**, foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, sendo que a mistura de biochar, FMA e MOB produziu mudas com maior altura e folhas mais longas, além de melhores condições físico-químicas do solo. Em relação à comunidade, observou-se uma atitude favorável à inovação agrícola, desde que esta se adapte às suas realidades econômicas e fortaleça sua autonomia produtiva. **Conclusões**, a aplicação combinada de biochar, MOB e FMA em solos de floresta seca tropical melhora significativamente as propriedades do solo e o vigor das mudas de milho. A avaliação social revelou alta disposição dos agricultores em adotar essas tecnologias agroecológicas, contanto que tenham acesso a capacitação técnica, demonstrações em campo e insumos a preços acessíveis.

Palavras chave. Agricultura, comunidade rural, sustentabilidade, microrganismo, transferência de conhecimento.

1. Introducción

El aumento de la demanda alimentaria a causa del crecimiento demográfico ha generado una presión en los sistemas agrícolas y pecuarios, causando un deterioro en la calidad del suelo (Agropinos, 2021;

Alloherverdi et al., 2021). En Colombia, es necesario el desarrollo de alternativas innovadoras que aporten al desarrollo agrícola, ya que la producción agrícola nacional representa la actividad económica de más de 390.000 familias, siendo alrededor del 60% pequeños productores (Betancourt et al., 2024).

En el departamento del Cesar, se ubican los reductos de Bosque seco tropical más grandes del país, sin embargo, estos se encuentran amenazados debido a la expansión agrícola y a la perdida de fertilidad de los suelos, por lo cual es necesario el desarrollo de estrategias que promuevan la biodiversidad microbólica y edáfica del suelo, así como también empoderar a las comunidades agrícolas en la apropiación de su territorio y en la aplicación de soluciones basadas en la naturaleza. La transferencia de conocimiento desde la academia a las comunidades agrícolas es un proceso vital para la innovación y desarrollo agrícola.

El uso de Hongos Formadores de Micorrizas (HFM), el Biochar y la Materia Orgánica del Biodigestor (MOB), ha sido ampliamente documentado como enmienda de suelos degradados ya sea por el impacto agrícola o minero; sin embargo, en la mayoría de los casos se ha evidenciado de forma independiente, como es en el caso de Razzaghi y colaboradores, (2020), en donde el biochar o carbón vegetal aumentó la retención hídrica, es decir, que es catalogado como un agente estabilizador que controla la lixiviación de nutrientes.

En cuanto a la inoculación de HFM, se observó una retención significativa de agua y nutrientes a través de las raíces de las plántulas inoculadas, así como mayor crecimiento a pesar del estrés hídrico (Birhane et al., 2023). Por otra parte, la materia orgánica de biodigestores (MOB), se destaca por su alto contenido de nutrientes, lo cual es un aporte importante para la fertilidad del suelo. Adicionalmente, se ha reportado que la inoculación simultánea de HFM con biochar aportó significativamente al crecimiento vegetal (Hammer et al. 2015), al igual que la aplicación de HFM y MOB, el cual incrementó la absorción de fósforo y tolerancia al estrés hídrico (Birhane et al., 2023). La integración de estos tres componentes, especialmente HFM nativos y no comerciales, se observa como una solución basada en la naturaleza con alta proyección para aportar en la mejora de la

calidad del suelo en regiones áridas o semiáridas, además de ser una alternativa de bajo costo, que puede desarrollarse a través de transferencia de conocimiento en las comunidades campesinas. Por lo que la presente investigación tuvo por objetivo identificar el potencial de la mezcla de Biochar, Hongos Formadores de micorrizas (HFM) y Materia Orgánica del biodigestor (MOB) en el crecimiento vegetal, además de evidenciar la percepción de la comunidad agrícola, frente la migración a nuevas tecnologías agropecuarias, lo cual se desarrollará en vivero y mediante encuestas y entrevistas estructuradas que permitirán analizar la disposición de la comunidad para la transferencia de conocimiento en metodologías de bajo costo.

2. Metodología

Diseño del estudio

La investigación se desarrolla bajo un diseño experimental con tratamientos controlados, y enfoques mixtos que permiten identificar la disposición de la comunidad frente a la adopción de tecnologías agropecuarias sostenibles.

Selección de participantes o muestras

La comunidad de la Junta de acción comunal de la mesa azúcar buena del corregimiento la mesa, Valledupar fue convocada en su totalidad, sin embargo, participaron en la encuesta quienes actualmente tienen la actividad agrícola como principal actividad económica y estuvieran desarrollando procesos agrícolas en los últimos 5 años.

