



Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales

Editores

Nubia Carolina Higuera Mora

Raúl Hernando Posada Almanza



Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales



Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales

Editores

Nubia Carolina Higuera Mora
Raúl Hernando Posada Almanza



Programa “Productos y procesos tecnológicos con microorganismos rizosféricos para la restauración de suelos degradados en ecosistemas agroforestales y agrícolas”, Esta publicación es resultado de Contrato 450 de 2021, Ministerio de Ciencias, Fondo Francisco José de Caldas. El programa fue desarrollado en una alianza con: Universidad del Tolima - UT, Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO, Corporación para Investigaciones Biológicas - CIB y la empresa Zenkinoko S.A.S.

Presidente del Consejo de Fundadores

P. Diego Jaramillo Cuartas, cjm

Rector General Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO

P. Harold Castilla Devoz, cjm

Vicerrectora General Académica

Stéphanie Lavaux

Director de investigación - PCIS

Tomás Durán Becerra

Subdirectora Centro Editorial - PCIS

Rocío del Pilar Montoya Chacón

Rector (E) Sede Bogotá - Cundinamarca - Boyacá

Jefferson Enrique Arias Gómez

Vicerrector Académico Sede Bogotá - Cundinamarca - Boyacá

Nelson Iván Bedoya Gallego

Decano Escuela de Ingeniería Sede Bogotá - Cundinamarca - Boyacá

John Camilo Cifuentes Taborda

Director de Investigación Sede Bogotá - Cundinamarca - Boyacá

Juan Camilo Osorio Arias

Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales / Maryeimy Varón López, Juan Carlos Bedoya Pérez, Juan Diego Medina Chavarría...[y otros 16] autores ; editores Nubia Carolina Higuera Mora y Raúl Hernando Posada Almanza. -- 1ª ed. -- Bogotá: Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO, ©2025.

190 páginas: ilustraciones, mapas, tablas.
ISBN de la obra: 978-958-763-788-5 (digital)
Incluye referencias bibliográficas en cada capítulo

1.Microbiología de suelos -- Colombia 2.Ecología agrícola -- Colombia 3.Ecología de cultivos -- Colombia 4.Proyectos de desarrollo agrícola -- Colombia 5.Biotecnología agrícola -- Colombia 6.Diversidad biológica -- Colombia i.Varón López, Maryeimy (autor) ii.Bedoya Pérez, Juan Carlos (autor) iii.Medina Chavarría, Juan Diego (autor) iv.Arbeláez Agudelo, Natalia (autor) v.Calle Henao, Cristina (autor) vi.Arbeláez Galvis, Lina María (autor) vii.De La Hoz Shaw, Camilo Andrés (autor) viii.Devia Grimaldo, Laura Daniela (autor) ix.Ospina Cespedes, Lizeth Carolina (autor) x.Pulido Villamil, Ximena Carolina (autor) xi.García Quintero, Indira (autor) xii.Sierra Roncancio, Sud Sair (autor) xiii.Cristancho Gomez, Joseph Fernando (autor) xiv.Correa Díaz, Jose Alexander (autor) xv.Martínez Restrepo, Gloria Lucía (autor) xvi.Alcántara Cortes, Johan Steven (autor) xvii.Mora Delgado, Jairo Ricardo (autor) xviii.Díaz Rojo, Gisou (autor) xix.Curcio Cruz, Valentina (autor) xx.Higuera Mora, Nubia Carolina (editor y autor) xxi.Posada Almanza, Raúl Hernando (editor y autor)

xxii.Universidad del Tolima (Institución colaboradora) xxiii.Corporación para investigaciones Biológicas (CIB) (Institución colaboradora) xxiv.Zenkinoko S.A.S. (Institución colaboradora).

CDD: 631.46 C741 BRGH

Registro Catálogo Uniminuto No. 109348

Archivo descargable en MARC a través del link: <https://tinyurl.com/bib109348>

Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales

Editores: Nubia Carolina Higuera Mora - Raúl Hernando Posada Almanza

Primera edición: 2025

Impreso en Colombia- Printed in Colombia

Autores:

Nubia Carolina Higuera Mora, Maryeimy Varón López, Juan Carlos Bedoya Pérez, Juan Diego Medina Chavarría, Natalia Arbeláez Agudelo, Cristina Calle Henao, Lina María Arbeláez Galvis, Camilo Andrés De La Hoz Shaw, Laura Daniela Devia Grimaldo, Lizeth Carolina Ospina Cespedes, Ximena Carolina Pulido Villamil, Indira García Quintero, Sud Sair Sierra Roncancio, Joseph Fernando Cristancho Gomez, Jose Alexander Correa Díaz, Gloria Lucía Martínez Restrepo, Johan Steven Alcántara Cortes, Raúl Hernando Posada Almanza, Jairo Ricardo Mora Delgado, Gisou Díaz Rojo, Valentina Curcio Cruz.

Coordinación editorial

Diana Carolina Díaz Barbosa

Corrección de estilo

Miguel Alejandro Sánchez Lozano

Diseño y diagramación

Leidy Johanna Rodríguez Vergara

ISBN (impreso): 978-958-763-787-8

ISBN (digital): 978-958-763-788-5

DOI:

<https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5>

Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO

Calle 81B # 72B-70

Bogotá D.C., Colombia

©Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO. Todos los capítulos publicados en *Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales* fueron seleccionados por el Comité Científico de acuerdo con los criterios de calidad editorial establecidos por Institución. El libro está protegido por el Registro de propiedad intelectual. Los conceptos expresados en los capítulos competen a los autores, son su responsabilidad y no comprometen la opinión de UNIMINUTO. Se autoriza su reproducción total o parcial en cualquier medio, incluido electrónico, con la condición de ser citada clara y completamente la fuente, siempre y cuando las copias no sean usadas para fines comerciales, tal como se precisa en la Licencia Creative Commons Atribución – No comercial – CompartirIgual que acoge UNIMINUTO.

Tabla de Contenido

Agradecimientos	11
Prólogo	13
Autores.....	17
Resumen general	21
Introducción	23
Contexto de la agricultura industrializada y sus efectos en el medio ambiente	24
Importancia de la conservación de la diversidad y comunidades en los sistemas agrícolas y agroforestales	27
Funciones asociadas a la diversidad y comunidades en los sistemas agrícolas y agroforestales	29
Prácticas de manejo apropiadas o ambientalmente amigables	35
Agroecosistemas y agricultura sustentable	38
Sinopsis del libro	40
Referencias	44
CAPÍTULO 1. Biodiversidad de microorganismos edáficos asociada a diferentes tipologías de sistemas agroforestales de cacao en Pauna - Boyacá	55
Resumen	55
Introducción	57
Metodología	60
Resultados y discusión	65
Conclusiones	79
Referencias	80
CAPÍTULO 2. Relación entre la diversidad de micorrizas y nivel de deterioro del cultivo de cebolla	87
Resumen	87
Introducción	89

Métodos	91
Resultados y discusión	93
Conclusiones	100
Recomendaciones	101
Referencias	101

CAPÍTULO 3.

Alternativas biotecnológicas para el manejo integrado del cultivo de aguacate	107
Resumen	107
Introducción	109
Metodología	111
Resultados y discusión	120
Conclusiones	130
Referencias	130

CAPÍTULO 4.

<i>Gmelina arborea</i> como modelo experimental en laboratorio, vivero y campo	135
Resumen	136
Introducción	137
Metodología	140
Resultados y discusión	146
Conclusiones	159
Referencias	159

CAPÍTULO 5.

Microorganismos en los sistemas de producción agrícola y agroforestales. Una apuesta hacia la sostenibilidad	167
Introducción	168
Consideraciones finales	179
Referencias	181
Índice de tablas	187
Índice de figuras	189

Agradecimientos

Los autores de este libro expresamos nuestro más sincero agradecimiento al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación por la financiación de las investigaciones aquí presentadas y por el respaldo que hizo posible esta publicación. Extendemos nuestro reconocimiento al programa “Productos y procesos tecnológicos con microorganismos rizosféricos para la restauración de suelos degradados en ecosistemas agroforestales y agrícolas”, así como a las instituciones aliadas: la Corporación Universitaria Minuto de Dios (UNIMINUTO), la Universidad del Tolima, la Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB) y la empresa Zenkinoko S.A.S., cuyos investigadores hicieron posible el desarrollo conjunto de estas investigaciones, propiciando un valioso intercambio de saberes y la construcción colectiva de nuevo conocimiento.

Agradecemos de manera especial la participación comprometida de los estudiantes vinculados a los diferentes proyectos, quienes contribuyeron activamente al trabajo investigativo. Finalmente, queremos reconocer con gratitud el acompañamiento generoso de las comunidades campesinas, fundamentales en cada una de las etapas del proceso.

Prólogo

La industrialización de la agricultura ha permitido incrementar la producción de alimentos a escala global, no obstante, el uso indiscriminado de agroquímicos ha tenido profundos efectos negativos sobre el medio ambiente y los ecosistemas naturales. Entre estos efectos destacan la pérdida de diversidad biológica, la degradación de los suelos y la alteración de los ciclos de nutrientes esenciales. En particular, los países en desarrollo, como Colombia, enfrentan retos complejos y apremiantes: sistemas agrícolas altamente fragmentados, la presión por ampliar la frontera agrícola en detrimento de ecosistemas estratégicos y la vulnerabilidad ante el cambio climático. Esto sumado a la creciente dependencia de fertilizantes para garantizar la seguridad alimentaria de una población en crecimiento.

La limitada capacidad tecnológica y de infraestructura para implementar prácticas sostenibles a gran escala, así como la concentración de esfuerzos productivos en monocultivos, representan, además de desafíos, una oportunidad invaluable para replantear los sistemas agrícolas actuales. La necesidad de diversificar la producción, restaurar la diversidad agrícola y fortalecer la soberanía alimentaria abre un espacio estratégico para el diseño de nuevas políticas, tecnologías y prácticas agroecológicas. De igual forma, la ampliación del acceso equitativo a innovaciones biotecnológicas y a recursos para la investigación constituye una vía esencial para catalizar la transición hacia modelos agrícolas más resilientes, biodiversos y sostenibles, capaces de enfrentar los retos ecológicos, sociales y económicos del siglo XXI.

Frente a este escenario, se vuelve urgente replantear nuestros sistemas agrícolas y agroforestales, reconociendo el papel fundamental que desempeña la biodiversidad -visible e invisible- en la resiliencia, productividad y sostenibilidad de los agroecosistemas. Es imperativo construir estrategias que integren el conocimiento científico contemporáneo con las prácticas tradicionales, fomentando sistemas productivos que garanticen la productividad y la sostenibilidad ambiental, además de la funcionalidad ecológica de los paisajes agrícolas.

En este contexto, el estudio de las comunidades biológicas, especialmente las microbianas, cobra un protagonismo esencial, debido a que los microorganismos dominan los ciclos de nutrientes, participan en interacciones ecológicas clave como el mutualismo, el comensalismo y la patogénesis, y determinan procesos que afectan la adaptación, productividad y salud de plantas y animales. En los sistemas agrícolas y agroforestales, las comunidades microbianas (microbiomas) son actores centrales en la dinámica de los suelos, la promoción del crecimiento vegetal, la supresión de enfermedades y el mejoramiento de la calidad de los cultivos. Un ejemplo claro es la rizósfera, un estrecho entorno que rodea las raíces de las plantas, donde ocurre una intensa selección y reclutamiento de comunidades microbianas específicas. Estos microorganismos no solo mejoran la disponibilidad de nutrientes como el nitrógeno, el fósforo o el hierro, sino que también pueden inducir resistencia sistémica en las plantas, contribuyendo al control natural de enfermedades.

Este libro, *Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales*, nace de esa necesidad y es el resultado de un esfuerzo colaborativo entre instituciones académicas, centros de investigación y empresas comprometidas con la sostenibilidad agrícola. En sus páginas reúne investigaciones que exploran cómo la diversidad de comunidades edáficas, vegetales y microbianas desempeña un papel fundamental en el funcionamiento, la resiliencia y la sostenibilidad de los agroecosistemas. La presente obra reúne valiosos aportes de investigación que destacan el papel fundamental de los microorganismos del suelo en la sostenibilidad de los sistemas agropecuarios. Desde los sistemas agroforestales de cacao en Pauna, Boyacá, donde la biodiversidad microbiana se revela como clave para la salud del suelo y la productividad del cultivo, hasta los estudios sobre la diversidad de hongos micorrícicos en los cultivos de cebolla y sus efectos en la resistencia a enfermedades, cada capítulo ofrece una mirada detallada sobre cómo las interacciones planta-microorganismo moldean la resiliencia y eficiencia de los sistemas agrícolas. La investigación en torno al aguacate, uno de los principales productos de exportación de Colombia, resalta alternativas biotecnológicas innovadoras para enfrentar los desafíos fitosanitarios de manera sostenible, mientras que el estudio de *Gmelina arborea* ilustra la importancia de los microorganismos rizosféricos en la restauración y productividad de suelos en sistemas de reforestación.

A lo largo del libro, más allá del diagnóstico de los problemas asociados a la agricultura intensiva, se ofrecen caminos hacia soluciones prácticas:

la bioprospección de microorganismos benéficos, prácticas de manejo ambientalmente amigables y estrategias para la recuperación de funciones ecosistémicas esenciales como la biofertilización y el control biológico. Este trabajo claramente muestra que la diversidad no es solo un patrimonio a proteger; es, también, una herramienta poderosa para construir sistemas agrícolas más sostenibles, resilientes y productivos. Conscientes de la complejidad y urgencia del momento histórico que atravesamos, este libro es una invitación a estudiantes, investigadores, técnicos y productores a reconocer el valor de las comunidades biológicas en los agroecosistemas y a imaginar nuevas formas de agricultura en el país que armonicen con la naturaleza.

Alejandro Caro Quintero, PhD

Profesor Asociado, Departamento de Biología
Universidad Nacional de Colombia
acarq@unal.edu.co

Autores

Nubia Carolina Higuera Mora

Microbióloga industrial. Pontificia Universidad Javeriana. M. Sc. Agricultura Ecológica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza - CATIE. Ph.D. Estudios Ambientales y Rurales. Pontificia Universidad Javeriana. Docente e investigadora. Escuela de Ingeniería. Corporación Universitaria Minuto de Dios UNIMINUTO. Correo: nhiguera@uniminuto.edu. ORCID. <https://orcid.org/0000-0003-1687-0468>

Camilo Andrés De La Hoz Shaw

Ingeniero en Agroecología. Corporación Universitaria Minuto de Dios. UNIMINUTO. Correo: cdelahozsha@uniminuto.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8390-6139>

Valentina Curcio Cruz

Ingeniera en Agroecología. Corporación Universitaria Minuto de Dios. UNIMINUTO. Correo: valentina.curcio@uniminuto.edu.co

Johan Steven Alcántara Cortés

Bacteriólogo y Laboratorista clínico. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. M. Sc. Biotecnología Universidad Nacional de Colombia. Docente programa de Ingeniería Agroecológica. Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO. Correo: johan.alcantara@uniminuto.edu ORCID. <https://orcid.org/0000-0003-1176-2599>

Raúl Hernando Posada Almanza

Biólogo de la Universidad Nacional de Colombia. M. Sc. en Microbiología de la Universidad de los Andes - Colombia. Ph. D. Instituto de Ecología – Xalapa - México. Docente e investigador del departamento de Ciencias Biológicas de la Universidad de Caldas y Director de investigaciones de ZENKINOKO SAS. Correo: zenkinoko@gmail.com ORCID. <https://orcid.org/0000-0002-4806-6215>

Sud Sair Sierra

Ingeniero en Agroecología de la Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO; candidato a Doctor en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Actualmente trabaja en Zenkinoko SAS como gerente y es miembro del Grupo de Investigación Desarrollos Ecológicos y Ambientales. Su correo electrónico de contacto es gerencia@zenkinoko.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8816-5787>

Cristina Calle Henao

Microbióloga Industrial y Ambiental. M.Sc. en Ciencias Agrarias. Candidata a Ph.D. en Microbiología. Docente en Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia (IUCMA) – Investigadora en Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB). Correo: cristina.calle@colmayor.edu.co. ORCID. <https://orcid.org/0000-0002-7344-3588>

Natalia Arbeláez Agudelo

Biotechnóloga. M.Sc. en Ciencias Agrarias. Investigadora en Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB). Correo: narbelaez@cib.org.co. ORCID. <https://orcid.org/0000-0003-2080-1852>

Lina María Arbeláez Galvis

Bacterióloga. M.Sc. en Ciencias Biotecnología. PhD. en Biotecnología. Investigadora en Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB). Correo: larbelaez@cib.org.co. ORCID. <https://orcid.org/0009-0003-0948-2288>

Juan Diego Medina Chavarría

Biólogo. M.Sc. Biología. Investigador en Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB). Correo: jmedina@cib.org.co. ORCID. <https://orcid.org/0000-0001-5226-1411>

Juan Carlos Bedoya Pérez

Ingeniero Químico. M.Sc. en Ciencias Biotecnología. PhD. en Microbiología. Docente en Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia (IUCMA) – Investigador en Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB). Correo: juan.bedoya@colmayor.edu.co. ORCID. <https://orcid.org/0000-0003-3776-9190>

Ximena Carolina Pulido Villamil

Licenciada en Biología y Química, Magíster en Ciencias Biológicas, Universidad del Tolima, Master y PhD en Biomedicina, Universidad de Barcelona, España. Docente asociada tiempo completo e investigadora, Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad del Tolima. xpulido@ut.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6776-0002>

Laura Daniela Devia Grimaldo

Bióloga, Universidad del Tolima. Investigadora, Universidad Pública de Navarra. lddeviagr@ut.edu.co, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0189-7847>

Lizeth Carolina Ospina Céspedes

Bióloga, Universidad del Tolima. Investigadora, Grupo de Investigación en Genética, Biotecnología Vegetal y Microbiana de la Universidad del Tolima - GEBIUT. lcospinac@ut.edu.co, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8442-4876>

Gisou Díaz Rojo

Matemática de la Universidad de La Habana con Maestría en Ciencias Matemáticas Mención de Probabilidades y Estadística de la Universidad de La Habana, Magíster en Docencia de la Universidad de la Salle en Colombia, con Doctorado en Estadística y Optimización de la Universidad Politécnica de Valencia en España. Docente e investigadora, Departamento de Matemáticas y Estadística, Facultad de Ciencias, Universidad del Tolima. gdiazrj@ut.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4620-221X>

Maryeimy Varón López

Bióloga, Universidad del Tolima. M.Sc. Ciencias, Universidad Federal de Lavras. Ph.D. Ciencias, Escuela Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Docente e investigadora, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad del Tolima. mvaronl@ut.edu.co. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1125-2329>

Joseph Fernando Cristancho Gómez

Médico Veterinario y Zootecnista. M.Sc. Ciencias Pecuarias, Universidad del Tolima. Docente asistente e investigador, Departamento de Producciones Pecuarias, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad del Tolima. Docente, Departamento de Producción Pecuaria, Universidad del

Tolima. jfcristanhogom@ut.edu.co , ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3454-4239>

Alexander Correa

Médico Veterinario y Zootecnista. Docente asistente e investigador, Departamento de Producción Pecuaria, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad del Tolima. Docente, Departamento de Producción Pecuaria, Universidad del Tolima. jacorread@ut.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8785-840X/print>

Gloria Lucía Martínez Restrepo

Médico Veterinario y Zootecnista. M.Sc. Desarrollo Rural, candidata a Doctora en Ciencias Agrarias, Universidad del Tolima. Docente asociado e investigadora, Departamento de Producción Pecuaria, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad del Tolima y Universidad Cooperativa de Colombia. glmartinezr@ut.edu.co, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1147-9419>

Indira Isis García

Zootecnista de la Universidad Nacional de Colombia, Magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en Producción Animal Tropical de la Universidad Nacional de Colombia (Palmira) y doctora en Ciencias Agrarias de la Universidad de Caldas. Coordinadora Laboratorio de Ecofisiología Animal Tropical. Docente e investigadora, Departamento de Producción Pecuaria, Universidad del Tolima. igarcia@ut.edu.co, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2116-7884>

Jairo Mora Delgado

Zootecnista de la Universidad de Nariño, Magíster en Desarrollo Rural de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá) y doctor en Agricultura Tropical Sostenible de la Universidad de Costa Rica, en San José de Costa Rica. Ha realizado estancias posdoctorales en Michigan State University y en New México State University (USA). Director del grupo de investigación en Sistemas Agroforestales Pecuarios SAFF, categoría A1 en el Ministerio de Ciencia y Tecnología. Docente titular, Departamento de Producción Pecuaria, Universidad del Tolima. jrmora@ut.edu.co, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1093-4216>

Resumen general

En los agroecosistemas y sistemas agroforestales las interacciones de la diversidad y comunidades biológicas asociadas contribuyen ecosistémicamente a mejorar las condiciones biológicas, físicas y químicas y salud del suelo, provee servicios ecosistémicos, ayuda en la mitigación del cambio climático e influyen en la productividad primaria y la respuesta agronómica. Esta diversidad, especialmente las comunidades microbianas rizosféricas son susceptibles a ser aprovechadas en procesos biotecnológicos y de bioprospección que permiten aprovechar todo su potencial y ofrecer diferentes alternativas a los manejos convencionales de los sistemas agrícolas y agroforestales. El libro busca socializar experiencias de investigación centradas en la microbiota del suelo, los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y el desarrollo de bioinsumos en sistemas agropecuarios en Colombia. A lo largo del libro se explora la comprensión de la diversidad y de las diferentes comunidades biológicas asociadas a los sistemas productivos de cacao, cebolla, aguacate y sistemas silvopastoriles con la planta *Gmelina arborea* y las funciones derivadas, planteando oportunidades, limitaciones y retos en el manejo de la biodiversidad y el desarrollo de productos y procesos tecnológicos que ofrecen un valor agregado en un contexto real de manejo en las diferentes zonas de influencia de Antioquia, Boyacá y Tolima. Este libro resalta la importancia de los microorganismos del suelo en los ciclos de nutrientes, la salud de las plantas y la productividad agrícola, al tiempo que destaca la variabilidad de estas comunidades en función de las prácticas de manejo y las condiciones edáficas, a través de sus cuatro capítulos: a). Biodiversidad de microorganismos edáficos asociada a diferentes tipologías de sistemas agroforestales de cacao en Pauna (Boyacá); b). Relación entre la diversidad de micorrizas y nivel de deterioro del cultivo de cebolla; c). Alternativas biotecnológicas para el manejo integrado del cultivo de aguacate, y d). *Gmelina arborea* como modelo experimental en laboratorio, vivero y campo. También se presenta el desarrollo y evaluación de formulaciones bacterianas como alternativas a los agroquímicos, incluyendo pruebas de estabilidad y seguridad. El libro destaca funciones microbianas claves como la solubilización de nutrientes, fijación biológica de nitrógeno, transporte y absorción de nutrientes, y control biológico de patógenos, vinculadas a los beneficios ecosistémicos y agronómicos que ofrecen. Las investigaciones presentadas a lo largo del libro permiten corroborar que la diversidad microbiana, abordada desde una perspectiva funcional, no solo permite reducir el uso de insumos químicos, sino también regenerar suelos, mejorar la sanidad vegetal y aumentar la eficiencia de los recursos disponibles. Por lo tanto, integrar la microbiota edáfica dentro de una visión holística de los agroecosistemas es relevante para la sostenibilidad de los agroecosistemas, haciéndolos más resilientes y productivos.

Palabras clave: Microbiota del suelo, Funciones microbianas, Biodiversidad edáfica, Manejo agrícola sostenible, Interacciones Planta – Suelo - Microorganismos

Key words: Soil microbiota, Microbial functions, Soil biodiversity, Sustainable agricultural management, Plant soil microorganisms interaction.

Cómo citar este libro

Higuera Mora, N. C., & Posada Almanza, R. H. (Eds.). (2025). *Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales*. Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO. <https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5>

Introducción



Juan Carlos Bedoya Pérez¹

Cristina Calle Henao¹

Camilo Andrés De La Hoz Shaw²

Nubia Carolina Higuera Mora²

Jairo Ricardo Mora Delgado³

Raúl Hernando Posada Almanza⁴

Ximena Carolina Pulido Villamil³

Sud Sair Sierra Roncancio⁴

Los autores están presentados en orden alfabético

La agricultura ha sido una actividad esencial para la producción de alimentos y materias primas a lo largo de la historia de la humanidad; sin embargo, prácticas intensivas como la preparación excesiva del suelo y el manejo inadecuado de los cultivos han generado impactos significativos sobre el medio ambiente (Keesstra et al. 2016). En las últimas décadas, la agricultura ha experimentado una intensificación y una industrialización con el propósito de aumentar la productividad, pero así mismo, han aumentado los efectos negativos sobre los ecosistemas, el clima, la salud y la sociedad (Wang et al. 2023).

1 Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB) – Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia (IUCMA)

2 Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO. Rectoría Bogotá. Grupo de Investigación Agroeco y Gestión ambiental.

3 Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia.

4 Zenkinoko S.A.S

En este capítulo, se inicia con un análisis del contexto histórico, económico y social de la agricultura industrializada, así como sus principales impactos ambientales, las alternativas para una agricultura más sostenible, además de evidenciar cómo la biodiversidad tiene un rol relevante en este propósito y las principales limitaciones para emplearla de una manera efectiva. Se continúa con las principales limitaciones y desafíos asociados con el uso de la biodiversidad y principalmente en la práctica agroecológica. Finalmente se discute cómo estos obstáculos pueden ser superados a través de estrategias innovadoras y enfoques multidisciplinarios que promuevan la sostenibilidad, dando una pequeña reseña de los diferentes aportes de cada uno de los capítulos del presente libro para contribuir a superar los obstáculos presentados para una agricultura sostenible.

Contexto de la agricultura industrializada y sus efectos en el medio ambiente

Contexto histórico

La agricultura surgió hace unos 10.000 años como una forma de domesticar plantas y animales para obtener alimentos y otros recursos (Harlan, 1971; Smith, 1998). Desde entonces, la agricultura ha pasado por diferentes etapas, como la revolución neolítica, la revolución agrícola, la revolución verde y la revolución biotecnológica, que han supuesto avances en el conocimiento, la técnica y la innovación agrícola (Casas et al. 2016; Thrall et al. 2010). Sin embargo, estos avances también han implicado una mayor dependencia de los recursos naturales, una mayor especialización y homogeneización de los cultivos y, una mayor concentración y globalización del mercado agrícola (Hertel & Lobell, 2014). Estos factores han dado lugar a lo que se conoce como agricultura industrializada, que se caracteriza por el uso intensivo de insumos químicos, maquinaria, energía, agua y tierra, así como por la producción masiva y estandarizada de alimentos (Lassaletta & Rovira, 2005).

Contexto económico

El sistema agroalimentario global es el conjunto de actividades que se desarrollan desde la producción hasta el consumo de los alimentos, allí se incluyen el transporte, el procesamiento, el almacenamiento, la comercialización,

el consumo y la disposición del desperdicio de los productos agrícolas (Hernández & Villaseñor, 2014). El desarrollo de estos sistemas de producción ha sido liderado por grandes corporaciones transnacionales que controlan gran parte de la cadena de valor agrícola y que buscan maximizar sus beneficios mediante la reducción de costos, el aumento de la productividad y la expansión de los mercados (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, [FAO], 2019); en este sentido, estas corporaciones ejercen una gran influencia sobre las políticas públicas, las normas internacionales y las preferencias de los consumidores (Delgado, 2010). El crecimiento demográfico significa un gran reto para el sistema agroalimentario debido a la acelerada demanda de alimentos y al cambio de hábitos alimentarios, la competencia por los escasos recursos naturales y la crisis climática (Hernández & Villaseñor, 2014).