Variables y mediciones

Con el fin de evaluar la respuesta a los tratamientos se consideraron las propiedades fisicoquímicas, incluyendo, pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), contenido de materia orgánica, conductividad eléctrica, contenido de nutrientes esenciales (nitrógeno, fósforo, potasio) y carbono orgánico; en cuanto a las variables evaluadas en las plántulas, se incluyó altura de la planta, número de hojas y longitud de las hojas.

Procedimiento

La investigación se desarrolló en el marco de tres fases, siendo la Fase 1, un diagnóstico de la comunidad en donde fue aplicado el instrumento (encuestas), seguido de la toma del suelo en un área conservada del bosque seco tropical, la cual fue caracterizada y utilizada como insumo para multiplicar los hongos formadores de micorrizas nativos mediante cultivos trampa. El producto final de los cultivos trampa, fue el componente principal de los tratamientos del diseño experimental, siendo el suelo control el inoculado con HFM nativos sin biochar, ni MOB utilizando 1200 gramos, seguido del Tratamiento A que incorpora 5% de Biochar en el suelo inoculado (1140 gramos), el Tratamiento B CON 5% de MOB en suelo inoculado con 1140 gramos, Tratamiento C con 5% de Biochar y 5% de MOB en suelo inoculado usando 1080 gramos de suelo. Tratamiento D 1200 gramos de suelo sin inocular de Bosque seco tropical.

Recopilación de datos

Los datos fueron recopilados a partir de encuestas estructuradas directas y pruebas de laboratorio de suelos.

Instrumentos

Se construyó una encuesta socioeconómica que consideraba las características del encuestado, percepción de la pobreza, características del hogar, acción colectiva y percepción ambiental del cambio. Adicionalmente, se utilizó la técnica NTC 5167 – Volumetría para la evaluación de Capacidad de intercambio catiónico (meq/100g), Carbono Orgánico Total (%), Cenizas (%), Conductividad Eléctrica (dS/m) y pH, la técnica LBC 43 – Gravimetría para la valoración Densidad Aparente (g/cm^3) y la técnica LBC 289 – Gravimetría Densidad Real (g/cm^3).

Análisis de datos

Para el estudio de los datos obtenidos, se examinó la composición y textura del suelo, la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de carbono y materia orgánica, así como los niveles de fósforo,

nitrógeno total y el pH del suelo. Adicionalmente, se realizó una prueba de comparaciones que incluyó un análisis de varianza (ANOVA) y pruebas múltiples de comparación utilizando el método LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con el fin de identificar tratamientos específicos que mostraran efectos distintos en el crecimiento de las plantas, evaluando características como la altura, el número de hojas y la longitud foliar. También se efectuó un análisis descriptivo de los datos obtenidos mediante encuestas y entrevistas

Consideraciones éticas

La encuesta estructurada así como el consentimiento informado fueron previamente enviado al comité de ética de la Fundación Universitaria del Areandina, para su respectiva aprobación. Una vez aprobado, se programó la visita a la comunidad donde aplicaron la encuesta y firmaron el consentimiento y la encuesta, teniendo en cuenta que sus datos eran estrictamente académicos.

Limitaciones

Discute las limitaciones del estudio, como posibles sesgos, problemas metodológicos o cualquier factor que pueda haber afectado los resultados.

Reproducibilidad

La investigación entrega los detalles necesarios para que otro investigador pueda replicar la investigación y obtener resultados similares.

3. Resultados

Caracterización socioeconómica

El análisis de la encuesta aplicada a comunidades rurales del municipio de Valledupar permitió conocer la percepción general frente a la implementación de nuevas tecnologías agrícolas, específicamente el uso de la mezcla biochar- HFM como estrategia sostenible para la fertilización de cultivos.

En cuanto a la percepción ambiental, se identificó una comunidad consciente de la importancia de

Figura 1.

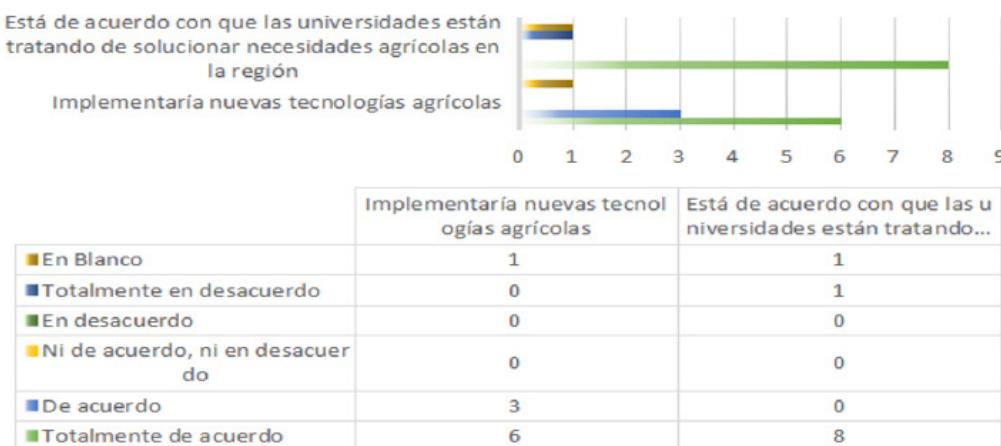
Posición de la comunidad frente al uso de fertilizantes.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.

Respuestas de la comunidad frente a la participación de las universidades en soluciones agrícolas.



Fuente: Elaboración propia.

conservar los recursos naturales y reacia a prácticas extractivas sin control, lo que favorece la receptividad hacia tecnologías sostenibles.

Efecto de la mezcla hongos formadores de Micorrizas, Biochar y materia orgánica como promotores de crecimiento vegetal.

La caracterización fisicoquímica evidenció cambios en las propiedades físicas de los tratamientos,

encontrándose diferencias en las variables de textura, capacidad de intercambio catiónico (CIC), contenido de carbono orgánico, materia orgánica, niveles de fósforo y nitrógeno total, así como el pH del suelo, las cuales son claves para identificar prácticas efectivas para el aporte en la fertilidad y funcionalidad del suelo (Tabla 1).

Tabla 3. Análisis granulométrico del material seleccionado**Ánálisis granulométrico del material seleccionado**

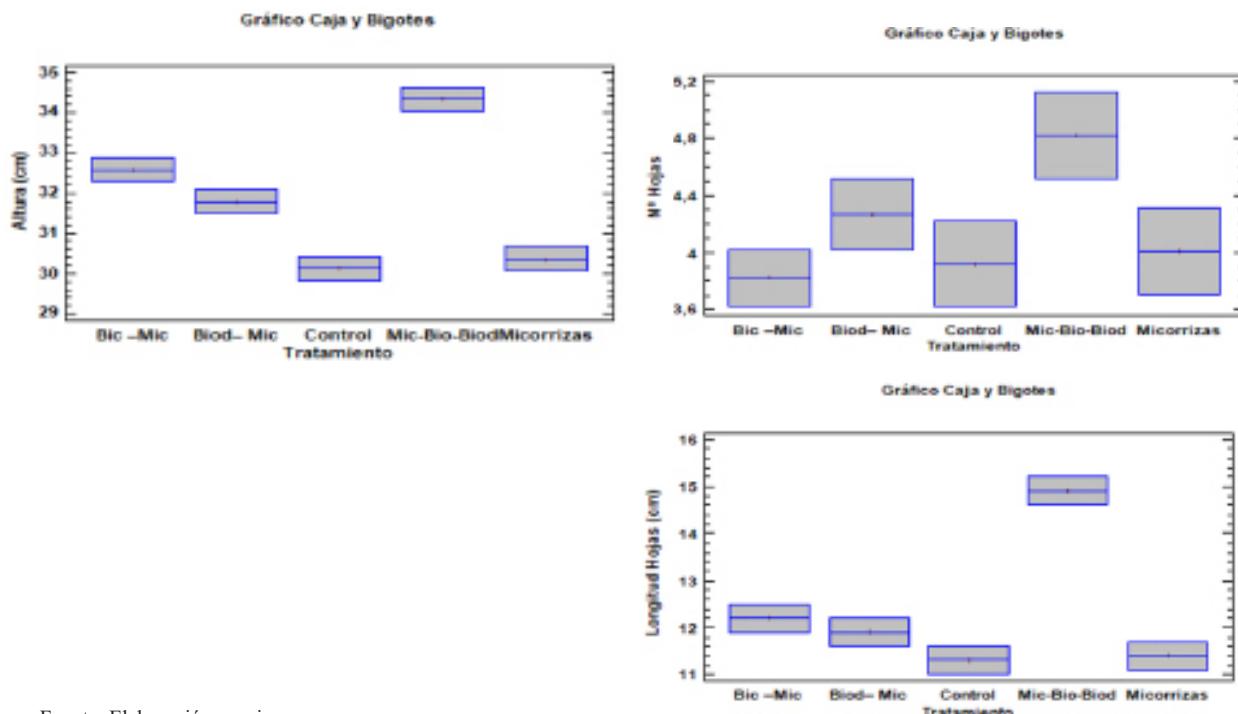
Número de tratamiento	Arcilla %	Arena %	Capacidad de Intercambio Catiónico Cmol(+)/Kg	Carbono Orgánico Total g/Kg	Clase Textural del Suelo	Conductividad Eléctrica dS/m	Contenido de materia orgánica g/Kg	Fosforo Total mg/Kg	Limo %	Nitrógeno Total mg/Kg	pH	Potasio EPA 3051A, EPA 6010D mg/Kg
Tratamiento 1	3,82	86,2	10,6	28,6	Arenoso	0,11	49,4	436	9,93	544	7,6	2597,4
Tratamiento 2	6,12	81,2	30,4	22,7	Franco-Arenoso	0,08	39,1	425	12,6	1845	6,8	2512,1
Tratamiento 3	3,99	87,6	10,2	18,7	Arenoso	0,08	32,3	382	8,39	1639	7,1	2235,9
Tratamiento 4	2,02	88,6	9,29	27,6	Arenoso	0,08	47,6	405	9,38	1637	8	2337,5
Tratamiento 5	2,01	86,7	13	18,2	Arenoso	0,1	31,3	354	11,3	1626	7,1	2097,8