Contexto social

La agricultura industrializada tiene un impacto social positivo o negativo sobre las personas que participan en ella dependiendo del beneficio obtenido (Sarandón, 2020). Por un lado, la agricultura industrializada ha contribuido a mejorar la seguridad alimentaria mundial al aumentar la disponibilidad y el acceso a los alimentos y ha generado empleo e ingresos para millones de personas que trabajan en el sector agrícola o en actividades relacionadas (Bula, 2020). Sin embargo, la agricultura industrializada también ha provocado problemas sociales como el acaparamiento de tierras y el desplazamiento forzado de comunidades campesinas e indígenas; la pérdida de soberanía alimentaria y diversidad cultural; ha insidido en condiciones laborales precarias e insalubres, generando conflictos por el control de los recursos naturales, y ha causado efectos negativos sobre la salud humana por el consumo de alimentos ultraprocesados o contaminados con trazas de los insumos de síntesis química utilizados en manejo de plagas y enfermedades en los cultivos (Martínez, 2005).

Impactos ambientales de la agricultura

La agricultura industrializada genera un impacto ambiental significativo sobre el suelo, el agua, el aire, la biodiversidad y el clima. Entre los impactos más relevantes están:

- **Deforestación:** La expansión de la agricultura industrializada a menudo implica la tala de bosques para ampliar la frontera agrícola, esto no solo reduce la biodiversidad, sino que también elimina una importante fuente de absorción de dióxido de carbono, lo que contribuye al cambio climático (Olagunju, 2015; Pacheco et al. 2021). La combinación entre la intensificación de procesos de producción agrícola y la tala de bosques para suplir la demanda de alimentos y otros productos agrícolas ha provocado daños medioambientales conduciendo al 90% de la deforestación mundial (FAO, 2022a).
- **Contaminación:** El uso excesivo de pesticidas, herbicidas y fertilizantes de síntesis química para garantizar la productividad en los agroecosistemas, genera preocupación para la salud humana y del ambiente, debido a las consecuencias negativas que esto conlleva (Dhuldhaj et al. 2022). El uso excesivo de fertilizantes de síntesis química, en parte, se da debido a la baja eficiencia en la absorción de los nutrientes, se estima que para el caso del nitrógeno esta puede estar entre el 40 y 65 %, el del fósforo entre el 15 y 25 % y para el potasio entre el 30 y 50 %, en el primer año, y los nutrientes no absorbidos, se trasladan al suelo y a fuentes de agua, generando impactos ambientales y sanitarios, así como pérdidas monetarias para los productores (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2022). Además de lo anterior, los sistemas de producción agrícolas reciben cargas excesivas de productos xenobióticos que, por su naturaleza química, su durabilidad y recalcitrancia, pueden ser trasladados de distintas maneras a otros ecosistemas y afectarlos (Carvalho, 2017).
- **Erosión:** La degradación edáfica es cada vez más grave y se genera principalmente por el agotamiento de los nutrientes, el desbalance iónico, las prácticas de labranza y la salinización del suelo, incrementando la incompatibilidad de la relación entre humanidad, recursos y medio ambiente, lo cual ha despertado el interés mundial (Wang et al. 2023). Según la FAO (2015, 2017, 2021) el uso intensivo de la tierra puede agotar los nutrientes del suelo, generando un deterioro de aproximadamente el 33% a nivel mundial, con un estado moderado o altamente degradado por la erosión.
- **Emisión de gases de efecto invernadero:** La producción agropecuaria es una de las principales fuentes de emisión de gases de efecto

invernadero, representando aproximadamente el 30% del total de las emisiones (Saynes et al. 2016). Estos gases de efecto invernadero provienen principalmente de la liberación de dióxido de carbono por la deforestación, la liberación de metano por el cultivo de arroz, la fermentación entérica en el ganado, la liberación de óxido nitroso por la aplicación de fertilizantes y, la liberación de CO₂ por la aplicación de cal y urea a los suelos (Tubiello et al. 2015).

- Pérdida de biodiversidad: La agricultura industrializada favorece el monocultivo y la homogeneización genética, lo que reduce la diversidad biológica tanto dentro como fuera de los sistemas agrícolas (FAO, 2022b; Reyes & Cano, 2022). Esto implica una mayor vulnerabilidad a las plagas, las enfermedades y los cambios climáticos, así como una menor capacidad de adaptación y resiliencia (Hernández, 2013).

Importancia de la conservación de la diversidad y comunidades en los sistemas agrícolas y agroforestales

La biodiversidad, en su sentido más amplio, abarca la variedad de formas de vida en todos los niveles, desde genes hasta ecosistemas, y constituye un pilar fundamental para el equilibrio ambiental y el bienestar humano (Hammoud et al. 2024). En un país como Colombia, que se destaca por su extraordinaria riqueza biológica y ecosistemas diversos, la relación entre la biodiversidad y la sostenibilidad adquiere una relevancia aún mayor. El aprovechamiento de la biodiversidad para la sostenibilidad no solo se refiere a su conservación, sino también a su utilización responsable y estratégica en la agricultura, la producción de alimentos, la gestión del agua y los recursos naturales, entre otras áreas (Arbelaez, 2025).

La diversidad biológica o biodiversidad se define como la variabilidad entre los organismos vivos incluyendo todos los que hacen parte de los ecosistemas terrestres, marinos y otros ecosistemas acuáticos (Convención sobre la Diversidad Biológica [CDB], 1992). Es un término amplio que abarca desde la diversidad genética o dentro de las especies, entre las especies o de organismos, hasta la diversidad del ecosistema o ecológica. Desde el punto de vista de la agricultura y los alimentos, la biodiversidad se concibe como una subcategoría que comprende la variedad y variabilidad de las plantas, animales y microorganismos que sustentan las estructuras, funciones y

procesos ecosistémicos en un sistema de producción para proporcionar los alimentos o productos agrícolas no alimentarios (FAO, 2013).

Dentro de los ecosistemas más importantes de la naturaleza, se encuentra el suelo ya que este es uno de los hábitats más diversos con miles de organismos (macro y microorganismos) que interactúan recíprocamente y que participan directamente en los servicios ecosistémicos que hacen posible la vida en el planeta (Lehmann et al. 2020; Banerjee & Van der Heijden, 2023). La biodiversidad del suelo en general y específicamente a lo que se refiere diversidad microbiana direcciona los procesos químicos, físicos y biológicos que se llevan a cabo allí, esenciales para la producción agrícola sostenible (Wall et al. 2015, Hartmann & Six, 2023).

Los microorganismos o comunidades microbianas juegan un papel fundamental en la bioquímica del suelo, lo cual involucra el ciclaje de nutrientes por medio de reacciones de oxidación, reducción, solubilización y quelación, transformando la materia orgánica en nutrientes, formación de humus y regulando el flujo de energía (Chen et al. 2019; Liu et al. 2022). También, el microbioma del suelo es fundamental para: (1) la mitigación del cambio climático, regulando el flujo de carbono terrestre; (2) estimular el crecimiento de la planta y aumentar su tolerancia frente al estrés abiótico; (3) el control de enfermedades y plagas, (4) la degradación de contaminantes como químicos, farmacéuticos, metales pesados, nanopartículas, entre otros (Xiong & Lu, 2022; Hartman & Six, 2023). Es así como aportan a la nutrición y salud de la planta, y a mantener la estructura y fertilidad del suelo, provee beneficios para la salud humana y contribuye a limpiar el aire, agua y alimentos (Wall et al. 2015; Banerjee & Van der Heijden, 2023)

La estructura del microbioma del suelo y sus funciones en el agroecosistema influyen en las propiedades física y químicas de este suelo. Un agroecosistema se define como un sitio o una región integrada o un sistema antropogénico que soporta la producción alimentaria principalmente, conserva los recursos bióticos y abióticos y provee un balance de los servicios ecosistémicos (Hartman & Six, 2023). Las alteraciones en la estructura del suelo podrían tener un impacto significativo en la sobrevivencia y el metabolismo de la microorganismos del suelo, lo cual está influenciado por el contenido de materia orgánica, el recambio de nutrientes y las interacciones de los microorganismos con las plantas (Hartmann & Six, 2023).

Además, es importante mencionar que la biodiversidad en los agroecosistemas no solamente se asocia a los microorganismos del suelo, sino también se reconocen diferentes dimensiones de biodiversidad, por ejemplo, en la agricultura, se distingue la biodiversidad planeada y asociada, la primera hace referencia a las plantas y animales introducidos y criados por los campesinos o el agricultor y la segunda comprende todos los organismos que colonizan de manera espontánea el agroecosistema (polinizadores, supresores de plaga, herbívoros, descomponedores, carnívoros, flora y fauna del suelo, entre otros), respectivamente (Altieri, 1999; Perfecto et al. 2019)

La interacción de las actividades humanas y los factores naturales influyen en las propiedades físicoquímicas, la biodiversidad y las funciones ecológicas del suelo (Liu et al. 2022). Los sistemas agrícolas y su manejo inciden sobre el componente microbiano en términos de biodiversidad y densidad poblacional, por lo que a mediano y largo plazo un mal manejo podría causar la pérdida de la fertilidad de los suelos (Olalde & Aguilera, 1998).

Por las razones anteriores, es importante estudiar la estructura y diversidad de las comunidades microbianas nativas, así como explorar el potencial de diferentes actividades biológicas de los microorganismos que las componen (capacidad de fijación de nitrógeno, solubilización de fosfatos, actividad de fitohormonas, producción de exopolisacáridos, osmolitos antioxidantes, entre otros), así como, conservar los microorganismos en colecciones o en hábitats naturales, promover la interacción microorganismo-planta, disminuir el efecto negativo sobre la biodiversidad en los sistemas productivos y promover la utilización o aplicación de los conocimientos sobre la diversidad biológica en sistemas de producción sustentable (Olalde & Aguilera, 1998; Hartmann & Six, 2023). De esta manera, para abordar la crisis de la biodiversidad en aras de cumplir los objetivos del desarrollo sostenible, es necesario la transformación de la silvicultura, los sistemas agrícolas y agroforestales para contribuir a la reducción de los impactos sobre esta y satisfacer las necesidades de las personas (FAO, 2023).

Funciones asociadas a la diversidad y comunidades en los sistemas agrícolas y agroforestales

El manejo tradicional de los cultivos agrícolas en Colombia ha sido ampliamente dependiente del suministro de agroquímicos bajo prácticas convencionales que se han arraigado fuertemente en la cultura de pequeños y grandes

productores (Barrios et al. 2023). Los impactos ambientales, climáticos y de salud generados bajo este sistema exigen la adopción de mecanismos de producción que conduzcan a un modelo agrícola más justo, sostenible y resiliente (Mitra et al. 2021) Ahora bien, el país cuenta con condiciones agroclimáticas muy diversas, una gran variedad de cultivos y una amplia gama de productos agrícolas lo que representa un enorme potencial para el aprovechamiento de la diversidad microbiana bajo esquemas de economía circular, alta productividad y sostenibilidad ambiental (Reyes et al. 2024). En este sentido, la reducción o sustitución de agroquímicos a través de la implementación de prácticas naturales podría permitir la conservación de la diversidad biológica, la reducción en niveles de contaminación de suelos, aguas y aire, la mitigación del cambio climático, mejoras en el acceso a alimentos nutritivos y seguros, mejoras en la salud humana, el empoderamiento de comunidades rurales, la reducción en la dependencia a insumos y costos de producción, la preservación del conocimiento tradicional, y el acceso a mercados que dan prioridad a productos con valor agregado (Anduaem & Seid, 2021).

Los diversos servicios ecosistémicos ofrecidos por los microorganismos (Tabla 1.1) pueden ser aprovechados para el desarrollo de bioproductos que favorezcan la productividad agrícola y la protección del medio ambiente. Para lograrlo, es indispensable el estudio de la diversidad microbiana asociada a cada tipo de suelo y su efecto sobre cultivos específicos, así como a los procesos ecológicos inherentes (Jansson & Hofmockel, 2020).

Tabla 1.1

Servicios ecosistémicos ofrecidos por los microorganismos

Beneficio	Mecanismo	Ejemplos
Mejorar la fertilidad del suelo garantizando disponibilidad continua de nutrientes	Descomposición de materia orgánica	<i>Penicillium</i> sp., <i>Aspergillus</i> sp., <i>Trichoderma</i> sp., <i>Streptomyces</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Cellulomonas</i> sp., <i>Clostridium</i> sp., <i>Verticillium</i> sp., <i>Phanerochaete</i> sp., <i>Chrysosporium</i> sp. (Akinpelu et al. 2023)
	Fijación de nitrógeno y nitrificación	<i>Rhizobium</i> sp., <i>Azoarcus</i> sp., <i>Mesorhizobium</i> sp., <i>Frankia</i> sp., <i>Burkholderia</i> sp., <i>Achromobacter</i> sp. (Pérez et al. 2014)

Tabla 1.1 Continuación**Servicios ecosistémicos ofrecidos por los microorganismos**

Beneficio	Mecanismo	Ejemplos
Mejorar la fertilidad del suelo garantizando disponibilidad continua de nutrientes	Solubilización de fósforo	<i>Arthrobacter</i> sp., <i>Bacillus</i> sp., <i>Burkholderia</i> sp., <i>Enterobacter</i> sp., <i>Microbacterium</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Rhizobium</i> sp., <i>Mesorhizobium</i> sp., <i>Flavobacterium</i> sp., <i>Serratia</i> sp. (Riaz et al. 2021)
	Solubilización de potasio	<i>Acidithiobacillus</i> sp., <i>Bacillus edaphicus</i> , <i>Ferrooxidans</i> sp., <i>B. mucilaginosus</i> , <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Burkholderia</i> sp. (Prajapati et al. 2013)
	Producción de sideróforos	<i>Enterobacter</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Bacillus</i> sp., <i>Rhodococcus</i> sp. (Rezanka et al. 2018)
	Producción de exopolisacáridos	<i>Rhizobium leguminosarum</i> , <i>Azotobacter</i> sp., <i>B. drementensis</i> , <i>Agrobacterium</i> sp., <i>Xanthomonas</i> sp. (Mahmood et al. 2016)
Favorecer procesos de crecimiento y maduración	Producción de fitohormonas	<i>Bacillus</i> sp., <i>Pantoea</i> sp., <i>Arthrobacter</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Enterobacter</i> sp., <i>Brevundimonas</i> sp., <i>Burkholderia</i> sp. (Kumar et al. 2010)
	Manejo de estrés biótico y abiótico	<i>Paenibacillus polymyxa</i> sp., <i>B. amyloliquefaciens</i> , <i>P. favisporus</i> HYTAPB30, <i>B. subtilis</i> RMPB44 (Vejan et al. 2016)
Degradar contaminantes presentes en suelos y aguas	Biorremediación de efluentes de papel y pulpa	<i>Citrobacter freundii</i> , <i>S. marcescens</i> , <i>Ps. stutzeri</i> , <i>Enterobacter</i> sp., <i>S. liquefaciens</i> , <i>Brevibacillus agri</i> , <i>Br. parabrevis</i> (Bhowmick et al. 2024)
	Biorremediación de metales pesados	<i>Aspergillus awamori</i> , <i>A. flavus</i> , <i>Phanerochaete chrysosporium</i> , <i>Ps. aeruginosa</i> , <i>P. corylophilum</i> , <i>Ps. abietaniphila</i> , <i>Planococcus rifietoensis</i> , <i>Stenotrophomonas maltophilia</i> , <i>Sporosarcina pasteurii</i> , <i>Variovorax boronicumulans</i> (Bhowmick et al. 2024)
	Biorremediación de xenobióticos	<i>Zobellia</i> sp., <i>Sphingomonas paucimobilis</i> , <i>Shewanella indica</i> , <i>Rheinheimera</i> sp., <i>Pichia occidentalis</i> , <i>P. polymyxa</i> , <i>Oceanimonas smirnovii</i> , <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Marinobacterium</i> sp., <i>Halomonas</i> sp., <i>Brevibacillus</i> sp., <i>B. fusiformis</i> , <i>Acinetobacter junii</i> (Yadav & Yadav, 2019).

Tabla 1.1 Continuación**Servicios ecosistémicos ofrecidos por los microorganismos**

Beneficio	Mecanismo	Ejemplos
Controlar plagas y enfermedades	Producción de enzimas hidrolíticas	<i>Sinorhizobium fredii</i> KCC5, <i>Ps. fluorescens</i> LPK2 (Kumar et al. 2010) <i>Beauveria bassiana</i> , <i>Metarhizium anisopliae</i> , <i>Lecanicillium lecanii</i> , <i>Isaria fumosorosea</i> (Guzmán et al. 2024)
	Inducción de resistencia sistémica	<i>Pseudomonas</i> sp., <i>Bacillus</i> sp., <i>Arthrobacter</i> sp., <i>Stenotrophomonas</i> sp., <i>Serratia</i> sp. (Santoro et al. 2016)
	Producción de antibióticos	<i>Bacillus</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp. (Fouzia et al. 2015)

Fuente: Elaboración propia

El desarrollo de estudios asociados al uso potencial de microorganismos y/o sus compuestos metabólicos especializados, constituye la base para la obtención de bioinsumos con diversas actividades biológicas, los cuales pueden ser producidos a escalas. Su aplicación practica puede abarcar las siguientes áreas:

- Control Biológico. Entendido como la utilización de organismos vivos o de los compuestos que estos producen, con el objetivo de reducir el impacto de enfermedades ocasionadas por fitopatógenos (como hongos, bacterias y virus) o de plagas (como insectos, ácaros y nematodos) que comprometen el desarrollo y la productividad de los cultivos agrícolas (Vinchira & Moreno, 2019). Esta estrategia de manejo se fundamenta en las relaciones que se establecen entre la planta, el agente patógeno, el organismo biocontrolador y las condiciones del entorno en que ocurre la interacción (Bullor et al. 2024). La incorporación de microorganismos con propiedades antagonistas permite disminuir el uso de agroquímicos, favoreciendo una reducción sostenible de la presencia de patógenos en los sistemas agrícolas, con menor impacto ambiental. Para esto, es necesario que el biocontrolador permanezca viable, eficaz y capaz de crecer en el espacio de la planta susceptible a la presencia del fitopatógeno bien sea la rizósfera, la filósfera, la endósfera, entre otros (Lira, 2023; Leggett et al. 2011). Los microorganismos seleccionados como biocontroladores,

deben ser metabólicamente activos de manera que puedan ejercer su “efecto protector” bien sea de forma directa (produciendo metabolitos o enzimas que inhiben el crecimiento del patógeno o compitiendo por espacio o nutrientes) o indirecta (estimulando las defensas de la planta), en este sentido, el éxito de un biocontrolador recae en la rigurosidad de su selección y en la cantidad de información que se pueda obtener sobre su interacción con la planta y el fitopatógeno de interés (Al Raish et al. 2025; Vinchira & Moreno, 2019).

Los agentes biocontroladores son usados actualmente como una herramienta importante en el control de plagas y enfermedades, teniendo en cuenta que son una alternativa viable al uso de pesticidas de origen sintético.

Existe un amplio grupo de microorganismos empleados como agentes de biocontrol en la agricultura, incluyendo bacterias, hongos, levaduras y virus. Entre las bacterias más utilizadas se encuentran *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp. y *Streptomyces* spp., conocidas por su capacidad para producir metabolitos antimicrobianos, formar endosporas y contribuir al desarrollo vegetal (Campos et al. 2013). En cuanto a los hongos, destacan *Trichoderma* spp., *Beauveria* spp., *Metarhizium* spp., *Lecanicillium* spp. y *Clonostachys* spp., que actúan contra fitopatógenos o insectos plaga; mientras que levaduras como *Metschnikowia fructicola* y *Candida oleophila* se usan principalmente en el control de enfermedades postcosecha. Además, los virus entomopatógenos, como los baculovirus, han mostrado alta especificidad en el control de insectos, con bajo impacto ambiental.

- **Biofertilizantes.** Son sustancias que contienen microorganismos vivos capaces de promover el crecimiento de las plantas al aumentar el suministro de importantes nutrientes del suelo como nitrógeno, fósforo, potasio y otros elementos importantes en pequeñas cantidades (Asadu et al. 2020). Se ha reportado su uso como, fijadores de nitrógeno, solubilizadores de fósforo, productores de fitohormonas (p. ej. auxinas y giberelinas), compuestos orgánicos volátiles (tales como la acetoína y 2.3-butanediol) y productores de celulasas y pectinasas (Orozco-Mosqueda et al. 2023). El uso de biofertilizantes trae beneficios económicos, sociales y ambientales, además de representar una alternativa segura y eficaz a los fertilizantes nitrogenados

sintéticos (Ashgar et al. 2022). En las últimas dos décadas el uso de esta alternativa ha tomado más fuerza y ha permitido resultados favorables en la producción agrícola. Igualmente, el desarrollo de investigaciones basadas en fertilización biológica ha aumentado en los últimos quince años, lo que indica un interés creciente en el tema (Sun et al. 2020).

- Bioestimulantes. Son productos que contienen mezclas de sustancias y/o microorganismos que al ser aplicados foliarmente o en la rizósfera de la planta estimulan procesos naturales, absorción y eficiencia en el uso de nutrientes, tolerancia al estrés (biótico y abiótico), entre otros, mejorando la calidad de los cultivos (Madende & Hayes, 2020). En la agricultura, el uso de los bioestimulantes agrícolas juega un rol muy importante como complemento a la nutrición y protección. Algunas de estas sustancias pueden estimular los sistemas de defensa de las plantas cuando se encuentran expuestas a un factor de estrés generando cambios fisiológicos y bioquímicos que incluyen el engrosamiento de la pared celular y la producción de fitoalexinas y proteínas relacionadas con la defensa (Grammenou et al. 2023). Se consideran como bioestimulantes a los hidrolizados proteicos, formulaciones con aminoácidos, ácidos húmicos, fitohormonas y determinados microorganismos y hongos los cuales favorecen la captación de nutrientes reduciendo impactos no deseados al medio ambiente, a la vez que aseguran que los agricultores obtengan un mayor retorno en sus inversiones (García et al. 2018).

En el proceso de desarrollo de un bioinsumo agrícola se pueden distinguir tres etapas fundamentales: investigación y pruebas iniciales en laboratorio, ensayos en ambientes controlados, y validación en condiciones reales de uso (Bullor et al. 2024). A continuación, se detallan las actividades clave asociadas a cada una de estas fases:

- Investigación y evaluación inicial en laboratorio. Esta fase comienza con el aislamiento y la caracterización de cepas microbianas o metabolitos con potencial bioactivo. Antes de formular, se realizan pruebas preliminares para verificar su actividad frente a patógenos u otros factores de interés. Solo aquellos con resultados prometedores se consideran para el desarrollo de prototipos, los cuales se evalúan posteriormente en cuanto a su viabilidad biológica y estabilidad funcional (Starobinsky et al. 2021).

- Evaluación en condiciones controladas. Ya sea con un prototipo formulado o con el agente bioactivo en estado inicial, se realizan ensayos en invernadero bajo condiciones controladas de estrés biótico o abiótico. Esta etapa permite observar su efecto sobre el desarrollo vegetal y la respuesta frente a factores como enfermedades, insectos o deficiencias nutricionales. También se analizan aspectos técnicos para su eventual producción a escala piloto (Rocha et al. 2024).
- Validación en campo. Los agentes o formulaciones con mejor desempeño se prueban en condiciones reales mediante ensayos en parcelas demostrativas. Esta etapa permite confirmar su eficacia agronómica, definir dosis y frecuencias de aplicación, y ajustar su manejo para optimizar resultados en escenarios productivos (da Silva et al. 2024).

Prácticas de manejo apropiadas o ambientalmente amigables

El modelo agroalimentario dominante no sólo fracasó en su compromiso al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, sino que por el contrario ha profundizado la crisis socioecológica global siendo uno de los impulsores fundamentales de la pérdida de biodiversidad y la desigualdad social (Benton et al. 2021; Shostak, 2023). Esta, afecta principalmente a los pobres extremos del mundo puesto que aproximadamente el 80% habita en la ruralidad y hacen de la agricultura una de sus principales actividades para su subsistencia.

Ante esto, es apremiante incluir la biodiversidad y las personas en la gestión de los agroecosistemas, entendiendo que juegan un papel fundamental en su dinámica y funcionamiento. Para esto, deben emplearse prácticas adecuadas que deriven de conocimientos científicos y no científicos, posibilitando la planificación de la biodiversidad para la conservación y promoción de esta y de sus servicios asociados.

El manejo de agroecosistemas puede entenderse como las consideraciones y acciones dedicadas a la gestión del sistema agrícola, por tanto, involucran factores sociales, ecológicos y económicos. Para una aproximación sobre la visión sistémica de la unidad agrícola o agroecosistema, se debe hacer énfasis en las interacciones complejas que se dan entre sus elementos (fuerza de

trabajo, cultivos, animales, bienes naturales, capital y valores culturales) con grados de dependencia donde el productor o la unidad familiar los manipula según sus necesidades y determinaciones de uso, distribución y combinación de estos para obtener bienes y servicios en ciertos periodos, sin desestimar la influencia de condicionantes externos.

En ese sentido, el manejo de agroecosistemas enfatiza en la administración y organización de los sistemas agrícolas con el objetivo de optimizar los bienes naturales utilizados, mejorar la productividad y reducir los impactos socioambientales. Para ello, es necesario la aplicación de metodologías científicas interdisciplinarias y participativas hacia fuera y hacia dentro de los predios, incluyendo los debidos microanálisis, según sea la escala-objetivo (Scalone, 2010).

De esta manera, se han establecido seis principios ecológicos que debería procurar el manejo de agroecosistemas (Nicholls et al. 2016), a saber:

(1). Mejorar el reciclaje de la biomasa; (2). Mejorar las condiciones favorables del suelo para el crecimiento de las plantas; (3) Minimizar las pérdidas de energía, agua, nutrientes y recursos genéticos; (4). Fortalecer la resiliencia a través del manejo ecológico de plagas y enfermedades; (5). Diversificar las especies y recursos genéticos del agroecosistema a lo largo del tiempo y el espacio a escala de predio y paisaje, y (6). Mejorar las sinergias y las interacciones biológicas beneficiosas.

Todas estas prácticas deben darse en un contexto más amplio con diversos conceptos que permiten la conservación de la biodiversidad. A continuación se exponen algunas ideas de la manera en la que se ha integrado la biodiversidad a los sistemas de producción agrícola.

La agroecología

La agroecología como una ciencia, una práctica y un movimiento social que busca diseñar sistemas agrícolas que sean productivos, ecológicos, sociales y económicos (Gliessman et al. 2007). La agroecología promueve la diversidad biológica, el manejo integrado de plagas, el reciclaje de nutrientes, la conservación del suelo y el agua, y la participación de los agricultores y las comunidades locales en la gestión de los recursos naturales (Sanchez, 2018).

Las prácticas agroecológicas son diversas y sujetas al contexto de desarrollo, aplicación y los actores involucrados, por lo que no existe un consenso de qué

son prácticas agroecológicas y qué no (Grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria [HLPE], 2019). En general, estas buscan fortalecer los servicios ecosistémicos asociados a los agroecosistemas y su sustentabilidad, vinculada a los principios ecológicos.