Fuente. Elaboración propia.

Las características morfológicas de las plántulas de cada tratamiento, en relación con las tres variables evaluadas altura de la plana, longitud y número de hojas se identifican en el análisis estadístico como Biochar = Bic, HFM = Mic y MOB = Biod (Figura 2.)

En el análisis de componentes principales se puede observar la influencia de los tratamientos sobre las variables tanto físico químicas como biológicas, lo cual es clave para la proyección del diseño experimental en campo.

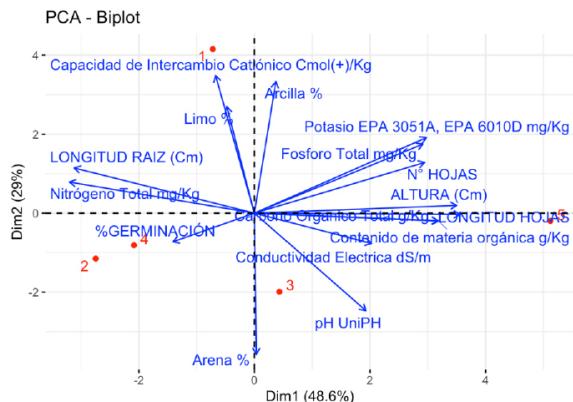
Figura 3.
Análisis estadístico variables evaluadas en plántulas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.

Ánalisis de componentes principales de los tratamientos del diseño experimental. Propiedades biológicas en las plántulas y físico químicas del suelo.



Fuente: Elaboración propia.

4. Discusión

Caracterización socioeconómica

A través del instrumento aplicado a las comunidades rurales, se pudo conocer un piloto de la percepción que tienen los habitantes del corregimiento la mesa frente a la adopción de nuevas tecnologías, específicamente del uso de la mezclar biochar, HFM y MOB como biofertilizante. La comunidad agrícola presenta demuestra conciencia sobre necesidad de proteger los servicios ecosistémicos, así como el rechazo a prácticas extractivas indiscriminadas, lo cual evidencia que los participantes muestran alta disposición al cambio, siempre que las nuevas prácticas estén respaldadas por beneficios comprobables, capacitación técnica y accesibilidad económica.

Efecto de la mezcla Hongos Formadores de Micorrizas, Biochar y Materia Organica como promotores de crecimiento vegetal.

El tratamiento con hongos formadores de micorrizas (HFM) aplicado de forma aislada demostró una capacidad moderada para mejorar el intercambio catiónico y el contenido de nitrógeno, lo cual puede atribuirse a la simbiosis establecida entre las raíces y los hongos micorrízicos, que favorece la absorción de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. Sin

embargo, sus efectos sobre el carbono y la materia orgánicos fueron limitados, lo que sugiere que, si bien mejora la actividad biológica, no contribuye de manera significativa a la acumulación de materia orgánica estable en el suelo.