Algunos ejemplos de prácticas agroecológicas son: rotación de cultivos, la labranza mínima, diversificación de cultivos, cultivos intercalados, producción de bioinsumos a partir de biomasa y estiércoles animales, control biológico, uso de insumos orgánicos, captación, almacenamiento y reutilización de aguas lluvias, mulch o acolchado, bajo uso de insumos externos, gestión integral de residuos orgánicos, cultivos alelopáticos, la restauración ecológica, la reforestación, conservación y propagación de flora nativa, sistemas agrosilvopastoriles, agroforestería, uso de inoculantes microbianos nativos, fijación biológica de nitrógeno, cultivo de coberturas, bancos de forrajes y proteína, huertos, uso racional de productos de síntesis química, entre otros (HLPE, 2019; Leippert et al. 2020; von Cossel et al. 2025; Bezner Kerr et al. 2023).

La agricultura de conservación y la agricultura orgánica

La agricultura de conservación es un sistema de manejo integrado del suelo, el agua y los recursos agrícolas, basada en tres principios: 1) la mínima perturbación del suelo, 2) el mantenimiento de una cobertura vegetal permanente y 3) la rotación de cultivos (Verhulst et al. 2015). La agricultura de conservación puede mejorar la fertilidad del suelo, la retención de agua, la productividad agrícola y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (INECC, 2022).

Por su parte, la agricultura orgánica es un sistema de producción que excluye el uso de fertilizantes sintéticos, plaguicidas, organismos genéticamente modificados y otros insumos químicos. La agricultura orgánica busca preservar la salud del suelo, el agua, los animales y las personas, así como fomentar el comercio justo y el desarrollo rural (Oliveira et al. 2024).

Los sistemas agroforestales

Son formas de uso del suelo que combinan árboles con cultivos o ganado en una misma unidad de manejo (Illescas et al. 2020). Los sistemas agroforestales pueden proporcionar múltiples beneficios ambientales y socioeconómicos,

como la conservación de la biodiversidad, la protección contra la erosión, el aumento del ingreso y la seguridad alimentaria, y la mitigación y adaptación al cambio climático (Ruiz et al. 2019).

Todos estas estrategias de cultivo incorporan la conservación de la biodiversidad como un aspecto fundamental que promueve la sostenibilidad. Diversos estudios apoyan esta idea, Khashi y Rahman et al. (2025) exploraron la tendencia de investigación global sobre el cultivo intercalado de cultivos exclusivamente no leguminosos (ICnl) a través de un metaanálisis de 174 casos individuales, donde encontraron que ICnl aumentó la biomasa vegetal, la supresión de enfermedades y un rendimiento superior sobre los monocultivos.

Por otro lado, a la pregunta, ¿puede la agroecología mejorar la seguridad alimentaria y la nutrición? Kerr et al. (2021) evidenciaron que el 78% de los estudios analizados entre 1998 y 2019 mostraron resultados positivos con relación a la seguridad alimentaria y nutricional a partir de prácticas agroecológicas claves (diversidad de cultivos, las enmiendas orgánicas del suelo y la agroforestería).

Frente a la resiliencia los sistemas agrícolas tradicionales ante la expansión global de monocultivos (arroz, trigo y maíz), Rampersad et al. (2023), estudiaron 1369 granjas de subsistencia en las Tierras Altas de Etiopía (centro de agrobiodiversidad), descubriendo que los agricultores han integrado con éxito cultivos introducidos, resultando en agroecosistemas más diversos y heterogéneos sin afectar negativamente a la diversidad de cultivos autóctonos.

Si bien se sigue generando evidencia empírica de la eficiencia de las prácticas agroecológicas en el manejo de agroecosistemas, se precisa que no deben ser reducidas a esta dimensión de la agroecología ('conjunto de prácticas') puesto que refuerza una interpretación reduccionista de esta, ignorando la interdependencia a las determinantes socioeconómico y el objetivo de justicia social (Dumont et al. 2021). Por tanto, se sugiere, en la medida de lo posible, concebir también sus principios socioeconómicos.

Agroecosistemas y agricultura sustentable

A pesar de los grandes desafíos que han sido descritos a lo largo del documento, la integración de la biodiversidad en prácticas agrícolas, sigue siendo una opción viable y necesaria para lograr la sostenibilidad en Colombia, siempre y cuando se superen los obstáculos mediante políticas públicas coherentes,

apoyo institucional, una mayor educación y sensibilización de los actores involucrados.

Precisamente, ante el apremiante desafío de transformar los sistemas agroalimentarios en un contexto de crisis global multidimensional, la agroecología ha proporcionado bases científicas y potenciales herramientas de acción para responder a dicha complejidad mediante el diseño y manejo de sistemas agrícolas sustentables y resilientes, donde los conocimientos y la acción social resultan indispensables para dicho propósito (Belmin et al. 2022).

La evidencia científica con relación a los potenciales beneficios de la aplicación de prácticas agroecológicas para el manejo de los agroecosistemas es extensa y sugiere que son claves para lograr la seguridad alimentaria y nutricional, como también para alcanzar los objetivos del Decenio Internacional de las Naciones Unidas para la Restauración de los Ecosistemas (Dubey et al. 2022).

El manejo de los agroecosistemas requiere, sobre todo, continuar ampliando las fronteras del conocimiento y métodos dentro de sus divisiones asociadas, propendiendo por la inclusión de agentes sociales, componentes y contextos de los sistemas agrícolas. En otras palabras, capturar cada vez mejor la complejidad de la agricultura ya sea en condiciones de laboratorio, invernadero, campo o microcosmos sin abandonar la rigurosidad ni desatender la realidad en que gravita.

Buscando contribuir a la solución a este gran dilema, el libro *“Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales”*, es el resultado del esfuerzo conjunto de cuatro instituciones de diferente naturaleza jurídica: la Universidad del Tolima, como institución pública; la Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO, como universidad privada; la Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB), como centro de investigación, y ZENKINOKO SAS, como emprendimiento privado. Estas entidades fueron reunidas en el marco del programa *“Productos y procesos tecnológicos con microorganismos rizosféricos para la restauración de suelos degradados en ecosistemas agroforestales y agrícolas”* (Contrato 450 de 2021, Ministerio de Ciencias, Fondo Francisco José de Caldas). La presente obra es el resultado de este trabajo conjunto y representa una valiosa recopilación de experiencias investigativas enfocadas en generar soluciones biotecnológicas para la producción agropecuaria. Desde estudios en laboratorio hasta aplicaciones en campo, cada capítulo destaca los procesos de bioprospección y desarrollo

de bioinsumos, con un enfoque riguroso y orientado a la implementación en la agroindustria.

Si bien la ecología microbiana y, en particular, las comunidades rizosféricas constituyen un campo amplio y fundamental en la comprensión de la salud del suelo y de los agroecosistemas, el propósito de este libro no es abordarlas de manera exhaustiva. En cambio, se centra en socializar experiencias de investigación orientadas a la biodiversidad microbiana edáfica con aplicaciones prácticas en sistemas productivos específicos y en el desarrollo de bioinsumos. Así, más que profundizar en los aspectos teóricos de la ecología microbiana, el libro busca resaltar el potencial de la microbiota del suelo y de los procesos biotecnológicos asociados como alternativas para promover la sostenibilidad, resiliencia y productividad en contextos agrícolas y agroforestales concretos.

Sinopsis del libro

A lo largo de los seis capítulos que componen este libro, investigadores y estudiantes interesados en la biotecnología agrícola encontrarán el papel fundamental de los microorganismos del suelo en la sanidad y productividad de cuatro sistemas agrícolas y agroforestales: cacao (*Theobroma cacao*), cebolla (*Allium cepa*), aguacate (*Persea americana*) y Melina (*Gmelina arborea*). En el primer capítulo, UNIMINUTO presenta parte de los resultados de investigación relacionados con el estudio de los sistemas agroforestales y su biodiversidad asociada. En este capítulo se analizan las interacciones entre los microorganismos del suelo y los sistemas agroforestales de cacao, mostrando cómo la biodiversidad microbiana está estrechamente relacionada con la salud del suelo y la productividad del cultivo y por lo tanto desempeñan un papel fundamental en la sostenibilidad de los sistemas. Con interesantes estudios en el municipio de Pauna, Boyacá, se demuestra que los sistemas agroforestales (SAF) de cacao presentan una gran diversidad en cuanto a su composición vegetal, especialmente, en el dosel arbóreo, y el manejo agronómico, lo que influye en la estructura y función de los microorganismos edáficos.

Los microorganismos del suelo, incluyendo bacterias, hongos y Actinobacterias, contribuyen significativamente a la fertilidad del suelo al participar en procesos como la mineralización de materia orgánica, la fijación de nitrógeno y la solubilización de fosfatos. En los SAF de cacao de Pauna, la composición del dosel arbóreo y el nivel de sombra regulan la disponibilidad

de humedad y nutrientes, creando microhábitats que favorecen distintos grupos microbianos. Los estudios realizados en estos sistemas agroforestales han demostrado que la diversidad de microorganismos edáficos es mayor en parcelas con mayor biodiversidad arriba del suelo. Esto se debe a que la presencia de una mayor heterogeneidad vegetal proporciona una fuente constante de materia orgánica y compuestos alelopáticos beneficiosos.

Como idea relevante, el capítulo sugiere que la biodiversidad microbiana del suelo en los SAF de cacao en Pauna-Boyacá varía según el tipo de manejo y la composición del dosel arbóreo. La promoción de sistemas agroforestales diversificados podría mejorar la salud del suelo y la productividad sostenible del cultivo de cacao en la región.

Un segundo capítulo, desarrollado por ZENKINOKO SAS, está dedicado a diversidad de hongos micorrícicos que forman asociaciones simbióticas con las raíces de las plantas, jugando un papel fundamental en la salud y productividad de los cultivos de cebolla (*Allium cepa*). Estas relaciones simbióticas permiten a las plantas acceder a nutrientes esenciales, como fósforo y nitrógeno, que de otro modo serían difíciles de obtener. La presencia y diversidad de micorrizas en el suelo pueden tener un impacto significativo en el nivel de deterioro del cultivo de cebolla, influenciando factores como la resistencia a enfermedades, la absorción de nutrientes y la tolerancia a condiciones adversas.

Diversos estudios han demostrado que una mayor diversidad de micorrizas está asociada con una mejor salud del suelo y una mayor resistencia de las plantas a patógenos y enfermedades. En el caso del cultivo de cebolla, la presencia de diversas especies de micorrizas puede mejorar la capacidad de la planta para resistir enfermedades fúngicas y bacterianas, como la pudrición basal y la mancha púrpura. Estas enfermedades suelen ser responsables del deterioro significativo del cultivo y pueden afectar gravemente el rendimiento y la calidad de la cosecha.

Además, la diversidad de micorrizas contribuye a la estructura del suelo y a la retención de humedad, lo que es especialmente importante en condiciones de sequía. Las cebollas cultivadas en suelos con una alta diversidad de micorrizas suelen tener un sistema radicular más robusto, lo que les permite absorber agua y nutrientes de manera más eficiente. Esto no solo mejora el crecimiento de las plantas, sino que también reduce el riesgo de deterioro debido a la falta de agua y a condiciones ambientales extremas.

Lo relevante en este capítulo, es que la salud del suelo, evaluada mediante diferentes parámetros fisicoquímicos en cultivos de cebolla de bulbo, está más relacionada con la composición que la riqueza de especies de HMA. A su vez, los hallazgos en este capítulo sugieren que la diversidad de micorrizas es un factor clave en la reducción del deterioro de los cultivos de cebolla. Así, podría hipotetizarse que la implementación de prácticas agrícolas que promuevan la diversidad microbiana en el suelo, como la rotación de cultivos y la reducción del uso de insumos de síntesis química, puede ayudar a mejorar la salud del suelo y, en última instancia, la productividad y calidad de los cultivos de cebolla.

El tercer capítulo está dedicado a uno de los principales productos de la canasta de exportación de Colombia: el aguacate, un cultivo que, junto con el café, el banano y las flores, impulsa el crecimiento del sector agropecuario en el país. En este apartado, se presentan los avances en investigación desarrollados por la Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB), abordando los principales desafíos fitosanitarios que enfrenta el cultivo en la actualidad. Se hace especial énfasis en el uso de alternativas biotecnológicas dentro del manejo integrado del cultivo, ofreciendo soluciones sostenibles y eficientes que contribuyan a mejorar la productividad, la calidad y la sostenibilidad del aguacate, al tiempo que responden a los retos presentes y futuros de la agricultura.

Este capítulo además describe una síntesis de los procesos de bioprospección, selección y formulación de microorganismos benéficos para el desarrollo de herramientas biotecnológicas aplicadas al manejo fitosanitario del aguacate. A partir de estudios en laboratorio, vivero y campo, se evaluó el potencial de distintas formulaciones para prevenir y controlar enfermedades en la poscosecha, destacando su viabilidad como alternativa a los productos convencionales y su posible incorporación en protocolos de manejo en cosecha y poscosecha, con criterios más sostenibles.

El cuarto capítulo del libro expone los hallazgos del equipo de investigadores de la Universidad del Tolima. Se muestran resultados de la interacción de *Gmelina arborea* con el suelo y los microorganismos. Las interacciones de los microorganismos rizosféricos con *G. arborea*, un árbol de rápido crecimiento y notable en la reforestación, ofrecen un modelo experimental valioso en diferentes entornos: laboratorio, vivero y campo.

En el laboratorio, los estudios se centran en el aislamiento de los microorganismos solubilizadores de fosfato que habitan la rizosfera de *G. arborea*. Estos incluyen bacterias promotoras del crecimiento (PGPR) y hongos, que mejoran la absorción de nutrientes. La investigación en un entorno controlado permite una comprensión detallada de las interacciones bioquímicas y moleculares entre la planta y los microorganismos. En el vivero, las plántulas de *G. arborea* se inoculan con estos microorganismos para observar su impacto en el crecimiento y desarrollo temprano. La adición de PGPR a las plántulas ha demostrado aumentar la tasa de germinación, el vigor de la planta y proporcionando una base sólida para futuras plantaciones en el campo.

En el campo, los indicadores de las interacciones de *G. arborea* compite con éxito por espacio con *B. pertusa*, aunque puede haber una reducción del forraje debido a la interceptación de RAFA en el dosel, lo cual afecta la producción de materia seca bajo el dosel. Sin embargo, las interacciones del componente leñoso sobre la salud del suelo son evidentes, las cuales pueden cuantificarse mediante la determinación de parámetros físicos y microbiológicos, y sus asociaciones, que dan cuenta de las ventajas de incorporar los árboles en las pasturas.

Finalmente, en el quinto y último capítulo se recogen las principales funciones microbianas expuestas a través de los capítulos producto de investigación de cada uno de los sistemas, cacao (*Theobroma cacao*), cebolla (*Allium cepa*), aguacate (*Persea americana*) y *Gmelina arborea*. En este capítulo se explora como desde una perspectiva biotecnológica se puede contribuir a la sostenibilidad rural haciendo un análisis desde las comunidades microbianas que sustentan diferentes funciones ecosistémicas y su aplicación en cada uno de los cultivos trabajados a lo largo del libro. Asimismo, se integran de forma sintética y a manera de conclusión los principales aportes de cada capítulo y se presentan reflexiones complementarias que profundizan en la relación de los resultados con la salud del suelo, la biodiversidad y la sostenibilidad de los agroecosistemas.

A lo largo del libro, se muestra como las alternativas biotecnológicas podrían ofrecer soluciones sostenibles y efectivas que pueden mejorar la productividad, la calidad y la sostenibilidad de diferentes cultivos y sistemas de producción, respondiendo a los desafíos actuales y futuros de la agricultura. Algo para resaltar, es que las experiencias presentadas apuntan a la importancia

de los procesos de investigación, desarrollo e innovación en la bioprospección aplicada al desarrollo agroindustrial, las cuales bien podrían proyectarse a otros cultivos, pero que han sido fundamentalmente presentados desde los sistemas agrícolas y agropecuarios de cacao, aguacate, cebolla y melina, como objetivo de estudio en el proyecto financiado por Minciencias.

Esperamos que esta obra sirva como punto de partida para nuevas investigaciones sobre la importancia de la interacción de los microorganismos del suelo con los sistemas radicales de las plantas, y su incidencia en la salud del suelo, y fomente el interés en la aplicación de microorganismos en la restauración y manejo sostenible de sistemas de producción agropecuarios.

Referencias

- Akinpelu, O. A., Olaleye, O., & Fagbola, O. (2023). The soil organic matter decomposers: A bibliometric analysis. *International Journal of Agriculture and Environmental Research*, 9(4), 511-536.
- Al Raish, S. M., Sourani, O. M., & Abu-Elsaoud, A. M. (2025). Plant Growth-Promoting Microorganisms as Biocontrol Agents: Mechanisms, Challenges, and Future Prospects. *Applied Microbiology*, 5(2), 44. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol5020044>
- Altieri M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1-3), 19-31. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00028-6)
- Anduaem, B., & Seid, A. (2021). The role of green biotechnology through genetic engineering for climate change mitigation and adaptation, and for food security: current challenges and future perspectives. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 24(1), 1-11.
- Arbeláez, N. (2025). La biodiversidad es la última oportunidad de Colombia de ser una potencia mundial. La silla vacía. <https://www.lasillavacia.com/silla-amazonia/la-biodiversidad-es-la-ultima-oportunidad-de-colombia-de-ser-una-potencia-mundial/>
- Asadu, C. O., Ike, I. S., Onu, C. E., Egbuna, S. O., Onoh, M., Mbah, G. O., & Eze, C. N. (2020). Investigation of the influence of biofertilizer synthesized using microbial inoculums on the growth performance

- of two agricultural crops. *Biotechnology Reports*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00493>
- Asghar, W., Onur, W., Akça, H., Tarf, H., Kataoka, R., & Turgay, O. (2022). Chapter 1 - Alternative strategies to synthetic chemical fertilizers: revitalization of soil quality for sustainable agriculture using organic-based approaches. In H. B. Singh & A. Vaishnav (Eds.), *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*.
- Banerjee, S., & van der Heijden MGA. (2023). Soil microbiomes and one health. *Nat Rev Microbiol*. 21(1), 6-20. doi: 10.1038/s41579-022-00779-w. Epub 2022 Aug 23. PMID: 35999468.
- Barrios Latorre, S. A., Sadowska, V., & Chongtham, I. R. (2023). Perspectives on agroecological transition: the case of Guachetá municipality, Colombia. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 47(3), 382–412. <https://doi.org/10.1080/21683565.2022.2163449>
- Belmin, R., Malézieux, E., Basset-Mens, C., Martin, T., Mottes, C., Della Rossa, P., ... & Le Bellec, F. (2022). Designing agroecological systems across scales: A new analytical framework. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(1), <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-021-00741-9>
- Benton, T. G., Bieg, C., Harwatt, H., Pudasaini, R., & Wellesley, L. (2021). *Food system impacts on biodiversity loss. Three levers for food system transformation in support of nature*. Chatham House, London. <https://www.ciwf.com/media/7443948/food-system-impacts-on-biodiversity-loss-feb-2021.pdf>
- Bezner Kerr, R., Postigo, J. C., Smith, P., Cowie, A., Singh, P. K., Rivera-Ferre, M., Tirado-von der Pahlen, M. C., Campbell, D., & Neufeldt, H. (2023). Agroecology as a transformative approach to tackle climatic, food, and ecosystemic crises. *Current Opinion in Sustainability*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2023.101275>
- Bhowmick, K., Roy, D., Rana, D., Ghosh, A., Sadhukhan, S., Chakraborty, M., ... & Ghosh, T. K. (2024). Potential microbes in bioremediation: A review. *Materials Today Sustainability*, 101032.
- Bula, A. (2020). Importancia de la agricultura en el desarrollo socio-económico. *Informes del Observatorio UNR N° 50*.

- Bullor, L., Braude, H., Monzón, J., Cotes Prado, A. M., Casavola, V., Carbajal, N., & Risopoulos, J. (2024). *Bioinputs: investment opportunities in Latin America*. Food & Agriculture Org.
- Campos, R., Pathak, E., El-Borai, F., Stuart, R., Gutiérrez, C., Rodríguez, J., Graham, J., & Duncan, L. (2013). Geospatial patterns of soil properties and the biological control potential of entomopathogenic nematodes in Florida citrus groves. *Soil Biology and Biochemistry*, 66, 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.07.011>
- Carvalho, F. P. (2017). Pesticides, environment, and food safety. *Food and Energy Security*, 6(2), 48–60. <https://doi.org/10.1002/fes3.108>
- Casas, A., Parra, F., Blancas Vázquez, J., Rangel, S., Vallejo, M., Figueredo, C., & Moreno, A. (2016). Origen de la domesticación y la agricultura: cómo y por qué. In A. Casas, J. Torres-Guevara, & F. Parra (Eds.), *Domesticación en el continente americano. Volumen 1. Manejo de biodiversidad y evolución dirigida por las culturas del Nuevo Mundo* (1st ed., Vol. 1).
- Chen, Q. Y., Lei, T. Z., Wu, Y. Q., Si, G. C., Xi, C. W., & Zhang, G. X. (2019). Comparison of soil organic matter transformation processes in different alpine ecosystems in the Qinghai-Tibet Plateau. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 124, 33–45. doi: 10.1029/2018jg004599
- Convención sobre la Diversidad Biológica. (1992). *Convenio sobre la diversidad biológica*. Naciones Unidas. Adoptado en Río de Janeiro el 5 de junio de 1992. <https://www.cbd.int/convention/text/>
- da Silva Medina, G., Rotondo, R., & Rodríguez, G. R. (2024). Innovations in agricultural bio-inputs: commercial products developed in Argentina and Brazil. *Sustainability*, 16(7), 2763.
- Delgado, M. (2010). El sistema agroalimentario globalizado: imperios alimentarios y degradación social y ecológica. *Revista de Economía Crítica*, 10, 32–61.
- Dhuldhaj, U. P., Singh, R., & Singh, V. K. (2022). Pesticide contamination in agro-ecosystems: toxicity, impacts, and bio-based management strategies. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), 9243–9270. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24381-y>
- Dubey, P. K., Singh, A., Merah, O., & Abhilash, P. C. (2022). Managing agroecosystems for food and nutrition security. *Current Research in*

- Environmental Sustainability*, 4, 100127. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666049022000056>
- Dumont, A. M., Wartenberg, A. C., & Baret, P. V. (2021). Bridging the gap between the agroecological ideal and its implementation into practice. *A review. Agronomy for sustainable development*, 41(3), 32. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00666-3>
- Fouzia, A., Allaoua, S., Hafsa, C., & Mostefa, G. (2015). Plant growth promoting and antagonistic traits of indigenous fluorescent *Pseudomonas* spp. isolated from wheat rhizosphere and *A. halimus* endosphere. *Eur. Sci. J.* 11, 129–148.
- García, V., Hernández, F., Coria, A., García, S., Sánchez, E., Rojas, L., & Daneshvar, H. (2018). Fertigation: Nutrition, Stimulation and Bioprotection of the Root in High Performance Plants, 7(4), 88. <https://doi.org/10.3390/plants7040088>
- Gliessman, S. R., Rosado, F. J., Guadarrama, C., Jedlicka, J., Cohn, A., Méndez, V. E., Cohen, R., Trujillo, L., Bacon, C., & Jaffe, R. (2007). Agroecología: promoviendo una transición hacia la sostenibilidad. *Ecosistemas*, 16(1).
- Grammenou, A., Petropoulos, S. A., Thalassinou, G., Rinklebe, J., Shaheen, S. M., & Antoniadis, V. (2023). Biostimulants in the soil–plant interface: agro-environmental implications—a review. *Earth Systems and Environment*, 7(3), 583–600.
- Guzmán, A. M., Arjona, A. D. C., Ruiz, R. R., & Ruiz, E. (2024). Uso de bacterias y hongos entomopatógenos para el control de insectos plaga en la agricultura a pequeña escala. *Bioagrocencias*, 17(1).
- Hammoud, R., Tognin, S., Smythe, M., Gibbons, J., Davidson, N., Bakolis, I., & Mechelli, A. (2024). Smartphone-based ecological momentary assessment reveals an incremental association between natural diversity and mental wellbeing. *Sci Rep* 14, 7051. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55940-7>
- Harlan, J. R. (1971). Agricultural Origins: Centers and Noncenters. *Science*, 174(4008), 468–474. <https://doi.org/10.1126/science.174.4008.468>
- Hartmann, M., Six, J. (2023). Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nat Rev Earth Environ* 4, 4–18. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>

- Hernández, M., & Villaseñor, A. (2014). La calidad en el sistema agroalimentario globalizado. *Revista Mexicana de Sociología*, 76(4). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-25032014000400002
- Hernández, E. (2013). La conservación de la biodiversidad en los sistemas agrarios. *Ecosistemas Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 22(1), 1–4.
- Hertel, T. W., & Lobell, D. B. (2014). Agricultural adaptation to climate change in rich and poor countries: Current modeling practice and potential for empirical contributions. *Energy Economics*. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.04.014>
- Grupo de Alto Nivel de Expertos en seguridad alimentaria y nutrición. (2019). *Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition. A report by the High-Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security*. https://www.fao.org/fileadmin/templates/cfs/HLPE/reports/HLPE_Report_14_ES.pdf
- Illescas, L., Cruz, A., & Uribe, M. (2020). Sistemas agroforestales tradicionales desde la perspectiva del “Buen Vivir.” *Revista de Geografía Agrícola*, 65, 29–43. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2020.65.02>
- INECC. (2022). Agricultura de conservación y agroecología como soluciones basadas en la naturaleza ante el cambio climático.
- Jansson, J. K., & Hofmockel, K. S. (2020). Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 18(1), 35–46. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0265-7>
- Keesstra, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Tiftonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J. N., Pachepsky, Y., van der Putten, W. H., Bardgett, R. D., Moolenaar, S., Mol, G., Jansen, B., & Fresco, L. O. (2016). The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *SOIL*, 2(2), 111–128. <https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>
- Kerr, R. B., Madsen, S., Stüber, M., Liebert, J., Enloe, S., Borghino, N., ... & Wezel, A. (2021). Can agroecology improve food security and nutrition? A review. *Global Food Security*, 29, 100540. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100540>

- Khashi u Rahman, M., Saati, Z., & García, P. (2025). Intercropping of non-leguminous crops improves soil biochemistry and crop productivity: a meta-analysis. *New Phytol.* <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.70037>
- Kumar, H., Bajpai, V. K., Dubey, R. C., Maheshwari, D. K., & Kang, S. C. (2010). Wilt disease management and enhancement of growth and yield of *Cajanus cajan* (L) var. Manak by bacterial combinations amended with chemical fertilizer. *Crop protection*, 29(6), 591-598.
- Lassaletta, L., & Rovira, J. V. (2005). Agricultura industrial y cambio global. *El Ecologista*, 45.
- Leggett, Leland, Kellar & Epp. (2011). Formulation of microbial biocontrol agents – an industrial perspective. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 33:2, 101-107
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature reviews. Earth & environment*, 1(10), 544–553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Leippert, F., Darmaun, M., Bernoux, M., & Mpheshea, M. (2020). The potential of agroecology to build climate-resilient livelihoods and food systems. Rome. *FAO and Biovision*. <https://doi.org/10.4060/cb0438en>
- Lira, T. (2023). Especies de *Bacillus* como alternativa de control biológico contra el agente causal de la gomosis en lima persa (*Citrus x latifolia tanaka*) de la región citrícola Joachín. [Tesis de grado]. Instituto Tecnológico Superior de Tierra Blanca.
- Liu, S., Sun, Y., Shi, F., Liu, Y., Wang, F., Dong, S., & Li, M. (2022). Composition and Diversity of Soil Microbial Community Associated With Land Use Types in the Agro–Pastoral Area in the Upper Yellow River Basin. *Front. Plant Sci.* 13:819661. doi: 10.3389/fpls.2022.819661
- Madende, M., & Hayes, M. (2020). Fish by-product use as biostimulants: An overview of the current state of the art, including relevant legislation and regulations within the EU and USA. *Molecules*, 25(5), 1122.
- Mahmood, S., Daur, I., Al-Solaimani, S.G., Ahmad, S., Madkour, M.H., Yasir, M., Hirt, H., Ali, S., & Ali, Z. (2016). Plant growth promoting rhizobacteria and silicon synergistically enhance salinity tolerance of mung bean. *Front. Plant Sci.* 7, 876.

- Martínez, R. (2005). Crisis del modelo convencional global: caso agrario. *Revista Comunicación*, 14(1), 59–69.
- Mitra, B., Chowdhury, A. R., Dey, P., Hazra, K. K., Sinha, A. K., Hossain, A., & Meena, R. S. (2021). Use of agrochemicals in agriculture: alarming issues and solutions. *Input use efficiency for food and environmental security*, 85-122.
- Nicholls, C., Altieri, M. A., & Vazquez, L. (2016). Agroecology: principles for the conversion and redesign of farming systems. *J Ecosys Ecograph* S5: 010. <https://doi.org/10.4172/2157-7625.S5-010>
- Olagunju, T. E. (2015). Impacts of Human-induced Deforestation, Forest Degradation and Fragmentation on Food Security. *New York Science Journal*, 8(1), 4–16.
- Olalde, V., & Aguilera, L. I. (1998). Microorganismos y biodiversidad. *Terra Latinoamericana*, 16(3), 289-292. Redalyc, <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57316312>
- Oliveira, M. A., de Machado, G. A., Pereira, M. S., & Pantoja, M. J. (2024). Inovações na agricultura orgânica: revisão sistemática e bibliométrica de literatura. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 62(2). <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2022.269069>
- Organización de las Naciones Unidas. (2022). Efectos de plaguicidas y fertilizantes sobre el medio ambiente y la salud y formas de reducirlos Imaginando un mundo sin riesgos químicos - Resumen para encargados de la formulación de políticas.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2013). *Guidelines for the preparation of the Country Reports for The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture*. <https://www.fao.org/3/ca1120en/CA1120EN.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). *Status of the World's Soil Resources Main report*. <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2017). Carbono Orgánico del Suelo: el Potencial Oculto (F. and A. O. of the U. N. R. (FAO), Ed.). www.fao.org/publications

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos.*
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2021). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7654es>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2022a). *The State of the World's Forests 2022 (resilient and sustainable economies. Forest pathways for green recovery and building inclusive, Ed.).* FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9360en>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2022b). *La biodiversidad para la alimentación y la agricultura - preguntas frecuentes.* V.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *FAO Biodiversity* https://www.fao.org/biodiversity/overview/en/?utm_source=twitter&utm_medium=social+media&utm_campaign=fao
- Orozco-Mosqueda MDC, Santoyo G, Glick BR. (2023). Recent Advances in the Bacterial Phytohormone Modulation of Plant Growth. *Plants* (Basel). Jan 30;12(3):606. doi: 10.3390/plants12030606. PMID: 36771689; PMCID: PMC9921776.
- Pacheco, P., Mo, K., Dudley, N., Shapiro, A., Aguilar, N., Ling, P. Y., Anderson, C., & Marx, A. (2021). *Deforestation fronts: Drivers and responses in a changing world.* WWF.
- Pérez, F., Alías, C., Bellogín, R., DelCerro, P., Espuny, M., Jiménez, I., López, F.J., Olero, F.J., & Cubo, T. (2014). Plant growth promotion in cereal and leguminous agricultural important plants: From microorganism capacities to crop production. *Microbiol. Res.*, 169, 325–336.
- Perfecto, I., Vandermeer, J., & Wright, A. (2019). *Nature's matrix: linking agriculture, biodiversity conservation and food sovereignty.* Routledge.
- Prajapati, K., Sharma, M., & Modi, H. (2013). Growth promoting effect of potassium solubilizing microorganisms on *Abelmoscus esculantus*. *Int. J. Agric. Sci.*, 3, 181–188.

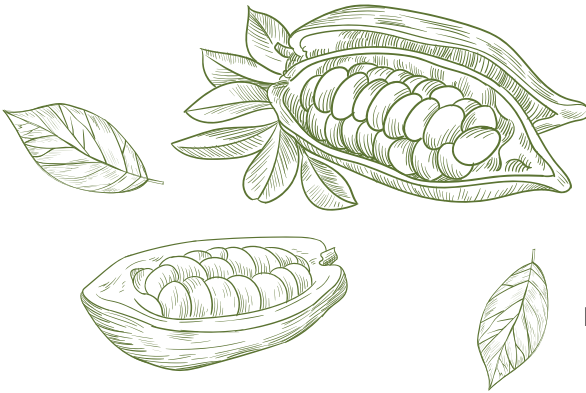
- Rampersad, C., Geto, T., Samuel, T., Abebe, M., Gómez, M. S., Pironon, S., ... & Borrell, J. S. (2023). Indigenous crop diversity maintained despite the introduction of major global crops in an African centre of agrobiodiversity. *Plants, People, Planet*, 5(6), 985-996. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10407>
- Reyes, S. E., & Cano, D. M. (2022). Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 24(1), 53-64. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.328>
- Reyes, P., Oliveros, J., Racedo, C., & Bernal, A. (2024). Uso de la biodiversidad para mejorar la agricultura: tendencias en la investigación y el mercado en biofertilizantes en Colombia. *Naturaleza y Sociedad. Desafíos Medioambientales*, 10, 185-211. <https://doi.org/10.53010/nys10.06>
- Rezanka, T., Palyzová, A., & Sigler, K. (2018). Isolation and identification of siderophores produced by cyanobacteria. *Folia Microbiol.*, 63, 569-579.
- Riaz, U., Murtaza, G., Anum, W., Samreen, T., Sarfraz, M., & Nazir, M. Z. (2021). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) as biofertilizers and biopesticides. *Microbiota and biofertilizers: a sustainable continuum for plant and soil health*, 181-196.
- Rocha, T. M., Marcelino, P. R. F., Da Costa, R. A. M., Rubio, D., Barbosa, F. G., & da Silva, S. S. (2024). Agricultural bioinputs obtained by solid-state fermentation: From production in biorefineries to sustainable agriculture. *Sustainability*, 16(3), 1076.
- Ruiz, C. A., Hurtado, S. L., Carrillo, Y. P., & Parrado, C. A. (2019). What we know and do not know about tropical agroforestry systems and multiple ecosystem services provision. A review. *Ecosistemas*, 28(3), 26-35. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1697>
- Sánchez, M. (2018). *Aportes de la biología del suelo a la agroecología* (L. Rodríguez, Ed.). Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira.
- Santoro, M. V., Bogino, P.C., Nocelli, N., Cappellari, L.R., Giordano, W.F., & Banchio, E. (2016). Analysis of plant growth-promoting effects of fluorescent *Pseudomonas* strains isolated from *Mentha piperita* rhizosphere and effects of their volatile organic compounds on essential oil composition. *Front. Microbiol.*, 7, 198824.

- Sarandón, S. J. (2020). El papel de la agricultura en la transformación social-ecológica de América Latina. *Cuadernos de la Transformación*. Friedrich-Ebert-Stiftung (FES).
- Sarandón, S. J., & Flores, C. C. (2014). *Agroecología: Bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables*. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata
- Saynes, V., Etchevers, J. D., Alvarado, L. O., & Paz, F. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana*, 34, 83–96.
- Scalone, M. (2010). Introducción al enfoque de sistemas en agricultura y su aplicación para el desarrollo de sistemas de producción sostenibles. Recuperado de: <https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2012/5922/Capitulo4.pdf>
- Shostak, S. (2023). Food and inequality. *Annual review of sociology*, 49(1), 359-378. <https://doi.org/10.1146/annurev-soc-031021-112747>
- Smith, B. D. (1998). *The emergence of agriculture*. WA Freenman.
- Starobinsky, G., Monzón, J., Di Marzo, E. & Braude, E. (2021). Bioinsumos para la agricultura que demandan esfuerzos de investigación y desarrollo. Capacidades existentes y estrategia de política pública para impulsar su desarrollo en Argentina. Documentos de Trabajo del CCE N° 17. Consejo para el Cambio Estructural - Ministerio de Desarrollo Productivo de la Nación.
- Sun, B., Bai, Z., Bao, L., Xue, L., Zhang, S., Wei, Y., ... & Zhuang, X. (2020). *Bacillus subtilis* biofertilizer mitigating agricultural ammonia emission and shifting soil nitrogen cycling microbiomes. *Environment International*, 144, 105989. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105989>.
- Thrall, P. H., Bever, J. D., & Burdon, J. J. (2010). Evolutionary change in agriculture: the past, present and future. *Evolutionary Applications*, 3(5–6), 405–408. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2010.00155.x>
- Tubiello, F. N., Córdor, R. D., Salvatore, M., Piersante, A., Federici, S., Ferrara, A., Rossi, S., Flammioni, A., Cardenas, P., Biancalani, R., Jacobs, H., Prasula, P., & Proserpi, P. (2015). *Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en la agricultura. Un manual para abordar los requisitos de los datos para los países en desarrollo*. ONU.

- Vejan, P., Abdullah, R., Khadiran, T., Ismail, S., & Nasrulhaq, A. (2016). Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability—a review. *Molecules*, 21(5), 573.
- Verhulst, N., François, I., & Govaerts, B. (2015). Agricultura de conservación, ¿mejora la calidad del suelo a fin de obtener sistemas de producción sustentables? Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, (CIMMYT).
- Vinchira, D., & Moreno, N. (2019). Control biológico: Camino a la agricultura moderna. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 21(1), 2-5. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n1.80860>.
- von Cossel, M., Scordia, D., Altieri, M. A., & Gresta, F. (2025). Spotlight on agroecological cropping practices to improve the resilience of farming systems: A qualitative review of meta-analytic studies. *Frontiers in Agronomy*, 7, Article 123456. <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.123456>
- Wall, D., Nielsen, U., & Six, J. (2015). Soil biodiversity and human health. *Nature*, 528, 69–76. <https://doi.org/10.1038/nature15744>
- Wang, J., Zhen, J., Hu, W., Chen, S., Lizaga, I., Zeraatpisheh, M., & Yang, X. (2023). Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(3), 429–454. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.002>
- Xiong, C., & Lu, Y. (2022). Microbiomes in agroecosystem: Diversity, function and assembly mechanisms. *Environmental microbiology reports*, 14(6), 833–849. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.13126>
- Yadav, N., & Yadav, A. N. (2019). Biodegradation of biphenyl compounds by soil microbiomes. *Biodivers Int J*, 3(2), 37-40.

CAPÍTULO 1

Biodiversidad de microorganismos edáficos asociada a diferentes tipologías de sistemas agroforestales de cacao en Pauna - Boyacá



Valentina Curcio Cruz¹

Nubia Carolina Higuera Mora¹

Raúl Hernando Posada Almanza^{1,2}

<https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5.cap1>

Resumen

Los árboles de sombra en los cultivos de cacao en sistemas agroforestales (SAF) influyen en una mayor biodiversidad funcional y albergan microorganismos claves para procesos como el secuestro de carbono, fertilidad suelo, mitigación climática y control biológico. Esta investigación analizó diferentes grupos microbianos y parámetros fisicoquímicos en suelos de SAF de cacao con diferente biodiversidad arbórea en Pauna - Boyacá. Se identificó una comunidad microbiana abundante con hongos filamentosos, levaduras, bacterias fijadoras de nitrógeno, bacterias mesófilas aerobias, solubilizadores de fosfato de calcio y actinobacterias similares en ambos sistemas. En cuanto a los parámetros fisicoquímicos del suelo, la mayoría fueron similares en ambos sistemas con alta y baja biodiversidad arbórea, aunque

1 Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO. Rectoría Bogotá. Grupo de Investigación Agroeco y Gestión ambiental.

2 Zenkinoko S.A.S

el hierro, manganeso y nitrógeno nítrico fueron mayores en alta biodiversidad, mientras que CIC, azufre, boro, potasio y calcio lo fueron en baja biodiversidad. Los suelos obtenidos de SAF cacaoteros del municipio de Pauna poseen una microbiota edáfica abundante y con una tendencia a que una mayor biodiversidad arbórea del cultivo se asocie a una mayor cantidad de microorganismos en el suelo; y aunque la biodiversidad arbórea no modifica drásticamente las propiedades físicas y químicas del suelo, sí puede influir levemente en la disponibilidad específica de algunos nutrientes, como hierro, manganeso, carbono orgánico, fósforo y nitrógeno. Se concluye que los grupos microbianos, como las bacterias mesófilas, solubilizadoras de fosfato de calcio, hongos y actinobacterias, pueden ser menos influenciados por la composición de especies arbóreas que por otras condiciones edáficas o prácticas de manejo agrícola.

Palabras Claves: Diversidad biológica, Grupos funcionales microbianos, *Theobroma cacao*, Agroforestería

Abstract

Shade trees in cocoa crops within agroforestry systems (AFS) enhance functional biodiversity and support key microorganisms essential for carbon sequestration, improving soil fertility, mitigating climate change, and promoting biological control. This study analyzed microbial groups and physicochemical parameters in the soils of cocoa AFS with varying levels of tree biodiversity in Pauna, Boyacá. An abundant microbial community was identified, including filamentous fungi, yeasts, nitrogen-fixing bacteria, aerobic mesophilic bacteria, calcium phosphate-solubilizing bacteria, and actinobacteria. The composition of these microbial groups was similar in both high- and low-biodiversity systems. Regarding soil physicochemical parameters, most were consistent between the high- and low-tree biodiversity systems. However, iron, manganese, and nitrate nitrogen levels were higher in the high biodiversity system, while CEC, sulfur, boron, potassium, and calcium levels were higher in the low biodiversity system. Soils from cacao agroforestry systems in Pauna exhibit a rich edaphic microbiota, with a tendency for higher tree biodiversity to correlate with greater microbial abundance in the soil. Although tree biodiversity does not significantly alter the physical and chemical properties of the soil, it may have a slight impact on the availability of certain nutrients, such as iron, manganese, organic carbon, phosphorus, and nitrogen. In conclusion, microbial groups like mesophilic bacteria, calcium phosphate-solubilizing bacteria, fungi, and actinobacteria appear to be less influenced by the composition of tree species than by other edaphic conditions or agricultural management practices.

Keywords: Biodiversity, Microbial functional groups, *Theobroma cacao*, Agroforestry

Cómo citar este capítulo

Curcio Cruz, V., Higuera Mora, N. C., & Posada Almanza, R. H. (2025). Biodiversidad de microorganismos edáficos asociada a diferentes tipologías de sistemas agroforestales de cacao en Pauna - Boyacá. En N. Higuera Mora & R. Posada Almanza (Eds.), *Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales* (pp. 55–86). Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO. <https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5.cap1>

Introducción

La diversidad biológica comprende la variabilidad entre los organismos vivos presentes en un ecosistema, y se define como la riqueza y abundancia en un espacio y tiempo determinado (Mo et al. 2022). Los sistemas de producción agrícola pueden mantener una mayor o menor biodiversidad al utilizar prácticas con diferentes grados de intensificación, pasando de sistemas con alta biodiversidad hasta monocultivos caracterizados por baja biodiversidad. Al respecto, los sistemas agroecológicos y agroforestales son reconocidos por promover la biodiversidad tanto de insectos como de aves (Suárez et al. 2022) y hongos (Arévalo–Gardini et al. 2020).

En el caso particular de los sistemas agroforestales (SAF) cacaoteros, provenientes de estructuras ecológicas altamente biodiversas, como las condiciones selváticas, permiten incorporar variadas plantas y árboles con diferentes usos en el sistema productivo, aportando al sistema biomasa, alimentos y protección de suelos, así, los SAF cacaoteros llegan a ser una alternativa sostenible a los sistemas agrícolas intensivos modernos. Sin embargo, por una parte, diversos estudios han sugerido que para el establecimiento del cultivo es deseable acompañar el cacao de otros cultivos y plantas forestales que provean sombra, pero una vez establecido, el aumento en el rendimiento de la cosecha de cacao se da cuando la sombra (i.e., árboles maderables, frutales, plátano y otros) se suprime; situación que conlleva a un aumento en el estrés fisiológico del cultivo establecido, repercutiendo en la susceptibilidad a plagas y enfermedades; y en la dependencia de insumos externos como insecticidas y fertilizantes (Espinosa & Ríos, 2016; Tschardtke et al. 2011).

Los sistemas de producción de cacao en SAF son considerados una alternativa para el desarrollo al proveer atributos de sostenibilidad, debido a que protegen la biodiversidad y facilitan el secuestro de carbono, la fertilidad suelo, la mitigación climática, el control biológico, la eficiencia energética y la seguridad alimentaria (Tschardtke et al. 2011; Gama-Rodrigues et al. 2021).

Por otra parte, el suelo es la base principal que promueve la biodiversidad de fauna y flora, siendo indispensables en la función, organización y composición de cada ecosistema. El suelo debe facilitar el desarrollo de la raíz, y asegurar que se provean los nutrientes necesarios, el agua y el aire, los cuales permiten el desarrollo óptimo de la planta (Unda, 2019; Primavesi,

1982). Las plantas tienen un importante impacto en el hábitat del suelo y en la biodiversidad acompañante que reside en el suelo debido a que sus raíces estructuran la física, química y biota del suelo (Geisen et al. 2019).

Entre la biodiversidad presente en el suelo y la asociada a los cultivos y por ende a los SAF, se encuentran microorganismos que se encargan de desempeñar funciones vitales como regular los ciclos de los nutrientes, la dinámica de la materia orgánica del suelo, captación de carbono, emisiones de gases de efecto invernadero, modificar la estructura del suelo, aumentar la absorción de nutrientes, entre otros (FAO, 2015).

Los microorganismos promotores del crecimiento vegetal actúan por medio de mecanismos directos como el aumento en el acceso a nutrientes y mecanismos indirectos como resistencia al estrés abiótico. Las bacterias mesófilas aerobias son microorganismos que se desarrollan a una temperatura ambiental promedio del trópico y se encuentran en el suelo, plantas y animales; con diferentes funciones en cada organismo (Alarcón Camacho et al. 2019).

El fósforo es un macronutriente necesario para el crecimiento y desarrollo de las plantas, pero en la mayoría de los suelos tropicales el fósforo disponible es deficiente por lo que debe ser ingresado de manera externa (Das et al. 2019). Algunas bacterias son promotoras para solubilizar fosfatos ya que tienen la capacidad de transformar el fósforo insoluble en formas asimilables para las plantas contribuyendo a su disponibilidad en el suelo, así mismo permite sustituir o minimizar el uso de insumos de síntesis química (Ibáñez y Gutiérrez, 2020). De igual forma, el nitrógeno es un macronutriente necesario para el desarrollo de la planta, la absorción de este nutriente se puede proveer por medio de bacterias con la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico y hacerlo asimilable, además proveen estabilidad al suelo, contribuyen al establecimiento y el crecimiento aéreo de la planta (Liang et al. 2023). Por su parte, las actinobacterias conforman un grupo de microorganismos que cumplen funciones como la descomposición de la materia orgánica y contribuyen al ciclo del carbono mediante la producción de enzimas (Parada et al. 2017).

Los cultivos de cacao se caracterizan por los altos niveles de variabilidad en la producción de cada árbol, es decir, puede presentar cambios constantes en producción. Se ha encontrado que los parámetros de rendimientos se correlacionan con ciertas concentraciones de nutrientes en diferentes horizontes del suelo (Rofner et al. 2019). En este sentido, la diversidad

microbiana alojada en el suelo mejora los rendimientos y la estabilidad de la productividad a través del aprovisionamiento de nutrientes dentro del ciclo de estos y facilitando la disponibilidad de agua, teniendo en cuenta que la planta de cacao es un cultivo perenne y la presencia constante de sus raíces en el suelo permiten mayor número de interacciones con la rizosfera (Schmidt et al. 2022).

En el proyecto de investigación “Biofertilizantes en cacao con diferentes sistemas de producción como alternativa para el restablecimiento de las funciones ecosistémicas del suelo” se identificaron la importancia, funciones y relación mutualista de los microorganismos del suelo junto con la biodiversidad planeada (cultivos) con el objetivo de potenciar productos y procesos en sistemas agroforestales y agrícolas que promuevan la productividad agropecuaria y la restauración de suelos degradados. Este capítulo es parte de los productos asociados al proyecto en mención y tiene por objetivo determinar la relación entre la biodiversidad arbórea de los SAF, las características fisicoquímicas del suelo y la abundancia de microorganismos presentes en el sistema edáfico en cultivos de cacao en el municipio de Pauna - Boyacá. Como pregunta de investigación se planteó si las diferencias en la diversidad arbórea de los SAF con cacao en Pauna - Boyacá generan diferencias en las características fisicoquímicas y microbiológicas de los suelos cacaoteros. Como hipótesis se plantea que una mayor biodiversidad arbórea contribuye con una mayor biodiversidad de grupos microbianos y una mayor calidad de suelo en términos de los parámetros fisicoquímicos encontrados.

Existen relaciones positivas entre la biodiversidad del suelo y las funciones generadas en los ecosistemas, las cuales incluyen la regulación de los ciclos de nutrientes y la provisión de estos, descontaminación, transformación, descomposición de materia orgánica y el control de patógenos entre otros, por lo que una mayor biodiversidad en el suelo puede considerarse como un factor clave para mejorar la productividad y sostenibilidad de los agroecosistemas (Jiao et al. 2022). Sin embargo, esta diversidad biológica en suelo varía dependiendo de diferentes factores como la diversidad de vegetación y las prácticas asociadas a los cultivos (Thiele-Bruhn et al. 2012). Por lo tanto, el presente estudio busca asociar los índices de biodiversidad arbórea de las parcelas de cacao en Pauna - Boyacá con grupos microbianos como bacterias mesófilas aerobias, bacterias solubilizadoras de fosfato de calcio, bacterias fijadoras de nitrógeno, hongos y actinobacterias y, con las características fisicoquímicas del suelo.

Metodología

Área de estudio

El estudio fue realizado en la zona productora de cacao del municipio de Pauna, Boyacá, Colombia. Este municipio se localiza a 130 kilómetros de Tunja y a 38 kilómetros de Chiquinquirá; tiene una extensión aproximada de 25143.58 hectáreas, a una altura de 1250 msnm (Municipio de Pauna, 2015). Se evaluaron ocho fincas con sistemas agroforestales de cacao con condiciones contrastantes de diversidad de árboles, seleccionando cuatro con mayor biodiversidad y cuatro con menor diversidad arbórea.

Fase previa: selección de cultivos de cacao por biodiversidad de árboles acompañantes

Durante el desarrollo del proyecto anteriormente ejecutado “Biodiversidad como estrategia de mitigación para sistemas de producción de cacao asociados a altos niveles de cadmio (Cd) en la zona occidental de Boyacá”, financiado por la Pontificia Universidad Javeriana, se hizo una identificación de la biodiversidad de árboles acompañantes del cultivo de cacao en 32 fincas con producción de cacao en los municipios de Pauna y Coper - Boyacá (Cobos et al. 2022). En cada finca, se establecieron parcelas de 900 m² en los sistemas agroforestales con cacao y se realizó una caracterización florística y de la estructura de la plantación, identificando *in situ* las especies de árboles presentes dentro de los agroecosistemas evaluados; esto permitió hacer un recuento del número de árboles, sus especies y el uso de cada especie en cada parcela evaluada. Derivados de estos resultados de la caracterización y en conjunto con las variables: riqueza, índices de biodiversidad de Shannon y Simpson, altura de los árboles y usos asociados (madera, leña, alimentación, mixto), se seleccionaron para la presente investigación los cuatro cultivos de cacao categorizados con la más alta biodiversidad (B2, B10, B12, B13) y los cuatro con más baja biodiversidad (B8, B11, B16, B18) ubicados en Pauna - Boyacá.

Fase de campo

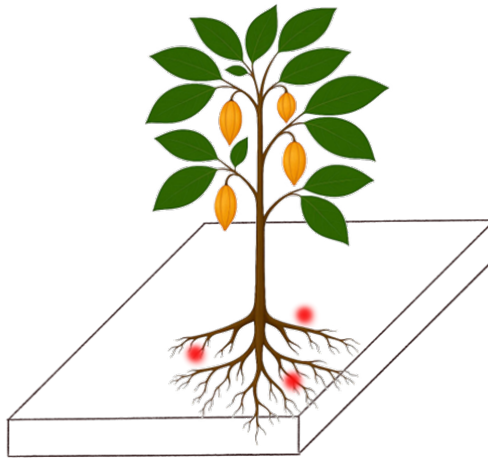
Muestreo de suelos

En cada uno de los cultivos de cacao de las fincas seleccionadas, se eligieron 3 árboles saludables, en producción activa y en una etapa fenológica similar.

Se realizó un muestreo donde se tomaron tres submuestras de suelo alrededor del tronco de cada árbol de cacao, a una distancia entre 20–50 cm de la planta seleccionada y a una profundidad entre 0–10 cm, con la precaución de siempre recolectar suelo rizosférico (Figura 1.1). Las tres submuestras se homogenizaron para obtener una muestra compuesta por planta de un peso aproximado a 500 g. Las muestras fueron guardadas en neveras portátiles a una temperatura de 4° C hasta su procesamiento en laboratorio.

Figura 1.1

Distribución de los puntos de muestreo alrededor de las plantas de cacao



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de campo (2025).

Fase de laboratorio

Las muestras recolectadas, fueron unificadas a una por cada finca para completar 8 muestras, y posteriormente fueron sometidas a análisis fisicoquímico y microbiológico en el laboratorio de análisis de suelos de Fundases Minuto de Dios (MD). Los parámetros fisicoquímicos evaluados se describen en la Tabla 1.2. Además, fueron realizados conteos microbiológicos para los siguientes grupos de microorganismos: bacterias mesófilas aerobias, bacterias solubilizadoras de fosfato de calcio, bacterias fijadoras de nitrógeno, hongos y actinobacterias, mediante conteo de las unidades formadoras de colonia/g de suelo. En la Tabla 1.3 se describen los métodos utilizados para la cuantificación de cada grupo microbiano.