La comparación con el suelo sin tratamiento (BST), que mantuvo una baja calidad edáfica, resalta la eficacia de las combinaciones aplicadas para restaurar las propiedades del suelo, tanto en términos químicos como estructurales. En conjunto, los tratamientos evaluados no solo mejoran la fertilidad inmediata del suelo, sino que también aportan elementos clave para su sostenibilidad a largo plazo (Figura 4).

Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación de bioinsumos como biochar, HFM y MOB, de forma individual o combinada, tiene un impacto positivo y diferenciador sobre las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo en el ecosistema del bosque seco tropical. Si bien el uso exclusivo de HFM mostró beneficios en la actividad biológica y la fijación de nitrógeno, los tratamientos que incluyeron biochar y MOB evidenciaron mejoras más integrales. En particular, el tratamiento combinado (Biochar + HFM + MOB) sobresalió por generar un efecto sinérgico que mejoró significativamente la materia orgánica, el carbono orgánico, el fósforo total y la estabilidad del pH. Estos hallazgos confirmaron que la integración estratégica de bioinsumos es una alternativa eficaz para restaurar suelos degradados y fortalecer la sostenibilidad productiva en regiones afectadas por la baja fertilidad edáfica.

5. Conclusiones

La comunidad rural encuestada muestra una actitud favorable hacia la innovación agrícola, siempre que esta se adapte a sus realidades económicas, fortalezca su autonomía productiva y se promueva a través de procesos formativos participativos que reconozcan sus saberes, necesidades y capacidades.

Los resultados de este estudio confirman que la aplicación conjunta de biochar, MOB y HFM en suelos

de bosque seco tropical mejora significativamente las propiedades edáficas y el vigor de las plántulas de maíz. El tratamiento combinado elevó el carbono orgánico total a 28,6 g kg⁻¹, la materia orgánica a 49,4 g kg⁻¹, el fósforo total a 436 mg kg⁻¹ y la CIC a 30,4 cmol (+) kg⁻¹, estabilizando el pH en 8,0.

En cuanto al desarrollo vegetal, las plántulas alcanzaron mayor altura (34,34 cm), mayor número de hojas (4,82) y mayor longitud foliar (14,9 cm), evidenciando un efecto sinérgico en la nutrición y estructura del suelo.

6. Recomendaciones

Se sugiere ampliar los estudios participativos con comunidades rurales, incorporando metodologías de investigación-acción que fortalezcan la apropiación local del conocimiento y promuevan procesos de transición agroecológica ajustados al contexto territorial.

Referencias Bibliográficas

Alloherverdi, T., Mohanty, A., Roy, P. and Misra, M. (2021). A Review on Current Status of Biochar Uses in Agriculture. *Molecules*, 26, 5584. <https://doi.org/10.3390/molecules26185584>

Betancourt, J. A., Florez Yépes, G. Y., & Garcés Gómez, Y. A. (2024). Agricultural Productivity and Multidimensional Poverty Reduction in Colombia: An Analysis of Coffee, Plantain, and Corn Crops. *Earth*, 5(4), 623–639. <https://doi.org/10.3390/earth5040032>

Birhane, E., Bongers, F., Damtew, A., Tesfay, A., Norgrove, L. & Kuyper, T. W. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi improve nutrient status of Commiphora myrrha seedlings under drought. *Journal of Arid Environments*, 209, 104877. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104877>

Brychkova, G., McGrath, A., Larkin, T., Goff, J., McKeown, P. C., & Spillane, C. (2024). Use of anaerobic digestate to substitute inorganic fertilisers for more sustainable nitrogen cycling. *Journal of Cleaner Production*, 446, 141016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141016>

Castro Rebollo, M.I.; Mestre Carrillo, G.I.; Núñez Avellaneda, L.A. (2018). Cambio climático y fertilización: efectos en la biota de un arroyo andino. En: Correa, A. (ed.), Agrociencias y cambio climático. 1^aed. Universidad de La Salle, Bogotá. p. 7Soil Ecol. 88: 41–49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.11.016>.

CIMMYT & CIAT. (2019). Maíz para Colombia: Visión 2030. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). <https://www.cimmyt.org> Recuperado el 19 de julio de 2019 de, <https://fenalce.co/wp-content/uploads/2021/10/Maiz-para-Colombia.pdf>.