Tabla 1.2*Análisis fisicoquímicos realizados a las muestras de suelo*

VARIABLES	MÉTODO	TÉCNICA
Calcio intercambiable (meq/100 g).	NTC 5349	Extracción Acetato Amonio / Abs atómica.
Potasio intercambiable (meq/100 g).	NTC 5349	Extracción Acetato Amonio / Abs atómica.
Sodio intercambiable (meq/100 g).	NTC 5349/ SM 3111 B	Extracción Acetato Amonio / Abs atómica.
Densidad aparente (g/cm ³).	Métodos Analíticos GAC	Gravimétrica.
Acidez intercambiable (meq/100 g).	NTC 5263	Volumétrico.
Aluminio intercambiable (meq/100 g).	NTC 5263	Volumétrico.
Azufre disponible (mg/kg).	NTC 5402	Extracción Fosfato de Calcio / Turbidimetría.
Boro disponible (mg/kg).	NTC 5404	Extracción Fosfato de calcio / Colorimétrico.
Capacidad de intercambio catiónico (meq/100 g).	NTC 5268	Volumétrico.
Carbono orgánico (%).	NTC 5403	Walkley - Black / colorimétrico.
Cobre (mg/kg).	NTC 5526/ SM 3111 B	Extracción Mehlich / Absorción atómica.
Conductividad eléctrica (dS/m).	NTC 5596	Electrometría.
Fósforo disponible (mg/kg).	NTC 5350	Bray II / Colorimétrico.
Hierro (mg/kg).	NTC 5526/ SM 3111 B	Extracción Mehlich / Absorción atómica.
Humedad higroscópica (%).	Métodos Analíticos IGAC	Gravimétrica.
Manganeso (mg/kg).	NTC 5526/ SM 3111 B	Extracción Mehlich / Absorción atómica.
Materia orgánica (%).	NTC 5403	Cálculo matemático.
Nitrógeno amoniacal (mg/kg).	NTC 5595	Volumétrico KJELDHAL.
Nitrógeno nítrico (mg/kg).	NTC 5595	Volumétrico KJELDHAL.
Zinc (mg/kg).	NTC 5526/ SM 3111 B	Extracción Mehlich / Absorción atómica.
Nitrógeno total (%).	NTC 5889	Volumétrico KJELDHAL.

Tabla 1.2 Continuación**Análisis fisicoquímicos realizados a las muestras de suelo**

VARIABLES	MÉTODO	TÉCNICA
Magnesio intercambiable (meq/100 g).	NTC 5349/ SM 3111 B	Extracción Acetato Amonio / Abs atómica.
pH.	NTC 5264	Electrometría.
Textura (%).	ASTM D 422-63	----

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.3**Análisis microbiológicos realizados a las muestras de suelo**

VARIABLES	MÉTODO
Conteo de bacterias mesófilas aerobias (UFC/g).	NTC 4519:2009
Conteo de hongos (Filamentosos y levaduras) - (UFC/g).	Norma interna para la enumeración de mohos y levaduras.
Conteo de microorganismos solubilizadores de fosfato de calcio (UFC/g).	Norma interna para la enumeración de Microorganismos solubilizadores de fosfato.
Conteo de bacterias fijadoras de nitrógeno (UFC/g).	Norma interna para la enumeración de Bacterias fijadoras de nitrógeno.
Conteo de actinobacterias UFC/g).	Norma interna para la enumeración de Actinobacterias.

Fuente: Elaboración propia

Fase de análisis de datos

Los sistemas agroforestales, especies vegetales y usos se organizaron en tablas por categorías, indicando especies vegetales, frecuencia y uso para comparaciones directas. Para comparar el efecto del tipo de agroecosistemas de alta y baja biodiversidad, sobre la biota, se compararon sus diversidades (Shannon & Simpson - Tabla 1.4), los conteos microbiológicos (Bacterias mesófilas aerobias “BMA”, microorganismos solubilizadoras de fosfato de calcio “MSF”, bacterias fijadoras de nitrógeno “BFN”, hongos y actinobacterias) y los resultados de pruebas fisicoquímicas edáficas por medio de pruebas T debido al tamaño muestral y considerarse pruebas pareadas de variables numéricas.

Para evidenciar la posible relación entre la biodiversidad de los cultivos y la fisicoquímica del suelo, se realizó un análisis de correlación de Pearson entre los parámetros de diversidad obtenidos (Riqueza de especies e índices de Shannon & Simpson) y las variables fisicoquímicas (magnesio intercambiable, pH, sodio intercambiable, nitrógeno amoniacal, fósforo disponible, materia orgánica, nitrógeno total, azufre disponible, carbono orgánico, acidez intercambiable, densidad aparente, nitrógeno nítrico, manganeso y potasio intercambiable). Así mismo se realizaron correlaciones de Pearson entre los mismos parámetros de diversidad (Índices de Simpson, Shannon y Riqueza) y las variables microbiológicas.

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de componentes principales (APC) para conocer la relación de la abundancia de las bacterias, hongos y actinobacterias, con las variables fisicoquímicas y con la clasificación de las fincas de alta y baja biodiversidad. Todos los análisis se realizaron con Infostat 2020 y Rstudio.

Tabla 1.4

Variables de biodiversidad evaluadas en cultivos de cacao

Variable	Descripción	Análisis de datos
Shannon-Weaver	Riqueza y la abundancia relativa de especies de árboles de más de 10 cm de diámetro presentes en la parcela	$H = \sum_{i=1}^s (P_i \ln P_i)$ Donde: H: índice de diversidad Shannon-Weaver. s: número de especies (riqueza de las especies). Pi: proporción del número total de individuos en la especie i. Magurran, A. E. (2004).
Simpson	Número de especies presentes con más de 10 cm de diámetro y la abundancia relativa de cada una de esas especies	$D = \sum \left(\frac{ni(ni - 1)}{N(N - 1)} \right)$ Donde: ni es el número de individuos de la especie N es el número total de individuos de todas las especies. Magurran, A. E. (2004).

Fuente: Elaboración propia

Resultados y discusión

Características generales de la biodiversidad acompañante en los cultivos de cacao en SAF

La agroforestería se reconoce como una estrategia para conservar y mejorar la biodiversidad en paisajes agrícolas (Udawatta et al. 2019). Los cultivos de cacao en Boyacá están establecidos como sistemas agroforestales y se caracterizan por ser biodiversos, donde la planta de cacao está acompañada de diferentes especies arbóreas (Cobos et al. 2022; Contreras, 2017). Sin embargo, en la zona se encuentran diferencias en la biodiversidad entre los SAF con cacao. De acuerdo con la caracterización botánica realizada previamente, se identificaron especies predominantes en cada una de las fincas además de los principales usos de los árboles acompañantes. Para las fincas de alta biodiversidad se encontraron entre 9 - 11 especies de árboles y un total de entre 18 y 41 árboles por parcela principalmente con usos alimenticios, leña, maderable y conservación mientras las fincas de baja biodiversidad tuvieron entre 2 - 5 especies de árboles con entre 2 y 5 árboles en cada parcela, principalmente con usos para leña y como maderable (Tablas 1.5 y 1.6).

Tabla 1.5

Caracterización de especies arbóreas en SAF de cacao con alta biodiversidad

SAF	Especies vegetales (No)	Identificación de especies vegetales*	Usos asociados
B2	11	<i>Alchornea c.f. discolor</i> (1)	Leña
		<i>Annona muricata</i> (1)	Maderable
		<i>Bixa orellana</i> (1)	Conservación
		<i>Cariniana c.f. pyriformis</i> (1)	Alimento
		<i>Caucho</i> (1)	
		<i>Cedrela</i> sp. - Cedro (9)	
		<i>Jacaranda caucana</i> - Caco (6)	
		<i>Citrus x limonia</i> (1)	
		<i>Myrsine guianensis</i> (2)	
		<i>Tabebuia rosea</i> (4)	
		<i>Triplaris cumingiana</i> (2)	

Tabla 1.5 Continuación

Caracterización de especies arbóreas en SAF de cacao con alta biodiversidad

SAF	Especies vegetales (No)	Identificación de especies vegetales*	Usos asociados
B10	10	<i>Alchornea c.f. discolor</i> - Tinto (1) <i>Cecropia</i> sp. - Yarumo (1) <i>Citrus reticulata</i> (1) <i>Cordia alliodora</i> - Nogal cafetero (4). <i>Handroanthus</i> sp. (1) <i>Jacaranda caucana</i> (1) <i>Juglans neotropica</i> (3) <i>Mangifera indica</i> (1) <i>Myrsine guianensis</i> (4) <i>Tectona grandis</i> - Teca (1) Total árboles: 18	Leña Maderable Conservación
B12	10	<i>Alchornea c.f. discolor</i> (3) <i>Anacardium excelsum</i> (3) <i>Bactris gasipaes</i> - Chontaduro (5) <i>Cecropia</i> sp. (1) <i>Cedrela odorata</i> L. (2) <i>Cedrela</i> sp.(9) <i>Citrus x aurantium</i> - Naranja(3) <i>Jacaranda caucana</i> - Caco (4) <i>Inga c.f. cayennensis</i> - Guamo (1) <i>Myrsine guianensis</i> - Cucharero (4) Total: 34 árboles	Leña Maderable Alimento
B13	9	<i>Bactris gasipaes</i> - Chontaduro (3) <i>Cedrela odorata</i> L. (2) <i>Cedrela</i> (4) Mandarina (<i>Citrus reticulata</i>) (8) <i>Citrus x aurantium</i> - Naranja (1) <i>Jacaranda caucana</i> - Caco (3) Marfil (18) <i>Myrsine guianensis</i> (1) <i>Ficus c.f. americana</i> - Lechero (1) Total: 41 árboles	Leña Maderable Conservación Barrera Alimento

Nota: Entre paréntesis se encuentra la abundancia de cada especie.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.6**Caracterización de especies arbóreas en SAF de cacao con baja biodiversidad**

SAF	Especies vegetales (No)	Identificación de especies vegetales*	Usos
B8	5	<i>Juglans neotropica</i> - Nogal (5) <i>Gmelina arborea</i> - Melina (1) <i>Citrus reticulata</i> - Mandarina(2) <i>Myrsine guianensis</i> - Cucharero(1) <i>Cedrela</i> sp - Cedro (2) Total árboles: 11	Leña Maderable Alimento
B11	2	<i>Bactris gasipaes</i> - Chontaduro (1) <i>Tabebuia rosea</i> - Flor morado (3) Total árboles: 4	Maderable Alimento
B16	2	<i>Annona muricata</i> (1) <i>Citrus reticulata</i> (1) Total árboles: 2	Alimento
B18	2	<i>Tectona grandis</i> - Teca (10) <i>Gmelina arborea</i> - Melina (1) Total árboles: 11	Maderable Leña

Nota: Entre paréntesis se encuentra la abundancia de cada especie.

Fuente: Elaboración propia

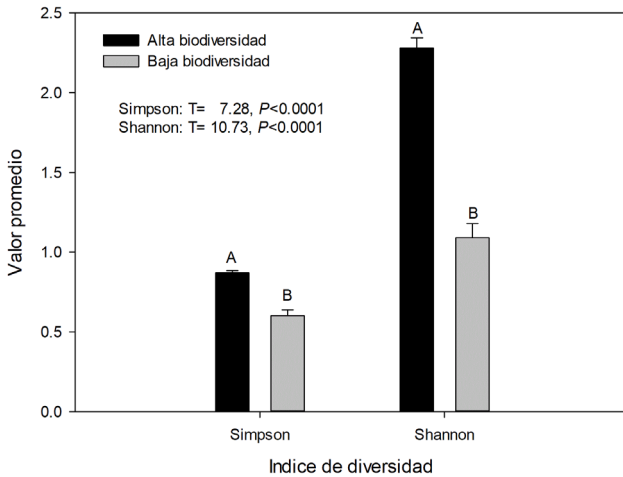
De acuerdo con las tipologías de alta (9–11) y baja (2–5) biodiversidad previamente establecidas para la zona de estudio, la diversidad arbórea de acuerdo a Simpson y Shannon es completamente diferente, conformando grupos separados ($P < 0.0001$), y por lo tanto confirmando que las fincas pueden ser categorizadas como de alta y baja biodiversidad (Figura 1.2). Estos resultados permitieron en una segunda fase de esta investigación, estudiar la relación de la biodiversidad arbórea con las características microbiológicas y fisicoquímicas de cada tipo de SAF.

Estudios en cacao muestran un impacto positivo de la agroforestería en la diversidad microbiana del suelo favoreciendo el número de géneros bacterianos en comparación incluso con bosques nativos (Nahon et al. 2024). Los sistemas agroforestales aumentan el almacenamiento de carbono y nitrógeno en el suelo y mejoran la diversidad funcional microbiana, mejorando la descomposición de la materia orgánica y la actividad metabólica (Nahon

et al. 2024; Buyer et al. 2017). De acuerdo con Souza et al. (2024), los SAF estimulan la selección de taxones microbianos, modificando la estructura de las comunidades microbianas tanto de hongos como de bacterias debido a que la mezcla de diferentes árboles puede proporcionar hábitats para numerosas especies ya que la exudación radicular de diferentes plantas puede proporcionar diversidad de sustratos importantes para el crecimiento microbiano, lo que lleva a un aumento en la microbiota edáfica. Por lo que se esperaría que a una mayor abundancia y diversidad de árboles en los sistemas agroforestales de Pauna se vea reflejado en una mayor diversidad y/o abundancia de microbiota edáfica, dadas las diferencias estadísticas en la abundancia y diversidad de árboles acompañantes entre las parcelas de cacao analizadas.

Figura 1.2

Comparación de los índices de diversidad de Simpson y Shannon considerando la clasificación de fincas de alta y baja biodiversidad. Comparación de medias con prueba T



Fuente: Elaboración propia

Algunos estudios con sistemas contrastantes como Sistemas agroforestales y pastizales han demostrado que el establecimiento de sistemas agroforestales mejora significativamente la fertilidad del suelo, demostrando una alta capacidad de restauración de la calidad, mejorando el contenido de carbono orgánico en el suelo y de cationes intercambiables como Ca y Mg, favoreciendo

la formación de macroagregados, y mejorando la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Rodríguez-Suarez et al. 2021; Buyer et al. 2017). Estos beneficios que se derivan de los sistemas agroforestales son particularmente valiosos en regiones tropicales, donde la tendencia al agotamiento de nutrientes es mucho mayor debido a la alta lixiviación y el rápido proceso de meteorización química, estos suelos a menudo muy ácidos, pobres en reservas de fósforo y nitrógeno, están sujetos a pérdida acelerada de nutrientes durante las lluvias intensas típicas del trópico (Tinoco-Jaramillo et al. 2024; Kihara et al. 2023; Bayala & Nair, 2020).

En este contexto, las prácticas agroforestales pueden mitigar eficazmente dicho agotamiento, al mejorar la retención de nutrientes y aumentar la materia orgánica del suelo. De hecho, algunos meta-análisis han demostrado que, comparado con sistemas agrícolas convencionales, las prácticas agroforestales pueden aumentar en un 20 % o más el contenido total de nitrógeno, fósforo disponible y carbono orgánico del suelo (Kuyah et al. 2019; Muchane et al. 2020).

Características fisicoquímicas en los suelos de los cultivos de cacao en los SAF de alta y baja biodiversidad

Aunque la mayoría de los parámetros fisicoquímicos de los suelos cacaoteros son estadísticamente similares entre sistemas de alta y baja diversidad arbórea, se presentaron diferencias en algunos parámetros (Tabla 1.7). A pesar de no encontrarse diferencias estadísticas, el contenido de hierro, manganeso y nitrógeno nítrico fueron más altos en los cultivos con alta biodiversidad, mientras que la capacidad de intercambio catiónico (CIC), los contenidos de azufre, boro, potasio y calcio mostraron valores superiores en los cultivos con baja biodiversidad. Estas variaciones sugieren que en SAF, aunque la biodiversidad arbórea no crea contrastes fuertes en las propiedades físicas y químicas del suelo, puede influir en la disponibilidad específica de algunos nutrientes por la composición química de la hojarasca y los exudados radiculares, la cual posiblemente afecta la actividad microbiana y las interacciones planta-suelo-microorganismo (Furey & Tilman, 2021; Rivera et al, 2025)

De manera general, los suelos cacaoteros de la región tienden a ser ácidos (4.8-5.2), facilitando la expresión de una mayor diversidad de hongos (Kang et al. 2021; Liu et al. 2018). Son suelos con un alto contenido de materia y

carbono orgánico para clima cálido (8.5–9.2% y 5–5.3%, respectivamente), lo que favorece la fertilidad y estructura del suelo. Al tener una relación C/N entre 10 y 12 (Tabla 1.7) se considera adecuada para la mayoría de los suelos agrícolas ya que favorece la actividad microbiana, la mineralización de nutrientes y la disponibilidad de nitrógeno para las plantas en el trópico (Zinn et al. 2018); ésta última se confirma con los niveles de nitrógeno total (0.45–0.48%) y amoniacal (26.7–28.3 mg/kg) sugiriendo una adecuada reserva de este nutriente.

En cuanto a la textura y estructura del suelo, son principalmente franco-arcillosos lo que permite buena capacidad de intercambio catiónico y retención de humedad, además de presentar una densidad aparente baja, lo que en conjunto indica una buena estructura y porosidad en el suelo. Sin embargo, los suelos tienen bajos contenidos de fósforo disponible (2.2 a 2.5 mg/kg), estos resultados posiblemente podrían estar asociados al pH ácido del suelo, que hace que el fósforo se encuentre inmovilizado y no disponible para las plantas (Tabla 1.7).

Tabla 1.7

Valores promedio +/- error estándar de los parámetros evaluados en campo, discriminados en alta y baja diversidad

Parámetro	Diversidad		T (P-value)
	Alta	Baja	
Calcio intercambiable (meq/100 g)	2.61 +/- 0.39	3.29+/-0.88	-0.71 (0.4879)
Potasio intercambiable (meq/100 g)	0.22 +/- 0.03	0.36+/-0.04	-2.60 (0.0167)
Sodio intercambiable (meq/100 g)	0.08 +/-0	0.08 +/-0	-1 (0.3270)
Magnesio intercambiable (meq/100 g)	1 +/-0.17	1.04 +/-0.21	-0.16 (0.8723)
Densidad aparente (g/cm ³)	0.76 +/-0.07	0.76 +/-0.07	-0.05 (0.9075)
Acidez intercambiable (meq/100 g)	1.01 +/-0.19	1.42+/-0.33	-1.04 (0.3117)
Aluminio intercambiable (meq/100 g)	0.75 +/-0.23	1.06+/-0.26	-0.89 (0.3840)
Azufre disponible (mg/kg)	1.72 +/-0.58	3.84 +/-0.87	-2 (0.0588)
Boro disponible (mg/kg)	0.15 +/-0.02	0.21 +/-0.03	-2.02 (0.0558)
CIC (meq/100 g)	6.76 +/-2.14	11.17 +/-3.65	-1.02 (0.3195)

Tabla 1.7 Continuación

Valores promedio +/- error estándar de los parámetros evaluados en campo, discriminados en alta y baja diversidad

Parámetro	Diversidad		T (P-value)
	Alta	Baja	
Carbono orgánico (%)	4.97 +/-0.49	5.36 +/-0.46	-0.59 (0.5645)
Cobre (mg/kg)	1.03 +/-0.02	1.17 +/-0.12	-1.15 (0.2753)
Conductividad eléctrica (ds/m)	0.03 +/-0	0.03 +/-0	0.04 (0.9686)
Fósforo disponible (mg/kg)	2.19 +/-0.35	2.47 +/-0.44	0.50 (0.6217)
Hierro (mg/kg)	38.82 +/-14.89	10.91 +/-3.96	1.81 (0.0973)
Humedad higroscópica (%)	2.92 +/-0.19	3.66 +/-0.6	-1.19 (0.2559)
Manganeso (mg/kg)	21.83 +/-3.99	14.26 +/-2.61	1.61 (0.1214)
Materia orgánica (%)	8.55 +/-0.84	9.24 +/-0.8	-0.60 (0.5574)
Nitrógeno amoniacal (mg/kg)	26.78 +/-1.56	28.34 +/-1.64	-0.69 (0.5004)
Nitrógeno nítrico (mg/kg)	2.24 +/-0.38	1.48 +/-0.36	1.44 (0.1646)
Zinc (mg/kg)	5.64 +/-1.01	6.7 +/-1.81	-0.49 (0.6269)
Nitrógeno total (%)	0.45 +/-0.02	0.48 +/-0.02	-0.93 (0.3637)
Arena (%)	19.57 +/-1.74	31.48 +/-5.52	-2.06 (0.0604)
Arcilla (%)	30.47 +/-0.89	30.22 +/-1.58	0.14 (0.8916)
Lim (%)	50.27 +/-1.42	38.24 +/-4.82	2.39 (0.0324)
Bacterias mesófilas aerobias (UFC/g)	60592727.27 +/-35038500.62	17296666.67 +/- 12415580.35	1.16 (0.2668)
Hongos filamentosos y levaduras (UFC/g)	1635.45 +/-274	1304.17 +/- 138.86	1.08 (0.2978)
Solubilizadores de P (UFC/g).	74463.64 +/- 26542.53	55516.67 +/- 21895.48	0.55 (0.5852)
Bacterias fijadoras de nitrógeno (UFC/g)	2876363.64 +/- 681600.09	2225083.33 +/- 895832.23	0.57 (0.5744)
Actinobacterias (UFC/g)	63090.91 +/- 18187.14	243683.33 +/- 223346.73	-1.81 (0.4374)
pH	4.95 +/-0.15	5.12 +/-0.23	-0.62(0.5406)

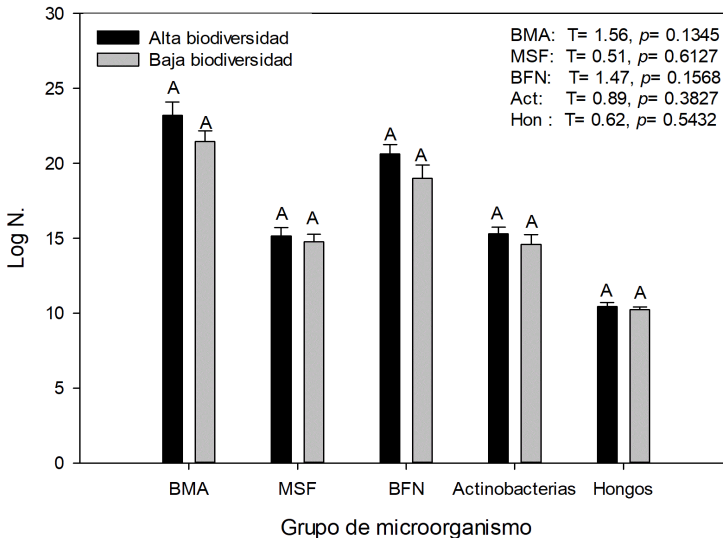
Fuente: Elaboración propia

Características microbiológicas en los suelos de los cultivos de cacao en los SAF de alta y baja biodiversidad

Los análisis microbiológicos de los suelos en suelos cacaoteros de Pauna muestran una comunidad con diferencias en abundancias (BMA>BFN>Actinobacterias>MSF>hongos) en proporciones 26500:1735:104:44:1 (Tabla 1.7, Figura 1.3) en la cual, una gran proporción de BMA (cerca del 90%), no cumplen una función dentro de las potencialidades evaluadas. Es necesario hacer claridad que muchos de los microorganismos promotores de crecimiento vegetal pueden pertenecer a varias de estas categorías, por ejemplo, actinobacterias, como *Frankia* spp y *Streptomyces* spp, pueden ser simultáneamente fijadoras de N, solubilizadores de fosfatos y además mesófilos aerobios (Nouioui et al. 2019; Narayanasamy et al. 2020)., Así mismo, hongos como *Fusarium* spp y *Penicillium* spp pueden ser solubilizadores de fosfatos (Tang et al. 2023), lo cual depende de la dotación genética de cada organismo.

Figura 1.3

Concentración de microorganismos (hongos y bacterias) en sistemas de alta y baja biodiversidad. Comparación de medias con prueba T



Nota: Nomenclatura: BMA= bacterias mesófilas aerobias, MSF= microorganismos solubilizadores de fosfatos, BFN= bacterias fijadoras de nitrógeno.

Fuente: Elaboración propia

Es de resaltar la gran proporción de fijadores de nitrógeno dentro de la microbiota bacteriana (6.5%), un buen indicativo del adecuado manejo sin importar si el sistema es de baja o alta biodiversidad vegetal. La proporción de hongos como es de esperarse es el más bajo en un sistema productivo saludable y donde no priman los procesos de descomposición de materia orgánica recalcitrante (Mehar & Sundaramoorth, 2018). Así mismo, indica que la inmensa mayoría de los solubilizadores de fosfatos corresponde a bacterias.

Investigaciones sobre microorganismos asociados a la rizosfera de cacao, han encontrado que generalmente las actinobacterias es uno de los taxones bacterianos más abundantes, con abundancias relativas del 35.4% en sistemas agroforestales, en comparación 17.7% en el intercultivo de caucho-cacao, y 11.73% en el sistema agroforestal Cabruca, siendo estos últimos los sistemas con mayor diversidad de especies arbóreas (Nahon et al. 2024), en el caso de Pauna-Boyacá, solo alcanzaron el 0.4%, mostrando un desacuerdo con las afirmaciones previas. Investigaciones como la de Nahon et al. (2024), que realizaron análisis metagenómicos en la rizosfera de diferentes sistemas de cultivo de cacao —incluidos sistemas agroforestales y cabrucas en Brasil—, evidenciaron cambios en la composición de las comunidades microbianas activas. Estos cambios podrían deberse al predominio de otros grupos bacterianos (~90% en el caso de Pauna), como las Proteobacterias lo que a su vez podría explicar una menor abundancia relativa de actinobacterias en dichos entornos.

Las actinobacterias presentes en el suelo cumplen funciones fundamentales para la agricultura sostenible, como promoción del crecimiento vegetal mediante la fijación de nitrógeno, solubilización de fósforo y producción de fitohormonas (Mitra et al. 2022). Participan en la descomposición de la materia orgánica, lo que facilita el ciclaje de nutrientes y el secuestro de carbono en los suelos, además actúan como agentes de biocontrol, debido a la capacidad de producir una amplia variedad de antibióticos y enzimas extracelulares los cuales permiten la inhibición de crecimiento de algunos patógenos; tienen la capacidad de colonizar superficies radiculares de las plantas por lo que han sido reconocidos como antagonistas potenciales de hongos fitopatógenos (Pérez-Corral et al. 2015; Nahon et al. 2024; Mitra et al. 2022). Además, ayudan a las plantas a tolerar estreses bióticos y abióticos, mejorando la salud y fertilidad del suelo (Mitra et al. 2022). Estudios como el de Sousa et al. (2024) identificaron especies de actinobacterias como *Agromyces indicus*, *Microbacterium testaceum*, *Leifsonia aquatica* y *Leifsonia poae* asociados a la rizosfera de cacao.

En el caso de Pauna, para todos los tipos de microorganismos evaluados, los hongos filamentosos/levaduras y bacterias fijadoras de nitrógeno tuvieron abundancias similares entre los sistemas de alta y baja biodiversidad arbórea, sin diferencias estadísticas (Figura 1.3), lo que sugiere que las poblaciones de estos grupos microbianos se mantienen estables, independientemente de la biodiversidad arbórea (Tablas 1.5 y 1.6, Figuras 1.2 y 1.3).

Los sistemas agroforestales en comparación con monocultivos, tierras agrícolas y algunos bosques, albergan una mayor diversidad de flora, fauna y microbiota del suelo. Se ha observado una abundancia mayor de hongos micorrízicos arbusculares, bacterias y actividades enzimáticas (Udawatta et al. 2019). Esta mayor diversidad se relaciona con una rizosfera rica en exudados radiculares. Estos compuestos orgánicos como aminoácidos, ácidos orgánicos, azúcares, y compuestos fenólicos y volátiles, actúan como señales que moldean la abundancia y composición de las comunidades microbianas del suelo, incluyendo bacterias promotoras del crecimiento y hongos benéficos. En conjunto, estos procesos mejoran la salud del suelo, el crecimiento vegetal y la tolerancia a estreses tanto bióticos como abióticos (Maitra et al. 2024). Por otro lado, los sistemas agroforestales, se relacionan con una mayor cantidad de materia orgánica, condiciones microclimáticas favorables de temperatura y humedad, y una mejor estructura del suelo, que permiten crear nichos diversos para los microorganismos, condiciones asociadas a una mayor cobertura arbórea (Udawatta et al. 2019). Por lo tanto, los sistemas agroforestales con cacao en la zona de estudio, independientemente su diversidad sobre el suelo (alta o baja) pueden estar favoreciendo las condiciones para el establecimiento de comunidades microbianas en el suelo, lo que promueve un suelo más saludable y biodiverso, en términos de tener mejores y más estables propiedades físicas, químicas y biológicas, permitiendo una mayor productividad agrícola de manera sostenible y proporcionar servicios ecosistémicos esenciales, lo que a su vez mejora la resiliencia, productividad y salud del cultivo de cacao (Schmidt et al. 2022; Rodríguez-Suarez et al. 2018). La interacción entre la microbiota del suelo y las plantas de cacao contribuye a la tolerancia al estrés abiótico, como sequías, salinidad y variaciones climáticas, mediante mecanismos como la mejora en la absorción de nutrientes, el fortalecimiento del sistema radicular y la activación de respuestas fisiológicas en la planta (Troya & Pino, 2023). En los sistemas agroforestales de cacao estas interacciones simbióticas favorecen la disponibilidad y el ciclo de nutrientes al fomentar la fijación de nitrógeno

atmosférico, la solubilización de fósforo y la acción de hongos micorrízicos (Buyer et al. 2017; Ngaba et al. 2024).

Relación entre parámetros de biodiversidad de cultivo, microorganismos asociados y variables fisicoquímicas

Las comunidades microbianas tienen una relación directa con los nutrientes en el suelo (Adal, 2024); a su vez, han demostrado la capacidad de incrementar el crecimiento de las plantas por medio de la producción de enzimas y hormonas, además presentan mecanismos para liberar fosfatos, micronutrientes y fijación biológica de nitrógeno (Adal, 2024).

El análisis de correlación permitió identificar diferencias en el comportamiento de las variables fisicoquímicas entre los sistemas con alta y baja diversidad de especies arbóreas (Tabla 1.8). En las fincas con alta biodiversidad vegetal, se encontraron correlaciones positivas y estadísticamente significativas entre todas las medidas de diversidad y parámetros del suelo, como el calcio intercambiable, el potasio intercambiable, el nitrógeno total, mientras solo dos medidas de diversidad se correlacionaron con la humedad en fincas de alta biodiversidad; así mismo, de forma positiva entre todas las medidas de diversidad y el azufre disponible, el aluminio intercambiable y el contenido de hierro en sistemas de baja biodiversidad, lo que sugiere que en suelos con una mayor diversidad vegetal, ésta se relaciona positivamente con las mejores condiciones de calidad del suelos, asociadas con nutrientes clave (Zhao et al. 2022; Furey & Tilman, 2021) y retención de humedad (Tabla 1.8). Mientras en SAF de cacao con baja biodiversidad las concentraciones de azufre, aluminio y hierro en suelo se ven favorecidos por la descomposición de materia orgánica y la liberación de estos nutrientes al suelo en la medida que aumenta la diversidad arbórea (Birhane et al. 2019; Rivera et al. 2025).

En relación con los grupos microbiológicos funcionales estudiados, se evidenció que los sistemas con alta biodiversidad vegetal están asociados (mas no estadísticamente diferenciados) (Tabla 1.8), con una mayor cantidad de bacterias fijadoras de nitrógeno, posiblemente relacionado a la presencia de distintas especies de plantas que favorecen relaciones simbióticas. Estos resultados son corroborados por la literatura, donde se ha evidenciado que hay una mayor disponibilidad de nitrógeno en los sistemas de cultivo con mayor biodiversidad debido a la incorporación de árboles leguminosos en los sistemas, capaces de fijar N atmosférico por la simbiosis con las

bacterias fijadoras, accesible para los cultivos de cacao en SAF a través de la descomposición y mineralización de la hojarasca y las raíces de los árboles, procesos que son estimulados por el sombreado (Ngaba et al. 2024). Para los sistemas con mayor biodiversidad arbórea, fue encontrado el árbol *Inga c.f. cayennensis*, de la familia Fabaceae, con la capacidad de asociar bacterias fijadoras de nitrógeno en sus raíces. Aunque otras especies vegetales presentes en los sistemas de alta biodiversidad no fijan el nitrógeno directamente, especies como *Cecropia sp.*, *Anacardium excelsum* y *Myrsine guianensis* que proveen hojarasca y biomasa fácilmente descomponible que estimula la mineralización y mejora estructura del suelo mejorando ciclo de nutrientes, aunque sin fijar nitrógeno directamente (Alarcón et al. 2021; Suárez et al. 2024).

Tabla 1.8

Correlaciones de Pearson entre las variables fisicoquímicas y las variables de diversidad (Índices de Simpson, Shannon y Riqueza) de las fincas analizadas de acuerdo con su riqueza de especies arbóreas

	Simpson		Shannon		Riqueza	
	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja
Variables fisicoquímicas						
Calcio intercambiable (meq/100 g).	0.73*	-0.24	0.70*	-0.43	0.74*	-0.44
Potasio intercambiable (meq/100 g).	0.77*	0.20	0.75*	0.01	0.65*	-0.05
Sodio intercambiable (meq/100 g).	-0.06	-0.36	0.01	-0.28	-0.08	-0.18
Magnesio intercambiable (meq/100 g).	0.20	-0.15	0.18	-0.37	0.13	-0.41
Densidad aparente (g/cm ³).	-0.28	-0.13	-0.31	-0.03	-0.19	0.08
Acidez intercambiable (meq/100 g).	-0.34	0.43	-0.29	0.50	-0.48	0.46
Aluminio intercambiable (meq/100 g).	-0.58	0.65*	-0.55	0.74*	-0.66*	0.71*
Azufre disponible (mg/kg).	-0.26	0.74*	-0.22	0.63*	-0.34	0.52*
Boro disponible (mg/kg).	0.12	-0.15	0.12	-0.31	-0.01	-0.31
CIC (meq/100 g).	0.15	-0.18	0.13	-0.35	0.29	-0.33
Carbono orgánico (%).	0.23	0.51	0.29	0.38	0.19	0.33
Cobre (mg/kg).	-0.42	-0.51	-0.42	-0.33	-0.45	-0.25
Conductividad eléctrica (ds/m).	0.40	0.49	0.46	0.31	0.34	0.24

Tabla 1.8 Continuación

Correlaciones de Pearson entre las variables fisicoquímicas y las variables de diversidad (Índices de Simpson, Shannon y Riqueza) de las fincas analizadas de acuerdo con su riqueza de especies arbóreas

	Simpson		Shannon		Riqueza	
Fósforo disponible (mg/kg).	0.19	-0.26	0.22	-0.25	0.00	-0.14
Hierro (mg/kg).	0.39	0.61*	0.34	0.76*	0.35	0.8*
Humedad higroscópica (%).	0.64*	0.34	0.68*	0.17	0.51	0.01
Manganeso (mg/kg).	0.57	-0.58*	0.57	-0.74*	0.51	-0.78*
Materia orgánica (%).	0.23	0.51	0.29	0.39	0.19	0.33
Nitrógeno amoniacal (mg/kg).	-0.02	0.67*	-0.01	0.57	-0.11	0.47
Nitrógeno nítrico (mg/kg).	0.44	0.17	0.42	0.05	0.54	-0.03
Zinc (mg/kg).	0.56	-0.28	0.61*	-0.43	0.44	-0.41
Nitrógeno total (%).	0.72*	0.42	0.72*	0.36	0.7*	0.31
pH.	0.35	-0.36	0.29	-0.52	0.46	-0.51
Arena (%).	0.23	-0.50	0.27	-0.66*	0.19	-0.70*
Arcilla (%).	-0.59	0.08	-0.59	0.14	-0.59	0.22
Limos (%).	0.09	0.55	0.05	0.71*	0.18	0.72*

Nota: Correlaciones estadísticamente significativas ($P < 0.05$) en negrilla.

Fuente: Elaboración propia

Otros grupos microbianos analizados como las bacterias mesófilas, solubilizadores de fosfato y actinobacterias, resultaron no tener una correlación con la biodiversidad vegetal, por lo que es posible que su presencia y actividad estén más asociados con otros factores como las prácticas de manejo u otras condiciones edáficas (Dai et al. 2018; Kaur et al. 2022).

Las relaciones encontradas en el análisis ACP no fueron significativas (MANOVA con p -valor = 0.0818), por lo tanto, la relación entre la biodiversidad arbórea de las fincas y las variables fisicoquímicas y microbiológicas edáficas no arroja patrones claros que expliquen alguna asociación (Figura 1.4).

Tabla 1.9

Correlaciones de Pearson entre las variables microbiológicas y las variables de diversidad (Índices de Simpson, Shannon y Riqueza) de fincas analizadas de acuerdo con su riqueza de especies arbóreas

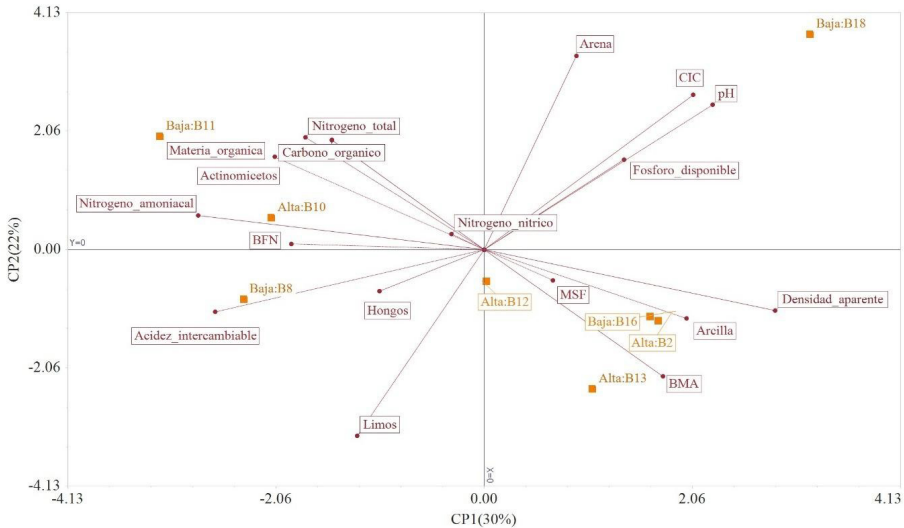
	Simpson		Shannon		Riqueza	
	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja
Bacterias mesófilas aerobias	-0.36	-0.39	-0.37	-0.29	-0.27	-0.22
Hongos	-0.13	0.58*	-0.10	0.55	-0.16	0.54
Bacterias solubilizadoras de fosfato de calcio	0.02	-0.28	0.04	-0.20	-0.03	-0.14
Bacterias fijadoras de nitrógeno	0.62*	0.22	0.62*	0.22	0.57*	0.21
Actinobacterias	0.32	0.00	0.37	-0.09	0.22	-0.17

Nota: Correlaciones estadísticamente significativas (P<0.05) en negrilla.

Fuente: Elaboración propia

Figura 1.4

Distribución de grupos microbianos y de fincas, de acuerdo con el ACP a partir de datos fisicoquímicos de suelo en fincas de alta y baja biodiversidad



Fuente: Elaboración propia

La variabilidad en las características edáficas de los agroecosistemas de cacao analizados en el primer componente principal está principalmente impulsada por la densidad aparente, el pH, la acidez intercambiable y el nitrógeno amoniacal. El segundo componente diferencia las muestras principalmente en función del contenido de arena y limos.

Por otro lado, la complejidad inherente de los ecosistemas y las interacciones múltiples influyen en las propiedades del suelo. La biodiversidad arbórea, además de otras condiciones podrían impulsar cambios en los sistemas edáficos, como por ejemplo el historial del uso del suelo, prácticas de cultivo y los patrones climatológicos, factores no tenidos en cuenta en este estudio (Rodríguez-Suárez et al. 2021; Maitra et al. 2024).

Es importante mencionar que de acuerdo a las asociaciones que se formaron en el análisis ACP, los valores reales, mas no estadísticamente más altos de microorganismos (a excepción de los actinobacterias), se relacionan con las fincas con más alta biodiversidad y que algunos nutrientes fundamentales en el sistema como nitrógeno total, carbono orgánico y fósforo se presentan numéricamente en menores concentraciones en los sistemas de baja biodiversidad, por lo que se podría mencionar que en sistemas con baja biodiversidad están asociados con cantidades menores de estos elementos.

En los SAF, ha sido reportado consistentemente que la mayor diversidad de plantas se asocia con una estructura y actividad mejorada de la comunidad microbiana del suelo (Nahon et al. 2024). Además de unas mejores condiciones edafológicas en comparación con otros sistemas menos diversos como los pastizales o monocultivos (Rodríguez-Suárez et al. 2021), esto debido al aumento de materia orgánica y el carbono orgánico en el suelo, lo que promueve el ciclaje eficiente de nutrientes.

Sin embargo, la respuesta de grupos microbianos específicos, como el caso de las actinobacterias en estudio, no siempre es lineal o consistente con la tendencia general observada en otros grupos microbianos. Otros estudios como el de Nahon et al. (2024) y Buyer et al. (2017), mostraron una tendencia similar en el grupo de las actinobacterias, evidenciando comportamientos diferenciales en comparación con otros grupos microbianos.

Conclusiones

Los resultados permiten concluir que los suelos obtenidos de SAF cacaoteros del municipio de Pauna, Boyacá, poseen una microbiota edáfica abundante y

con una tendencia a una mayor biodiversidad arbórea del cultivo asociada a una mayor cantidad de microorganismos en el suelo; y aunque la biodiversidad arbórea no modifica drásticamente las propiedades físicas y químicas del suelo, influye levemente en la disponibilidad específica de algunos nutrientes, como hierro, manganeso, carbono orgánico, fósforo y nitrógeno.

Los grupos microbianos, como las bacterias mesófilas, solubilizadoras de fosfato de calcio, hongos y actinobacterias, pueden ser menos influenciados por la composición de especies arbóreas y más por otras condiciones edáficas o prácticas de manejo agrícola.

Referencias

- Adal, Y. M. (2024). The impact of beneficial microorganisms on soil vitality: A review. *Frontiers in Environmental Microbiology*, 10(2), 45–53. <https://doi.org/10.11648/j.fem.20241002.12>
- Alarcón Camacho, J., Recharte Pineda, D. C., Yanqui Díaz, F., Moreno LLacza, M., Montes Yarasca, I. M., & Buendía Molina, M. A. (2019). Elaboración de un biofertilizante a partir de microorganismos eficientes autóctonos en Perú. *Anales Científicos*, 80(2), 515. <https://doi.org/10.21704/ac.v80i2.1484>
- Alarcón Gutiérrez, E., Hernández, C., Gardner, T., García Pérez, J. A., Caballero, M., Perroni, Y., Farnet da Silva, A. M., Gaime Perraud, I., & Barois, I. (2021). Soil bioindicators associated to different management regimes of *Cedrela odorata* plantations [Bioindicadores de suelo asociados a diferentes regímenes de gestión de plantaciones de *Cedrela odorata*]. *Madera y Bosques*, 27(1), e2711912. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2711912>
- Arévalo-Gardini, E., Canto, M., Alegre, J., Arévalo-Hernández, C. O., Loli, O., Otiniano, A. J., & Baligar, V. C. (2020). Cacao agroforestry management systems effects on soil fungi diversity in the Peruvian Amazon. In E. Arévalo-Gardini, M. Canto, J. Alegre, C. O. Arévalo-Hernández, O. Loli, A. J. Otiniano, & V. C. Baligar, *Ecological Indicators* (Vol. 115, p. 106404). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106404>
- Birhane, E., Desalegn, T., Kebede, F., Giday, K., Hishe, H., & Hadgu, K. M. (2019). In situ leaf litter production, decomposition and nutrient release of dry Afromontane trees. *East African Agricultural and*

Forestry Journal, 83(3), 176–190. <https://doi.org/10.1080/00128325.2019.1598060>

- Buyer, J. S., Baligar, V. C., He, Z., & Arévalo-Gardini, E. (2017). Soil microbial communities under cacao agroforestry and cover crop systems in Peru. *Applied Soil Ecology*, 120, 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.009>
- Cobos, M., Higuera-Mora, N & Roa-Fuentes, L. (2022). Tipología de sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* l) en los municipios de Coper y Pauna, Boyacá. Redcolsi.
- Contreras, C. (2017). Análisis de la cadena de valor del cacao en Colombia: generación de estrategias tecnológicas en operaciones de cosecha y poscosecha, organizativas, de capacidad instalada y de mercado. Universidad Nacional de Colombia.
- Dai, Z., Su, W., Chen, H., Barberán, A., Zhao, H., Yu, M., Yu, L., Brookes, P. C., Schadt, C. W., Chang, S. X., & Xu, J. (2018). Long-term nitrogen fertilization decreases bacterial diversity and favors the growth of Actinobacteria and Proteobacteria in agro-ecosystems across the globe. *Global Change Biology*, 24(8), 3452–3461. <https://doi.org/10.1111/gcb.14163>
- Das, B., Huth, N., Probert, M., Paul, B., Kihara, J., Bolo, P., Rodriguez, D., Herrero, M., & Schmidt, S. (2019). Drivers of phosphorus efficiency in tropical and subtropical cropping systems. *Proceedings*, 36(1), 13. <https://doi.org/10.3390/proceedings2019036013>
- Espinosa-Alzate, J. & Rios, L. (2016). Caracterización de sistemas agroecológicos para el establecimiento de cacao (*Theobroma cacao* L.), en comunidades afrodescendientes. 65, 211–217.
- FAO. (2015). *Suelos y biodiversidad. Los suelos albergan una cuarta parte de la biodiversidad de nuestro planeta*. <http://bit.ly/1GoFCQe>
- Furey, G. N., & Tilman, D. (2021). Plant biodiversity and the regeneration of soil fertility. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(49). <https://doi.org/10.1073/pnas.2111321118>
- Gama-Rodrigues, A. C., Müller, M. W., Gama-Rodrigues, E. F., & Mendes, F. A. T. (2021). Cacao-based agroforestry systems in the Atlantic Forest and Amazon Biomes: An ecoregional analysis of land use.

- Agricultural Systems* (194). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103270>
- Geisen, S., Briones, M. J. I., Gan, H., Behan-Pelletier, V. M., Friman, V. P., de Groot, G. A., Hannula, S. E., Lindo, Z., Philippot, L., Tiunov, A. V., & Wall, D. H. (2019). A methodological framework to embrace soil biodiversity. *Soil Biology and Biochemistry* (136). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107536>
- Ibáñez, & Gutiérrez. (2020). Aislamiento y selección de rizobacterias solubilizadoras de fósforo a partir de cultivos de *Theobroma cacao* L. *Investigación científica DEKAMU AGROPEC*, 1(2).
- Jiao, S., Lu, Y., & Wei, G. (2022). Soil multitrophic network complexity enhances the link between biodiversity and multifunctionality in agricultural systems. *Global Change Biology*, 28(1), 140–153. <https://doi.org/10.1111/gcb.15917>
- Kang, E., Li, Y., Zhang, X., Yan, Z., Wu, H., Li, M., Yan, L., Zhang, K., Wang, J., & Kang, X. (2021). Soil pH and nutrients shape the vertical distribution of microbial communities in an alpine wetland. *Science of The Total Environment*, 774, 145780. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145780>
- Kaur, M., Li, J., Zhang, P., Yang, H., Wang, L., & Xu, M. (2022). Agricultural soil physico-chemical parameters and microbial abundance and diversity under long-run farming practices: A greenhouse study. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.1026771>
- Kuyah, S., Whitney, C. W., Jonsson, M., Sileshi, G. W., Öborn, I., Muthuri, C. W., & Luedeling, E. (2019). Agroforestry delivers a winwin solution for ecosystem services in subSaharan Africa: A metaanalysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(5), 47. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0589-8>
- Liang, Wu, Zhao, Jiang, Sun, Liu, Ma, & Xue. (2023). Secondary vegetation succession on the Loess Plateau altered the interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen-fixing bacteria.
- Liu, D., Liu, G., Chen, L., Wang, J., & Zhang, L. (2018). Soil pH determines fungal diversity along an elevation gradient in Southwestern China. *Science China Life Sciences*, 61(6), 718–726. <https://doi.org/10.1007/s11427-017-9200-1>

- Maitra, P., Hryniewicz, K., Szuba, A., Jagodziński, A. M., Al-Rashid, J., Mandal, D., & Mucha, J. (2024). Metabolic niches in the rhizosphere microbiome: dependence on soil horizons, root traits and climate variables in forest ecosystems. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1344205. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1344205>
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity*. Blackwell Publishing.
- Mehar, S. K., & Sundaramoorthy, S. (2018). Carbon Sequestration and the Significance of Soil Fungi in the Process. *Fungi and their Role in Sustainable Development: Current Perspectives*, 467–482. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0393-7_26
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). Evaluaciones Agropecuarias Municipales.
- Mitra, D., Mondal, R., Khoshru, B., Senapati, A., Radha, T. K., Mahakur, B., Uniyal, N., Myo, E. M., Boutaj, H., Guerra Sierra, B. E., Panneerselvam, P., Ganeshamurthy, A. N., Anđelković, S., Vasić, T., Rani, A., Dutta, S., & Das Mohapatra, P. K. (2022). Actinobacteria-enhanced plant growth, nutrient acquisition, and crop protection: Advances in soil, plant, and microbial multifactorial interactions. *Pedosphere*, *32*(1), 149–170. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60151-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60151-6)
- Mo, L., Zanella, A., Bolzonella, C., Squartini, A., Xu, G. L., Banas, D., Rosatti, M., Longo, E., Pindo, M., Concheri, G., Fritz, I., Ranzani, G., Bellonzi, M., Campagnolo, M., Casarotto, D., Longo, M., Linnyk, V., Ihlein, L., & Yeomans, A. J. (2022). *Land Use, Microorganisms, and Soil Organic Carbon: Putting the Pieces Together*. *Diversity*, *14*(8). <https://doi.org/10.3390/d14080638>
- Muchane, M. N., Sileshi, G. W., Gripenberg, S., Jonsson, M., Pumariño, L., & Barrios, E. (2020). Agroforestry boosts soil health in the humid and subhumid tropics: A metaanalysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *295*, 106899. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106899>
- Municipio de Pauna. (2015). Esquema de Ordenamiento Territorial. Segunda revisión. Documento Diagnóstico .
- Ngaba, M. J. Y., Mgelwa, A. S., Gurmessa, G. A., Uwiragiye, Y., Zhu, F., Qiu, Q., Fang, Y., Hu, B., & Rennenberg, H. (2024). Meta-analysis unveils differential effects of agroforestry on soil properties in different

zonobiomes. *Plant Soil*, 496, 589–607. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06385-w>

- Nahon, S. M. R., Trindade, F. C., Yoshiura, C. A., Martins, G. C., Costa, I. R. C. d., Costa, P. H. d. O., Herrera, H., Balestrin, D., Godinho, T. d. O., Marchiori, B. M., & Valadares, R. B. d. S. (2024). Impact of Agroforestry Practices on Soil Microbial Diversity and Nutrient Cycling in Atlantic Rainforest Cocoa Systems. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(21), 11345. <https://doi.org/10.3390/ijms252111345>
- Narayanasamy, M., Dhanasekaran, D., & Thajuddin, N. (2020). Frankia. *Beneficial Microbes in Agro-Ecology*, 185–211. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823414-3.00011-3>
- Nouioui, I., Cortés-albayay, C., Carro, L., Castro, J. F., Gtari, M., Ghodhbane-Gtari, F., Klenk, H.-P., Tisa, L. S., Sangal, V., & Goodfellow, M. (2019). Genomic Insights Into Plant-Growth-Promoting Potentialities of the Genus Frankia. *Frontiers in Microbiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01457>
- Parada, R., Marguet, E., & Vallejo, M. (2017). Aislamiento y caracterización parcial de actinomicetos de suelos con actividad antimicrobiana contra bacterias multidrogo-resistentes Isolation and partial characterization of soils actinomycetes with antimicrobial activity against multidrug-resistant bacteria.
- Pérez Corral, D., García González, N., Gallegos Morales, G., Ruiz Cisneros, M., Berlanga Reyes, D. I., & Ríos Velasco, C. (2015). Aislamiento de actinomicetos asociados a rizosfera de árboles de manzano antagonísticos a *Fusarium equiseti*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6.
- Primavesi, A. (1982). *Manejo ecológico del suelo*.
- R 3.6.3: A Language and Environment for Statistical Computing R Core Team R Foundation for Statistical Computing Vienna, Austria 2020 <https://www.R-project.org/>
- R 3.6.3: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models Jose Pinheiro Douglas Bates Saikat DebRoy Deepayan Sarkar R Core Team 2021 R package version 3.1-152 <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>
- Rivera, A., Ospina-Bautista, F., Estévez, J., Posada, R., & Toro, D. (2025). Drivers of fungal succession during leaf litter decomposition in restored and

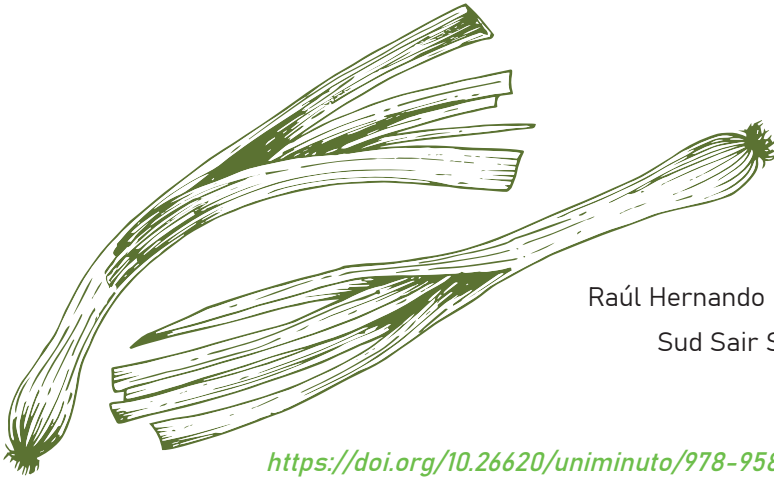
secondary forests in tropical Andean forest. *Restoration Ecology*, 33(3). <https://doi.org/10.1111/rec.14367>