Comisión Económica para América Latina y El Caribe Cepal, CEPAL. (2018). Segundo informe anual sobre el progreso y los desafíos regionales de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe. Santiago: Naciones Unidas, 184p.

Guzmán, H., Perdomo, Y., Mosquera, H., Pérez, U., & Varón, M. (2022). Characterization of vegetation and the arbuscular mycorrhizal fungi community in soils impacted by gold mining in Colombia. *Ciencia y tecnología agropecuaria*, 23(3). https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num3_art:2394

Hammer, E., Forstreuter, M., Rillig, M. C. & Kohler, J. (2015). Biochar increases arbuscular mycorrhizal plant growth enhancement and ameliorates salinity stress. *Applied Soil Ecology*, 96, 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.07.014>

Han, G., & Niles, M. T. (2023). An adoption spectrum for sustainable agriculture practices: A new framework applied to cover crop adoption. *Agricultural Systems*, 212, 103771. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103771>

Hernández Jiménez, A.; Vera Macías, L.; Naveda Basurto, C.A.; Guzmán Cedeño, A.M.; Vivar Arrieta, M.R.; Zambrano, Teódulo, M.G.; Freddy Ormanza, K.; León Aguilar, R.V.; López Alava, G.A. (2017). Variaciones en algunas propiedades del suelo por el cambio de uso de

la tierra, en las partes media y baja de la microcuenca Membrillo, Manabí, Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 38(1):50-56.

I. A., A. E. S. (2021). Effect of biochar rates on A-mycorrhizal fungi performance and maize plant growth, Phosphorus uptake, and soil P availability under calcareous soil conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(8), 815–831. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1869766>

Li, Q., & Imran. (2025). Using biochar, compost, and dry-based organic amendments in combination with mycorrhizae for mitigating heavy metal contamination in soil. *International Journal of Phytoremediation*, 1–12. <https://doi.org/10.1080/15226514.2025.2502458>

Mohammad, M. J., & Al-Smadi, B. (2022). Influence of mycorrhizal fungi and biochar on nitrogen use efficiency correlated with yield and yield components of wheat. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 18(4), 1–15. <https://doi.org/10.14719/pst.1486>

Organización de Naciones Unidas - ONU (2015). Objetivos de desarrollo sostenible. Obtenido de Objetivos de desarrollo sostenible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

Pavithra, D. y N. Yapa (2018). La inoculación de hongos micorrízicos arbusculares mejora la tolerancia de las plantas al estrés hídrico. *Groundwater Sust. Develop.* 7: 490-494. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.03.005>

Ramazanoglu, E., Yanardag, I. H., Sakin, E., & et al. (2025). Efectos de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y el biocarbón en plantas de algodón: Un estudio exhaustivo. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25, 3527–3544. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02350-x>

Razzaghi, F., Obour, P. B. & Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, 361, 114055. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055>

Silva, P., Aguilar, A., Calaça, F., & Duchicela, J. (2021). Mycorrhizal science outreach: Scope of action and available resources in the face of global change. *Plants, People, Planet.*, 1-17

Wang, Mengmeng; Wu, Yuncheng; Zhao, Jiaying; Liu, Yu; Chen, Zhe; Tang, Zhaoyang; Tian, Wei; Xi, Yunguang; Zhang, Jibing. (2022). La fertilización a largo plazo reduce la actividad de la fosfatasa alcalina al afectar la comunidad bacteriana que alberga phoD en el sistema de rotación arroz-trigo de invierno. *Science of the Total Environment*, v. 821, 2022, p. 153406. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153406>

Wang, F. (2017). Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in mining-impacted sites and their contribution to ecological restoration: Mechanisms and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(20), 1901–1957. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1400853>

Wen, Z., Chen, Y., Liu, Z. & Meng, J. (2022). Biochar and arbuscular mycorrhizal fungi stimulate rice root growth strategy and soil nutrient availability. *European Journal of Soil Biology*, 113, 103448. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2022.103448>

Yadav, Vineet; Jain, Shilpi; Mishra, Pooja; Khare, Puja; Shukla, Ashutosh K.; Karak, Tanmay; Singh, Anil K. (2019). Mejora de la mineralización de nutrientes y la actividad microbiana en suelos franco-arenosos mediante biocarbón envejecido en campo a corto plazo. *Applied Soil Ecology*, v. 138, 2019, págs. 144-155. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.01.012>