- Rodríguez Suárez, L., Suárez Salazar, J. C., Casanoves, F., & Ngo Bieng, M. A. (2021). Cacao agroforestry systems improve soil fertility: Comparison of soil properties between forest, cacao agroforestry systems, and pasture in the Colombian Amazon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 314, 107349. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107349>
- Rodríguez Suárez, L., Josa, Y., Samboni, E., Cifuentes, K., Duran Bautista, E., Suárez Salazar, J., (2018). Soil macrofauna under different land uses in the Colombian Amazon. *Pesqui. Agropecuária Bras*, 53.
- Rofner, N. F., Salinas, S. S. J., & Lara, T. F. G. M. de. (2019). Comportamiento del cadmio y otros indicadores en suelo y almendra de cacao (*Theobroma cacao* L.), bajo aplicación de compost y NPK. *Folia Amazónica*, 27(2), 193. <https://doi.org/10.24841/fa.v27i2.461>
- Schmidt, J. E., DuVal, A., Isaac, M. E., & Hohmann, P. (2022). At the roots of chocolate: understanding and optimizing the cacao root-associated microbiome for ecosystem services. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(2). <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00748-2>
- Sousa, R. d. S. d. R. d., Lima, G. V. S., Garcias, J. T., Gomes, G. d. O., Mateus, J. R., Madeira, L. D. P. d. S., Seldin, L., Rogez, H. L. G., & Marques, J. M. (2024). The microbial community structure in the rhizosphere of *Theobroma cacao* L. and *Euterpe oleracea* Mart. is influenced by agriculture system in the Brazilian Amazon. *Microorganisms*, 12(398). <https://doi.org/10.3390/microorganisms12020398>
- Suárez, J. C., Andrade, H. J., & Segura, M. (2024). Agroforestry systems affect soil organic carbon stocks and fractions in deforested landscapes of Amazonia. *Agroforestry Systems*, 98(2), 1139–1155. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00949-6>
- Suárez, Y. Y. J., Carvajal-Rivera, A. S., Galvis-Neira, D. A., Carvalho, F. E. L., & Molina, J. R. (2022). Cacao agroforestry systems beyond the stigmas: Biotic and abiotic stress incidence impact [Review of Cacao agroforestry systems beyond the stigmas: Biotic and abiotic stress incidence impact]. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.921469>

- Tang, F., Li, Q., Yue, J., Ge, F., Li, F., Liu, Y., Zhang, D., & Tian, J. (2023). *Penicillium oxalicum* augments soil lead immobilization by affecting indigenous microbial community structure and inorganic phosphate solubilization potential during microbial-induced phosphate precipitation. *Environmental Pollution*, 319, 120953. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120953>
- Tscharntke, T., Clough, Y., Bhagwat, S. A., Buchori, D., Faust, H., Hertel, D., Hölscher, D., Jührbandt, J., Kessler, M., Perfecto, I., Scherber, C., Schroth, G., Veldkamp, E. & Wanger, T. C. (2011). Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes - A review. *Journal of Applied Ecology*, 48(3), 619–629. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01939.x>
- Thiele-Bruhn, S., Bloem, J., de Vries, F. T., Kalbitz, K., & Wagg, C. (2012). Linking soil biodiversity and agricultural soil management. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(5), 523–528. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.06.004>
- Troya Guerrero, G., & Pino Meléndez, V. E. (2023). Microbiota asociada a plantaciones agroforestales de cacao y su impacto en la tolerancia al estrés abiótico. *Ciencia y tecnología agropecuaria*, 8(1), 24–33. <https://doi.org/10.24054/cyta.v8i1.2877>
- Udawatta, R. P., Rankoth, L. M., & Jose, S. (2019). Agroforestry and Biodiversity. *Sustainability*, 11(10), 2879. <https://doi.org/10.3390/su11102879>
- Unda, S. B. (2019). Propiedades de algunos suelos cultivados con cacao en la provincia El Oro, Ecuador. *CienciaUAT*, 14(1), 155. Autonomous University of Tamaulipas. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i1.1210>
- Zhao, Y., Zhao, M., Qi, L., Zhao, C., Zhang, W., Zhang, Y., Wen, W., & Yuan, J. (2022). Coupled Relationship between Soil Physicochemical Properties and Plant Diversity in the Process of Vegetation Restoration. *Forests*, 13(5), 648. <https://doi.org/10.3390/f13050648>
- Zinn, Y. L., Marrenjo, G. J., & Silva, C. A. (2018). Soil C:N ratios are unresponsive to land use change in Brazil: A comparative analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 255, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.019>

CAPÍTULO 2

Relación entre la diversidad de micorrizas y nivel de deterioro del cultivo de cebolla



Raúl Hernando Posada Almanza¹
Sud Sair Sierra Roncancio¹

<https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5.cap2>

Resumen

La agricultura intensiva deteriora la calidad y salud del suelo, generando aumentos en el uso de productos industriales para mantener la productividad. Los hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA) se han perfilado como alternativa para mejorar la salud del suelo. Este trabajo evalúa la riqueza y composición de HMA en cultivos de cebolla en Boyacá - Colombia y su relación con la salud del suelo. De 15 fincas con diferente grado de deterioro edáfico, se extrajeron e identificaron los HMA, así también se evaluó la fisicoquímica del suelo. Mediante Analisis de Componentes Principales (ACP) se determinaron las variables más relacionadas con la variabilidad de las fincas; para evaluar aquellas características edáficas más influyentes en los HMA, se categorizó cada variable fisicoquímica dentro de los parámetros de salud del suelo y mediante tablas de contingencia se seleccionaron aquellas que mostraran efectos significativos sobre los HMA. Se encontraron 23 morfoespecies de HMA tan variables entre fincas como los parámetros edáficos,

¹ Zenkinoko S.A.S

se evidenció exceso de algunos nutrientes y déficit de otros, con mediana a buena CIC y pH poco uniforme. Se concluye que la salud del suelo, evaluada mediante parámetros fisicoquímicos en cultivos de cebolla de bulbo afecta más la composición que la riqueza de especies de HMA.

Palabras clave: Boyacá, calidad del suelo, Colombia, diversidad, servicios ambientales.

Abstract

Intensive agriculture degrades both soil quality and health, leading to the increasing use of industrial products to maintain productivity. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) have emerged as an alternative to improve soil health. This study assesses AMF richness and composition in onion crops in Boyacá, Colombia, and their relationship with soil health. AMFs from 15 farms with varying degrees of soil degradation were extracted and identified, along with soil physicochemical properties. Principal Component Analysis (PCA) identified the most associated variables with farm variability. To determine the edaphic factors influencing AMF occurrence each physicochemical variable was categorized within soil health parameters, and contingency tables were used to select those with significant effects on AMF. 23 AMF morphospecies were identified, showing high variability among farms, similar to edaphic parameters. Nutrient imbalances were observed, some in excess and others deficient, along with moderate to high cation exchange capacity (CEC) and heterogeneous pH. In conclusion, soil health, assessed through physicochemical parameters in onion bulb crops, affects AMF species composition more than species richness.

Keywords: Boyacá, Colombia, diversity, environmental services, soil quality

Cómo citar este capítulo

Posada Almanza, R. H., & Sierra Roncancio, S. S. (2025). Relación entre la diversidad de micorrizas y nivel de deterioro del cultivo de cebolla. En N. C. Higuera Mora & R. H. Posada Almanza (Eds.), *Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales* (pp. 87–105). Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO. <https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5.cap2>

Introducción

La cebolla es un cultivo de gran importancia económica a nivel mundial, y su producción a menudo se lleva a cabo en regiones con suelos de baja calidad (Baar, 2008). La región de los Andes colombianos es un área clave para la producción de cebolla de bulbo, donde a los cultivos para alcanzar grandes producciones, se les aplica en cada cosecha, nutrientes minerales en forma intensiva, debido a la extracción del suelo por las plantas.

En 2023, la producción de cebolla (*Allium cepa*) en Colombia alcanzó 635.583 toneladas, cultivadas en una superficie cosechada total de 26.820 hectáreas (MinAgricultura, 2024). El departamento de Boyacá contribuyó con el 41% de la producción nacional, con 8.250 hectáreas (31% del área cosechada total) y una producción de 260.970 toneladas, posicionándose como la región líder en la producción de cebolla del país. Otras regiones productoras importantes incluyen Cundinamarca, Norte de Santander y Nariño (MinAgricultura, 2024).

Por su parte, la salud del suelo es la capacidad continua de este para funcionar como ecosistema vital que sustente las plantas, los animales y los humanos (Departamento de agricultura de los estados Unidos [USDA] y Naturales, 2012); esto incluye las propiedades dinámicas del suelo como contenido de materia orgánica, diversidad de organismos, o productos microbianos en un tiempo particular (Romig et al. 1995). Entre los indicadores químicos de la salud del suelo están la concentración de nutrientes, la materia orgánica y el pH (Moebius-Clune et al. 2016).

El deterioro del suelo es una gran preocupación en muchas regiones agrícolas, ya que puede llevar a una reducción de los rendimientos de los cultivos y a la degradación de los ecosistemas. La alteración de la salud y calidad del suelo son influenciadas de manera diferencial por las prácticas de manejo, tales como la agricultura convencional u orgánica, que incluyen actividades de fertilización, control de plagas y enfermedades mediante productos químicos o métodos biológicos o métodos físicos, y el grado de labranza del suelo que se utiliza (Baweja et al. 2020; Tahat et al. 2020; Villalba et al. 2024). El cultivo de cebolla en Colombia es una práctica altamente influenciada por el uso de enmiendas químicas durante todas las etapas fenológicas del cultivo, desde la siembra hasta la cosecha, profundamente afectada por el ataque de plagas y la presión de enfermedades en la región (Galeano et al. 2018), lo que indica un alto grado de deterioro del suelo.

Por su parte, los hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA) son un componente vital de la comunidad microbiana del suelo, formando relaciones simbióticas con más del 80% de las especies vegetales terrestres (Lee et al. 2013). Los beneficios que estos hongos proporcionan a los sistemas agrícolas están bien documentados, ya que pueden mejorar significativamente la adquisición de nutrientes, especialmente de fósforo, y aumentar la resistencia de las plantas a patógenos (Garg & Chandel, 2010; Guo, 2019). Estudios previos han demostrado que los HMA pueden contribuir a una madurez más temprana de las plantas de cebolla con una mayor calidad del bulbo, mayor firmeza y uniformidad en el diámetro del bulbo, además de una menor pérdida de peso durante el almacenamiento (Charron et al. 2001). En los Países Bajos, Galván et al. (2009), ilustraron que los HMA pueden mejorar potencialmente el crecimiento de la cebolla en suelos con condiciones variables de nutrientes.

El mantenimiento de poblaciones de HMA es crucial para combatir los efectos perjudiciales del deterioro del suelo, ya que estos hongos tienen la capacidad de estabilizar la estructura del suelo, aumentar el ciclo de nutrientes y promover la diversidad vegetal dentro del agroecosistema (Guo, 2019; Jeffries et al. 2003); sin embargo, algunos estudios han demostrado una fuerte correlación entre el grado de deterioro del suelo y la diversidad de HMA presentes en los sistemas de cultivo de cebolla (Galván et al. 2009; Jaime et al. 2008). Los suelos con niveles más altos de alteración y degradación tienden a tener menor riqueza de especies y abundancia de estos hongos beneficiosos, limitando su capacidad para apoyar el crecimiento y rendimiento saludable de las plantas de cebolla (Knerr et al. 2018).

Dado el papel esencial que desempeñan los HMA en el mantenimiento de la salud del suelo y el apoyo al crecimiento vegetal, su diversidad y abundancia en los sistemas de cultivo de cebolla pueden tener un impacto profundo en la viabilidad a largo plazo y la productividad de este cultivo (El-Sherbeny et al. 2022; Khokhar, 2019). Comprender la relación entre el grado de deterioro del suelo y las comunidades de HMA es un tema que merece investigación (Knerr et al. 2018). Este estudio tiene como objetivo evaluar la riqueza y composición de HMA en las áreas de cultivo de cebolla en Boyacá - Colombia y su relación con la salud del suelo. Se hipotetiza que debido a que los suelos ya tienen un historial de manejo continuo en cultivo de cebolla de bulbo, las especies de HMA existentes estarán adaptadas a estas condiciones de excesos de nutrientes, por lo tanto, la degradación del suelo tendrá efectos mínimos en la riqueza de especies de HMA, pero habrá cambios en la composición

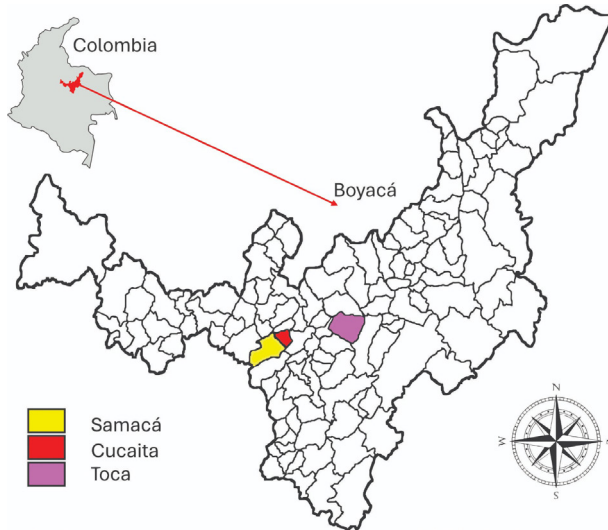
de especies. También se hipotetiza que habrá especies comunes en todos los cultivos, así como algunas especies sensibles a las propiedades edáficas que determinan la salud del suelo.

Métodos

El estudio se realizó en los municipios de Samacá, Toca y Cucaita del Departamento de Boyacá – Colombia en 2023, en cada municipio se seleccionaron fincas con una amplia tradición como productoras de cebolla de bulbo (Figura 2.1).

Figura 2.1

Mapa de los municipios de Cucaita, Toca y Samacá en el departamento de Boyacá



Fuente: Elaboración propia

De cada municipio se seleccionaron 5 fincas y en cada una de ellas se zonificaron como parte alta, media y baja para fincas con cierto grado de pendiente, pero si era plano, entonces como lotes 1, 2 o 3; de cada zona se seleccionaron muestras compuestas de la rizosfera (3-10 cm de profundidad) de 5 plantas seleccionadas aleatoriamente, hasta completar un kilo de cada una. De cada una de las muestras se tomó una submuestra para determinación de la diversidad de micorrizas arbusculares y el resto de material se envió debidamente etiquetado para análisis físico-químico al laboratorio de suelos

del Instituto Geográfico Agustín Codazzi siguiendo sus propias metodologías para determinación de:

Textura de suelo (Hidrómetro de Bouyoucos – Densimétrico. Método IGAC adaptado a los suelos Colombianos), pH (Potenciométrico en relación suelo/ agua 1:1), Carbono total (oxidación completa y cuantificación por infrarrojo), fósforo disponible (Bray II – Espectrofotométrico. Modificado por el IGAC y adaptado a los suelos colombianos) y, Capacidad de intercambio catiónica (Extracción con Acetato de Amonio 1M pH 7 – Volumétrico y cuantificación por volumetría), Bases intercambiables (calcio, magnesio, potasio y sodio): Extracción con acetato de amonio 1M pH 7 y cuantificación por absorción-emisión atómica, Nitrógeno total: Kjeldahl y titulación potenciométrica o Combustión (oxidación completa) en Analizador Elemental, Carbono orgánico por Walkley-Black y cuantificación por volumetría, Retención fosfórica: Fijación de fósforo y cuantificación por espectrofotometría en el rango visible (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 1998).

Para conocer la diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares se procedió a realizar su extracción a partir de suelo e identificación morfológica microscópica. Las esporas fueron extraídas de cada zona de cada finca, para un total de 45 muestras, de acuerdo con la técnica de tamizaje húmedo, seguido de centrifugación en gradiente de sacarosa como está descrito en Sánchez de Prager et al. (2010). La extracción de las esporas se realizó en un estereoscopio Carl Zeiss modelo STEMI 305 y se montaron en láminas portaobjetos, tiñéndolas con una mezcla de polivinil glicerol (PVGL) y reactivo de Melzer en proporción 1:1 (v/v) (Brundrett et al. 1994) para su posterior identificación.

Solo las esporas que parecían viables (basados en la apariencia y presencia de contenido citoplasmático) fueron contadas e identificadas microscópicamente (generalmente 1000 aumentos) a morfoespecie o a su categoría superior a partir de parámetros morfológicos de las esporas como: color de la espora y de la hifa de soporte, presencia o ausencia de escudo, número de paredes y capas, forma y unión de la hifa de soporte, presencia, ausencia y posición de septo, presencia de cicatrices, presencia de sáculo, ornamentaciones, esporas agrupadas o solitarias, tipo de agrupación y la reacción en Melzer. La identificación a género fue hecha con base en literatura e identificada a nivel de especie, cuando fuera posible, comparándolos con la información disponible en el International Culture Collection of Arbuscular

y Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi - INVAM (<https://invam.wvu.edu/>), la colección del profesor Sidney Stürmer (<https://sites.google.com/site/cicgfm/home>) y con la colección de Glomeromycota del profesor Januzs Blaskowski (www.zor.zut.edu.pl), Blaszkowski, (2012) y nuevas descripciones de especies (hasta diciembre 2023). En el caso de los morfotipos que encajan a género, pero no a especie, el morfo fue numerado en secuencia dentro del género. Finalmente, los nombres científicos fueron actualizados de acuerdo a Micobank (<https://www.mycobank.org/>).

Análisis de datos.

A los datos se les organizó en dos grupos, físico-químicos y biológicos (abundancia relativa de morfoespecies de HMA), a cada grupo se le realizó un análisis de componentes principales (ACP) con el objeto de discriminar las variables con menos aporte a la varianza y reducir las dimensiones, en todas ellas se evaluó la determinante como criterio de aceptación superior a 0.00.

Con el objeto de evaluar el efecto de cada una de las variables edáficas sobre cada una de las especies de HMA, se categorizaron todas las variables físico-químicas de acuerdo a sus valores siguiendo a Osorio, (2012) para la mayoría de los parámetros, discriminando entre valores ideales, bajos o altos y para las relaciones entre cationes en deficientes, bajos, óptimos, altos o excesos para una buena calidad del suelo con fines agrícolas (datos ordinales); mientras que las morfoespecies de HMA fueron contadas de 0 a 3 de acuerdo a su frecuencia de aparición (nominales).

Con los datos categorizados se procedió a realizar tablas de contingencia que permiten sacar predicciones del comportamiento de las diferentes especies en función de los parámetros edáficos del suelo; su nivel de independencia fue valorado por medio de la V de Kramer (mide el grado de intensidad en que dos variables están relacionadas, donde un valor 0.6-0.8 es fuerte y 0.8-1.0 es muy fuerte) y su valor P asociado.

Resultados y discusión

Comenzando con los análisis físicoquímicos de suelos (Tabla 2.1), una mayor disponibilidad o exceso de P, tal como ocurre en la mayoría de las fincas, debido en muchos casos por aplicación sin asesoría técnica, disminuye la disponibilidad de micronutrientes (Roshinus-Tsufac et al. 2021), la cantidad

de fósforo retenido no es excesiva, siendo acorde con el pH del suelo. Las cantidades de carbono y de nitrógeno están entre bajas y medias para clima frío (IGAC, 1998), cayendo en categorías de muy bajo a óptimas de acuerdo a la finca seleccionada (Moebius-Clune et al. 2016), a pesar de esto conservan una adecuada proporción C/N; cuatro tipos de textura, donde la más favorable para la CIC es la arcillosa, aunque no es un parámetro de salud del suelo, si es necesario tomarla en cuenta para la interpretación de muchos otros parámetros (Moebius-Clune et al. 2016).

Tabla 2.1

Resultados de análisis físico-químicos de suelos de fincas productoras de cebolla de bulbo seleccionadas

ID	Municipio	Textura	Are			pH	CO			Ni	SB	C/N				BT				Ca/Mg	Mg/K	Ca/K	S	
			Lim	Arc	lim		M0	M1	M2			M3	P.di	P.re	CIC	Ca	Mg	K	Na					BT
			(%)						(Mg / Kg)				(Cmol/Kg)											
M01	Cu	FArA	46	27	27	6.1	0.84	1.44	0.07	95	11.9	180.9	48.6	12.6	9.5	2.4	0.6	0.1	12.6	3.9	3.90	15.4	19.3	13
M02	Cu	FAr	38	29	33	5.1	4.37	7.54	0.39	27	11.5	146.7	88.8	33.3	5.4	2.4	1.3	0.0	9.1	2.2	1.91	4.3	6.2	16
M03	Cu	F	40	38	23	5.1	4.51	7.77	0.39	27	11.6	23.5	89.1	36.9	5.2	3.5	1.2	0.0	10.0	1.5	2.84	4.2	7.0	12
M04	Cu	FAr	32	31	37	6.9	0.86	1.48	0.07	95	12.3	130.8	34.6	16.4	14.3	4.5	1.0	0.4	20.3	3.2	4.33	13.9	18.2	14
M05	Sa	Ar	35	23	42	7.5	0.82	1.41	0.07	95	11.7	84.8	36.4	13.9	33.9	4.4	0.8	0.2	39.2	7.7	5.39	41.4	46.7	17
M06	Sa	Ar	36	21	44	5.5	1.35	2.33	0.12	83	11.3	29.0	53.0	16.0	8.0	4.5	0.7	0.1	13.4	1.8	6.10	10.9	16.9	20
M07	To	Ar	31	19	50	5.5	1.10	1.90	0.09	83	12.2	130.4	47.8	10.6	8.1	4.1	1.5	0.2	13.8	2.0	2.71	5.4	8.1	16
M08	To	F	44	33	23	6.2	1.57	2.71	0.14	95	11.3	60.0	36.0	13.7	8.9	3.9	1.0	0.2	14.0	2.3	3.79	8.6	12.4	16
M09	To	FAr	35	31	36	6.3	2.30	3.97	0.20	87	11.5	19.9	47.5	20.5	12.5	4.2	1.1	0.1	17.9	3.0	3.81	11.5	15.3	14
M10	To	F	45	41	15	6.3	1.43	2.46	0.12	95	11.9	111.8	36.8	7.5	4.5	2.4	0.7	0.0	7.7	1.9	3.36	6.3	9.7	13
M11	To	FArA	54	23	23	5.8	1.40	2.42	0.12	57	11.7	72.5	45.6	10.7	3.6	1.8	0.7	0.0	6.1	2.0	2.50	5.0	7.5	19
M12	Cu	F	48	31	21	6.8	1.34	2.32	0.12	95	11.2	211.1	19.5	11.3	9.5	2.3	0.9	0.1	12.7	4.2	2.42	10.1	12.6	12
M13	Sa	Ar	28	29	44	7.8	0.64	1.11	0.06	95	10.7	323.7	35.9	14.6	19.5	3.6	1.2	0.1	24.3	5.5	2.89	15.8	18.7	14
M14	Sa	FAr	30	35	35	6.0	0.37	0.64	0.03	95	12.4	94.0	30.6	12.4	10.0	3.0	0.4	0.2	13.5	3.4	7.40	24.9	32.3	7
M15	Sa	FAr	38	23	39	7.2	1.05	1.81	0.09	95	11.7	172.3	56.9	15.3	21.0	3.5	1.1	0.1	25.7	6.0	3.18	19.0	22.2	11

Nomenclatura= Cu: Cucaita, Sa: Samaná, To: Toca, Are: Arena, Lim: Limo, Arc: Arcilla, CO: Carbono orgánico, Ni. Nitrógeno, SB: Saturación de bases, BT: Bases totales, CIC: Capacidad de Intercambio catiónico, P.di: Fósforo disponible, P.re: Fósforo retenido, S: Riqueza de HMA.

Fuente: Elaboración propia

Los valores de pH están en el rango de pH (5.1-7.8) entre los ácidos y ligeramente alcalinos (adecuados para cultivos de cebolla), lo cual hace que gran cantidad de nutrientes esté disponible (Departamento de agricultura de los estados Unidos [USDA], 1999; Hartemink & Barrow, 2023). En general, con una buena a excelente saturación de bases, que acompañada de una mediana a alta CIC indica buena disponibilidad de bases para la nutrición vegetal (IGAC, 1998). Afín a estos parámetros, los cationes intercambiables y sus proporciones presentan valores muy variables de acuerdo con el cultivo de proveniencia y pueden infringir diferencias en los resultados obtenidos en cualquier parámetro biológico influenciado. Finalmente, la riqueza de HMA (S) no parece ser influenciada por la salud del suelo, ya que solo la finca M14 presentó valores más bajos que las demás (Tabla 2.1).

Análisis multivariados

Se encontraron 23 morfoespecies de HMA, distribuidos en los géneros *Acaulospora* (6), *Cetraspora* (1), *Claroideoglossum* (1), *Funneliformis* (2), *Gigaspora* (1), *Glomus* (5), *Intraspora* (1), *Paraglossum* (2), *Rhizoglossum* (3) y *Scutellospora* (1). De estas especies *Acaulospora* sp02, *Acaulospora mellea*, *Funneliformis coronatum* y *Glomus trufemii* fueron encontradas en todas las fincas, lo que denota que estas especies son resistentes a las condiciones extremas presentes en el cultivo de cebolla en Boyacá.

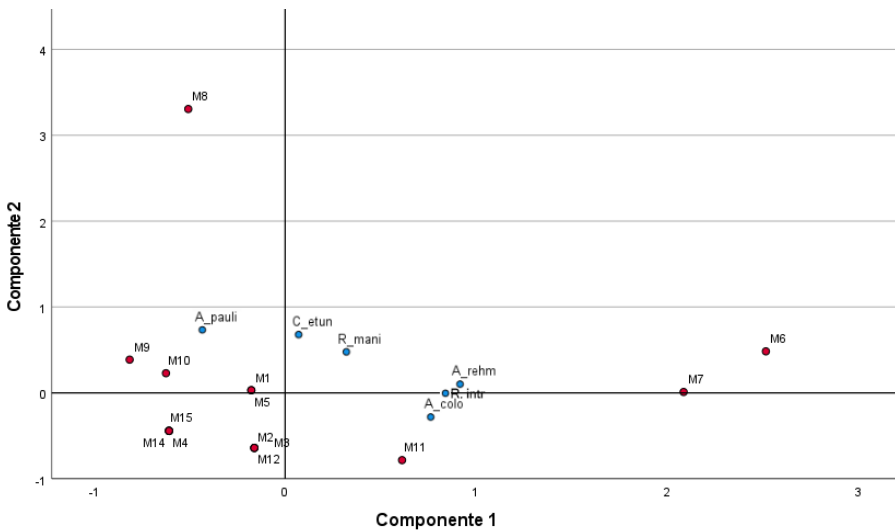
Para las morfoespecies se encontraron dos componentes principales, los cuales explican el 80.3% de la varianza, el primer componente representado por (*A. rehmsii*, *R. intraradices*, *A. colombiana* y *R. manihotis*) explica el 47.5% y el segundo componente (*A. paulinae* y *C. etunicatum*) explican el 32.8%. En todos los casos corresponden a especies de HMA poco frecuentes y con las mayores frecuencias relativas de aparición para el primer componente asociado a las fincas M06 y M07, mientras en el segundo caso a la finca M08. La mayoría de las fincas no tiene especies claramente distintivas. Posiblemente hay diferentes factores en estas fincas que diferencian y pueden promover la aparición de estas especies (Figura 2.2).

Para los parámetros físico-químicos tres componentes explican el 89.9% de la varianza, todos ellos relacionados con la salud del suelo, el primer componente, al que se le denominó relaciones iónicas y el pH (Ca^+/Mg^+ , Ca^+ , BT , Ca^+/K^+ , $(\text{Ca}^{++}\text{Mg}^+)/\text{K}^+$ y en menor medida pH) explican el 41.1%, donde se resalta la finca M05 por sus altos valores, y el segundo componente, al que

se le denominó nutricional (CIC, N, CO y P.re), explican el 32.6%, donde se resaltan las fincas M02 y M03 por sus altos contenidos; finalmente el Mg⁺ y la arena explican el 16.3%. Se encontró un alto contraste en los parámetros físico-químicos edáficos en las fincas, algunos de los cuales en exceso o déficit para una buena salud del suelo. Claramente al comparar el APC de los componentes bióticos y los físico-químicos, no hay una coincidencia de las fincas, por lo tanto es muy probable que no sean los parámetros edáficos en conjunto los que determinen la abundancia relativa de las especies (Figura 2.3).

Figura 2.2

APC para las especies de hongos de micorriza arbuscular, a partir de los datos de las variables mencionadas en la tabla 2.1 de 15 fincas productoras de cebolla en Boyacá



Fuente: Elaboración propia

Tablas de contingencias

Para las tablas de contingencia se consideraron solo los valores de V-Kramer superiores a 0.7 (fuertes a muy fuertes) con un valor de $P < 0.05$ y se muestran solo los valores que cumplen con ambos criterios (Tabla 2.2). Especies con valores V-Kramer que no cumplían con los criterios anteriores no fueron detalladas o aparecen con (-).

presente estudio se encontró que tiene preferencia para esporulación en sitios con bajos contenidos de Ca^+ en la proporción Ca^+/Mg^+ y con alta saturación de bases, mientras *Acaulospora sp01* es más asociada con bajos contenidos de carbono orgánico y nitrógeno poco saludables de acuerdo al IGAC (1998) y Osorio (2012).

Tabla 2.2

Valores de V-Kramer (P asociado) para las variables edáficas influyentes en la abundancia relativa de Hongos de micorriza arbuscular en 15 fincas productoras de cebolla de bulbo

Especie de HMA	pH	Ca^+	K^+	CO	Ni	CIC	SB	Ca^+/Mg^+	Ca^+/K^+	$(\text{Ca}^++\text{Mg}^+)/\text{K}^+$
<i>Acaulospora_sp01</i>	0.810 (0.033)	-	-	0.784 (0.026)	0.784 (0.026)	-	-	-	-	-
<i>Acaulospora_sp02</i>	-	-	-	-	-	0.707 (0.005)	-	-	-	-
<i>Acaulospora_colombiana</i>	0.794 (0.041)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Acaulospora_rehmii</i>	-	0.784 (0.010)	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Funneliformis_coronatus</i>	-	-	-	0.784 (0.026)	0.784 (0.026)	-	-	-	-	-
<i>Gigaspora_sp01</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.715 (0.018)	-
<i>Glomus_trufemii</i>	-	-	1 (0.002)	-	-	-	-	-	-	-
<i>Glomus_ambisporum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.722 (0.016)
<i>Glomus_macrocarpum</i>	-	-	-	-	-	-	-	0.707 (0.024)	-	-
<i>Glomus_microcarpum</i>	-	-	-	-	-	-	-	0.707 (0.024)	-	-
<i>Intraspora_schenckii</i>	-	-	-	0.784 (0.01)	0.784 (0.01)	-	-	-	-	-
<i>Rhizogloium_irregulare</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.733 (0.013)
<i>Rhizogloium_intraradices</i>	0.850 (0.055)	-	-	-	-	-	0.829 (0.006)	0.707 (0.024)	-	-
<i>Rhizogloium_manihotis</i>	-	1 (0.001)	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Scutellospora_sp01</i>	0.850 (0.055)	0.829 (0.006)	-	-	-	-	0.829 (0.006)	-	1 (0.002)	0.829 (0.016)

Nomenclatura: pH = potencial de Hidrógeno, Ca^+ = Calcio iónico, K^+ = Potasio iónico, Mg^+ = Magnesio iónico, CO= Carbono orgánico, CIC= Capacidad de Intercambio catiónica, SB= Saturación de bases. Las siguientes corresponden a relaciones iónicas. (-) no se muestra el resultado por no cumplir los criterios de V-Kramer.

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, al evaluar los factores físico-químicos más influyentes sobre los HMA se encontró poca o nula relación y diferentes patrones con las especies encontradas, lo cual se puede deber en parte a la heterogeneidad edáfica, característica muy común en los suelos agrícolas (Santiago-Mejía et al. 2018; Tiruneh et al. 2021) y muestra variabilidad en preferencias de esporulación de estos hongos ante diferentes condiciones edáficas (Melo et al. 2019), contribuyendo a explicar porqué se encuentra una amplia diversidad de HMA en ambientes cultivados tan diversos en todo el mundo.

Oehl et al. (2017), trabajando con 154 sitios encontró una gran diversidad de especies con esporulación en todos los sitios, otras muy raras y otras con patrones específicos de especies como la intensidad de manejo, el pH, materia orgánica, respiración, textura, altitud o combinaciones de estas. Posteriormente, algunos estudios como el de Melo et al. (2019) mostraron preferencia de algunos géneros por condiciones edáficas particulares, como la familia Acaulosporaceae, en la cual se relacionó negativamente la esporulación con el pH y el fósforo disponible, para la familia Gigasporaceae la relacionó positivamente con incremento con el K disponible y negativamente con el Mg, mientras para la familia Glomeraceae encontró correlación positiva con el Mg^+ y negativa con el K^+ y el pH edáficos. Mas recientemente, Devia-Grimaldo et al. (2021) encontraron una relación de la saturación de K^+ y Na^+ con la esporulación de las morfoespecies de las familias Glomeraceae y Acaulosporaceae; más ninguno de los autores relacionó las familias, géneros o especies de HMA con los valores ideales para una buena salud del suelo.

En el presente trabajo no se encontraron patrones por familias o géneros, solo especie-específicos, sin embargo se encontraron patrones para algunos de los componentes químicos del suelo que se asocian a diferentes especies de HMA en el cultivo de cebolla: el pH del suelo (con especificidades de acuerdo a la spp), suelos con altos contenidos de Ca^+ o de K^+ (poco saludable), suelos con bajos contenidos de carbono orgánico y nitrógeno (poco saludable), CIC media a alta (saludable), con alta concentración de bases pero no saturados de éstas (saludable), y suelos con relaciones iónicas como Ca^+/Mg^+ , Ca^+/K^+ o $(Ca^++Mg^+)/K^+$, con bajos a ideales contenidos de calcio (saludables). Estos datos indican que diferentes factores edáficos, tanto de suelos saludables o no, se asocian con la esporulación de diferentes especies de HMA, quizás esto contribuye a que este grupo de hongos demuestre proficiencia en servicios ecosistémicos como la toma de K^+ , Mg^+ , Ca^+ o S^+ , durante condiciones de estrés, tales como suelos salinos (Miransari, 2017). Este hecho contribuye

a que se seleccionen especies de HMA tolerantes a condiciones estresantes (Hijri et al. 2006), manteniendo la riqueza de HMA, pero con comunidades diferentes de acuerdo con las propiedades edáficas.

Conclusiones

En los cultivos de cebolla de bulbo en el departamento de Boyacá se tienen condiciones de agricultura tradicional intensiva, llevando a deterioro de la calidad y salud del suelo, bajo estas condiciones se encuentra presencia de una riqueza de HMA relativamente constante, indicando adaptación de algunas especies a las condiciones de estrés predominantes en estos sistemas.

Como producto de la variabilidad en salud del suelo donde se produce la cebolla de bulbo, las comunidades de HMA esporulan de manera diferencial, algunas especies son constantes en su aparición, mientras otras responden y esporulan como respuesta ante uno o varios parámetros edáficos como el pH, contenidos y proporciones iónicas (Ca^+ , K^+ , Mg^+), y/o bajos contenidos de carbono orgánico y nitrógeno.

La salud del suelo, evaluada mediante diferentes parámetros fisico-químicos en cultivos de cebolla de bulbo afecta más la composición que la riqueza de especies de HMA. Aun así, se requieren estudios más amplios que ayuden a dilucidar la relación de la salud del suelo donde se producen los diferentes cultivos con las comunidades de HMA, y estudios guiados que brinden información acerca de los servicios ambientales que brindan este grupo de hongos.

Tomando en cuenta la erosión edáfica asociada a los cultivos de cebolla de bulbo, producto de la intensa actividad agrícola, con sobreexplotación de nutrientes y generando desbalances iónicos, algunas de las especies de hongos de micorriza arbuscular muestran una alta resiliencia, convirtiéndolos en un elemento de biodiversidad microbiana que se resiste a ser eliminado del suelo, mientras otras especies se vuelven sensibles. Son una alternativa para programas de cambio agrícola hacia una agricultura más amigable con el medio ambiente y que puede contribuir en el proceso de restablecimiento de especies aún más sensibles que ellos.

A nivel agrícola, se recomienda la transición a prácticas agroecológicas, con el uso de microorganismos adaptados a las condiciones del suelo, ya que podría favorecer la permanencia y supervivencia de estas especies en el entorno químico saturado predominante.

Recomendaciones

Se requieren estudios más amplios que ayuden a dilucidar la relación de la salud del suelo donde se producen los diferentes cultivos con las comunidades de HMA, y estudios guiados que brinden información acerca de los servicios ambientales que brindan este grupo de hongos.

Referencias

- Baar, J. (2008). From production to application of arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural systems: Requirements and needs. *Mycorrhiza*, 361–373. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78826-3_18
- Baweja, Pooja, Savindra Kumar, and Gaurav Kumar. 2020. "Fertilizers and Pesticides: Their Impact on Soil Health and Environment." Pp. 265–85 in *Soil Health. Soil Biology*, edited by B. Giri and A. Varma. Springer.
- Blaszkowski, J. (2012). Glomeromycota. En Z. Mirek, J. J. Wójcicki, & M. Zarzyka-Ryszka (eds.), *W. Szafer institute of Botany, Polish Academy of Sciences*.
- Brundrett, M., Peterson, L., Melville, L., Addy, H., McGonigle, T., Schaffer, G., Bougher, N., & Massicotte, H. (1994). Practical methods in mycorrhiza research. En M. Brundrett, L. Melville, & L. Peterson (eds.), *Mycologue Publications*.
- Chagnon, P.-L., Bradley, R. L., Maherali, H., & Klironomos, J. N. (2013). A trait-based framework to understand life history of mycorrhizal fungi. *Trends in Plant Science*, 18(9), 484–491. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.05.001>
- Charron, G., Furlan, V., Bernier-Cardou, M., & Doyon, G. (2001). Response of onion plants to arbuscular mycorrhizae. *Mycorrhiza*, 11(4), 187–197. <https://doi.org/10.1007/s005720100121>
- Departamento de agricultura de los estados Unidos. (1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*.
- Departamento de agricultura de los estados Unidos, y Naturales. (2012). *Libere los secretos del suelo. Principios para suelos de alto rendimiento* (p. 2). <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-12/NRCS-Principles-for-High-Functioning-Soils-Factsheet-2021-Spanish.pdf>

- Devia-Grimaldo, L. D., Pérez-Moncada, U. A., López-D, E. O., & Varón-López, M. (2021). Hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en bosques secos tropicales (BST) afectados por fuego y depósitos fluviovolcánicos en el departamento del Tolima, Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45(177), 1137–1153. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1482>
- El-Sherbeny, T. M. S., Mousa, A. M., & El-Sayed, E.-S. R. (2022). Use of mycorrhizal fungi and phosphorus fertilization to improve the yield of onion (*Allium cepa* L.) plant. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(1), 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.094>
- Galeano Mendoza, C. H., Baquero Cubillos, E. F., Molina Varón, J. A., & Cerón Lasso, M. del S. (2018). Agronomic evaluation of bunching onion in the colombian Cundiboyacense high plateau. *International Journal of Agronomy*, 1(8). <https://doi.org/10.1155/2018/4940589>
- Galván, G. A., Parádi, I., Burger, K., Baar, J., Kuyper, T. W., Scholten, O. E., & Kik, C. (2009). Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in onion roots from organic and conventional farming systems in the Netherlands. *Mycorrhiza*, 19(5), 317–328. <https://doi.org/10.1007/s00572-009-0237-2>
- Garg, N., & Chandel, S. (2010). Arbuscular mycorrhizal networks: Process and functions. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(3), 581–599. <https://doi.org/10.1051/agro/2009054>
- Guo, X. (2019). The role of arbuscular mycorrhiza in sustainable environment and agriculture. In B. Giri, R. Prasad, Q. Wu, & A. Varma (Eds.), *Soil Biology* (55th ed., pp. 501–520). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18933-4_23
- Hartemink, A. E., & Barrow, N. J. (2023). Soil pH - nutrient relationships: the diagram. *Plant and Soil*, 486(1–2), 209–215. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>
- Hernandez-Acosta, E., Banuelos, J., & Trejo-Aguilar, D. (2021). Revisión: Distribución y efecto de los hongos micorrízicos en el agroecosistema de café. *Revista de Biología Tropical*, 69(2), 1–17.
- Hijri, I., Sykorová, Z., Oehl, F., Ineichen, K., Mäder, P., Wiemken, A., & Redecker, D. (2006). Communities of arbuscular mycorrhizal fungi

in arable soils are not necessarily low in diversity. *Molecular Ecology*, 15(8), 2277–2289. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2006.02921.x>

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1998). Consideraciones generales para interpretar análisis de suelos. *Methods* (3).
- Jaime, M. D. L. A., Hsiang, T., & McDonald, M. R. (2008). Effects of *Glomus* intraradices and onion cultivar on *Allium* white rot development in organic soils in Ontario. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 30(4), 543–553. <https://doi.org/10.1080/07060660809507554>
- Jeffries, P., Gianinazzi, S., Perotto, S., Turnau, K., & Barea, J.-M. (2003). The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. *Biology and Fertility of Soils*, 37(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0546-5>
- Khokhar, K. M. (2019). Mineral nutrient management for onion bulb crops – a review. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 94(6), 703–717. <https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1613935>
- Knerr, A. J., Wheeler, D., Schlatter, D., Sharma-Poudyal, D., du Toit, L. J., & Paulitz, T. C. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungal communities in organic and conventional onion crops in the Columbia Basin of the Pacific northwest United States. *Phytobiomes Journal*, 2(4), 194–207. <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-05-18-0022-R>
- Lee, E.-H., Eo, J.-K., Ka, K.-H., & Eom, A.-H. (2013). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and their roles in ecosystems. *Mycobiology*, 41(3), 121–125. <https://doi.org/10.5941/MYCO.2013.41.3.121>
- Melo, C. D., Walker, C., Krüger, C., Borges, P. A. V., Luna, S., Mendonça, D., Fonseca, H. M. A. C., & Machado, A. C. (2019). Environmental factors driving arbuscular mycorrhizal fungal communities associated with endemic woody plant *Picconia azorica* on native forest of Azores. *Annals of Microbiology*, 69(13), 1309–1327. <https://doi.org/10.1007/s13213-019-01535-x>
- MinAgricultura. (2024). *Cien familias productoras de cebolla de Ábrego, en Norte de Santander, recibieron apoyos de MinAgricultura*. <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/CienFamiliasProductorasCebollaAbrego.aspx>

- Miransari, M. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungi and heavy metal tolerance in plants. In W. Qiang-Sheng (Ed.), *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants* (1st ed., pp. 147–161). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4115-0_7
- Moebius-Clune, B., Moebius-Clune, D., Gugino, B., Idowu, O., Schindelbeck, R., AJ, R., van Es, H., Thies, J., Shayler, H., McBride, M., Kurtz, K., Wolfe, D., & Abawi, G. (2016). *Comprehensive assessment of soil health – The Cornell framework training manual (3rd ed.)*. bit.ly/3qFoBk2
- Oehl, F., Laczko, E., Oberholzer, H.-R., Jansa, J., & Egli, S. (2017). Diversity and biogeography of arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural soils. *Biology and Fertility of Soils*, 53(7), 777–797. <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1217-x>
- Osorio, N. W. (2012). Como interpretar los resultados del análisis de fertilidad del suelo. *Boletín del Manejo Integral del Suelo y la Nutrición Vegetal*, 1(6), 3.
- Posada, R. H., Sánchez de Prager, M., Heredia-Abarca, G., & Sieverding, E. (2016). Effects of soil physical and chemical parameters, and farm management practices on arbuscular mycorrhizal fungi communities and diversities in coffee plantations in Colombia and Mexico. *Agroforestry Systems*. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0030-0>
- Romig, D. E., Garlynd, M. J., Harris, R. F., & McSweeney, K. (1995). How farmers assess soil health and quality. *Journal of Soil Water Conservation*, 50, 229–236.
- Roshinus Tsufac, A., Princely Awazi, N., & Kfuban Yerima, B. P. (2021). Characterization of agroforestry systems and their effectiveness in soil fertility enhancement in the south-west region of Cameroon. *Current Research in Environmental Sustainability*, 3, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2020.100024>
- Sánchez de Prager, M., Posada, R. H., Velásquez Pomar, D., & Narvaez Castillo, M. (2010). *Metodologías básicas para el trabajo con micorriza arbuscular y hongos formadores de micorriza arbuscular (1st ed.)*. Universidad Nacional de Colombia.
- Santiago-Mejia, B. E., Martínez-Mez, M. R., Rubio-Granados, E., Vaquera-Huerta, H., & Sánchez-Escudero, J. (2018). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema lama-bordo en

la Mixteca Alta de Oaxaca, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 15(2), 275–288. <https://www.scielo.org.mx/pdf/asd/v15n2/1870-5472-asd-15-02-275.pdf>

- Tahat, Monther, Kholoud Alananbeh, Yahia Othman, and Daniel Leskovar. (2020). Soil Health and Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 12(12):4859. doi: 10.3390/su12124859.
- Tiruneh, G. A., Alemayehu, T. Y., Meshesha, D. T., Vogelmann, E. S., Reichert, J. M., & Haregeweyn, N. (2021). Spatial variability of soil chemical properties under different land-uses in Northwest Ethiopia. *PLOS ONE*, 16(6), e0253156. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253156>
- van der Heyde, M., Ohsowski, B., Abbott, L. K., & Hart, M. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungus responses to disturbance are context-dependent. *Mycorrhiza*, 27(5), 431–440. <https://doi.org/10.1007/s00572-016-0759-3>
- Villalba, A., Alcides, C., González, A., Szostak, J., and Sanabria, M. (2024). Explorando El Estado Del Arte de La Labranza y Su Impacto En La Calidad Del Suelo y La Productividad Agrícola: Una Revisión Crítica de Los Últimos 20 Años. *Investigación Agraria* 26(2):111–24. doi: 10.18004/investig.agrar.2024.diciembre.2602806.

CAPÍTULO 3

Alternativas biotecnológicas para el manejo integrado del cultivo de aguacate



Cristina Calle Henao^{1,2}

Natalia Arbeláez Agudelo¹

Lina Maria Arbeláez Galvis¹

Juan Diego Medina Chavarría¹

Juan Carlos Bedoya Pérez^{1,2}

<https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5.cap3>

Resumen

Colombia posee condiciones agroecológicas favorables para el cultivo de aguacate, un producto con alto potencial de exportación que impulsa la diversificación agrícola, atrae inversión extranjera y genera empleo rural. Sin embargo, plagas y enfermedades afectan su productividad y calidad, lo que históricamente ha llevado al uso intensivo de agroquímicos. Las crecientes restricciones sobre estos productos han generado la necesidad de alternativas sostenibles, como los agentes de control biológico (ACBs). En los últimos años, la Unidad de Fitosanidad y Control Biológico – UFCB ha desarrollado diferentes investigaciones buscando ofrecer soluciones biotecnológicas en el manejo del cultivo. A través de proyectos enfocados en la poscosecha, el mejoramiento genético, el sistema productivo y la calidad de insumos, el grupo ha identificado microorganismos nativos con potencial biocontrolador,

1 Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB).

2 Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia (IUCMA).

formulado prototipos de bioproductos con viabilidad comercial y avanzado en la propagación clonal y caracterización genética del cultivo. Este capítulo es el resultado de años de trabajo, narrando cada etapa del proceso de investigación: desde la bioprospección de microorganismos hasta la validación de bioformulados en condiciones reales. Más allá del aguacate, estas experiencias demuestran la importancia de la investigación y la colaboración entre ciencia y agroindustria para desarrollar bioproductos innovadores que contribuyan a la productividad y sostenibilidad agrícola.

Palabras claves: Aguacate, Agentes de Control Biológico (ACBs), bioprospección, pudrición radicular, enfermedades poscosecha, sostenibilidad agrícola

Abstract

Colombia has favorable agroecological conditions for avocado cultivation, a high-export potential product that drives agricultural diversification, attracts foreign investment, and generates rural employment. However, pests and diseases affect its productivity and quality, historically leading to the intensive use of agrochemicals. Increasing restrictions on these products have created the need for sustainable alternatives, such as biological control agents (BCAs). In recent years, the Plant Health and Biological Control Unit – UFCB has conducted various research efforts aimed at offering biotechnological solutions for avocado crop management. Through projects focused on post-harvest management, genetic improvement, production systems, and input quality, the group has identified native microorganisms with biocontrol potential, formulated prototype bioproducts with commercial viability, and advanced in clonal propagation and genetic characterization of the crop. This chapter is the result of years of research, detailing each stage of the process, from microbial bioprospecting to the validation of bioformulations under real conditions. Beyond avocado, these experiences demonstrate the importance of research and collaboration between science and the agroindustry to develop innovative bioproducts that contribute to agricultural productivity and sustainability.

Keywords: Avocado, Biological Control Agents (BCAs), bioprospecting, root rot, postharvest diseases, agricultural sustainability

Cómo citar este capítulo

Calle Henao, C., Arbeláez Agudelo, N., Arbeláez Galvis, L. M., Medina Chavarría, J. D., & Bedoya Pérez, J. C. (2025). Alternativas biotecnológicas para el manejo integrado del cultivo de aguacate. En N. C. Higuera Mora & R. H. Posada Almanza (Eds.), *Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales* (pp. 107–134). Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO. <https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5.cap3>

Introducción

El desafío de alimentar a una población en crecimiento sin expandir las áreas cultivadas ni invadir ecosistemas naturales plantea un objetivo crucial en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas relacionados con Hambre Cero (ODS2), Producción y Consumo Responsables (ODS12) y Vida de Ecosistemas Terrestres (ODS15). La promoción de prácticas agrícolas sostenibles, el apoyo a pequeños agricultores y el desarrollo de tecnologías que mejoren la productividad agrícola son pilares fundamentales para superar este desafío. En este contexto, los sistemas de producción más eficientes y sostenibles son esenciales para garantizar la seguridad alimentaria y avanzar hacia economías más responsables en el uso de recursos (Granada, 2019).

El aguacate, un cultivo de alta relevancia económica y nutricional, ha experimentado un crecimiento exponencial en su producción y exportación, especialmente en países latinoamericanos. Según Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO](2025), en Colombia, por ejemplo, la producción de aguacate presentó un crecimiento del 27% en los últimos 10 años, pasando de 288739.26 toneladas en 2014 a 1085765.75 toneladas en 2023. No obstante, este aumento en la demanda mundial ha expuesto al aguacate a limitaciones significativas en la productividad, atribuibles a factores bióticos y abióticos que afectan tanto el desarrollo de los cultivos como la calidad del fruto en poscosecha (Talavera et al. 2023). Entre los desafíos más críticos se encuentra la pudrición radicular, causada principalmente por *Phytophthora cinnamomi*, un patógeno devastador responsable de pérdidas económicas sustanciales en regiones productoras, y las infecciones poscosecha, que comprometen la calidad de los frutos destinados a exportación (Ramírez & Morales, 2021; Granada, 2019).

Tradicionalmente, el control de estas enfermedades ha dependido del uso de agroquímicos, como fungicidas y compuestos sintéticos, cuya eficacia se ve limitada por el desarrollo de resistencia microbiana y su impacto, tanto ambiental como en la salud humana (Rani et al. 2021). Además, las restricciones internacionales sobre residuos químicos han impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles. Entre estas alternativas, el uso de agentes de control biológico (ACB) ha surgido como una estrategia prometedora. Los ACB, derivados de microorganismos nativos, no solo ofrecen una solución ecológica, sino que también contribuyen al desarrollo

de bioproductos con aplicaciones en el manejo integrado de cultivos (Ayilara et al. 2023; Granada, 2019).

En Colombia, investigaciones recientes han explorado la bioprospección del microbioma de plantas de aguacate para identificar microorganismos con potencial como antagonistas de patógenos, biofertilizantes y promotores del crecimiento. En la UFCB perteneciente a la Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB) y la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia (IUCMA), estas investigaciones han derivado en el establecimiento de una colección de microorganismos nativos registrados, evaluados y escalados como prototipos para su aplicación en sistemas agrícolas. Paralelamente, se han realizado esfuerzos para mejorar la caracterización genética de los árboles de aguacate, desarrollar portainjertos más tolerantes y homogéneos, y estandarizar técnicas de propagación clonal, con el objetivo de abordar integralmente los retos del cultivo en términos de productividad, sanidad y sostenibilidad (Cañas et al. 2022; Cañas & Arango, 2019; Ramírez et al. 2021; Ramírez et al. 2015; Calle et al. 2020; Granada et al. 2020; Granada et al. 2018).

Este capítulo presenta el proceso de investigación y desarrollo de bioinsumos formulados con microorganismos biocontroladores basado en las experiencias de la UFCB. Se abordan etapas clave como la selección y evaluación de microorganismos hasta la formulación y validación del producto en ambientes relevantes (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2021). Todo ese proceso ha permitido llevar tecnologías hasta niveles de madurez tecnológica (TRL) de 7-8, como el prototipo de formulación en emulsión aceite-agua (O/W) a partir de la cepa bacteriana *Bacillus velezensis* HOB008-290, que ha demostrado funcionar en la prevención y manejo de enfermedades de la poscosecha del aguacate y operar a escala pre-comercial. Mientras que el prototipo en polvo mojable a base de un extracto metabólico de la cepa bacteriana *Serratia marcescens* ARP5.1 para el control de patógenos fúngicos evidenció requerir mejoras para su funcionamiento técnico y comercial.

Estos avances ejemplifican el camino para el desarrollo de soluciones biotecnológicas innovadoras que contribuyan al manejo sostenible de los sistemas agrícolas, equilibrando productividad y conservación ambiental.

Metodología

Área de estudio

Uno de los muestreos más extensos realizados por el grupo de investigación se llevó a cabo en el marco del proyecto “Desarrollo tecnológico, productivo y comercial del aguacate en el departamento de Antioquia”, en el cual, se recolectaron muestras de suelo rizosférico, raíces, hojas, flores y frutos de 240 árboles aparentemente sanos, distribuidos en ocho huertos de aguacate. Las colectas se realizaron del 2014 al 2017 en tres subregiones del departamento de Antioquia (Colombia): Oriente (El Retiro, Rionegro y El Peñol), Suroeste (Amagá y Jardín) y Noroeste (San Pedro de los Milagros).

Microorganismos y medios de cultivo

Las muestras recolectadas incluyeron suelo rizosférico, raíces, hojas, flores y frutos provenientes de plantas de aguacate. Cada muestra vegetal fue previamente fragmentada en secciones de aproximadamente 1 cm² y lavada con agua estéril para remover residuos superficiales. Posteriormente, tanto las muestras vegetales como las de suelo rizosférico (aproximadamente 1 g por muestra) fueron transferidas a tubos estériles conteniendo 9 mL de solución salina estéril con Tween 80 al 0.5 % (v/v), y sometidas a agitación en vórtex durante 1 minuto para favorecer la liberación de microorganismos epífitos o endofíticos superficiales.

Una vez obtenida la suspensión, se sembró una alícuota de 100 µL directamente sobre placas de Petri con medio TSA (Tryptic Soy Agar, Merck®, Alemania), distribuyéndola homogéneamente con un esparcidor estéril. Las placas fueron incubadas a 28 °C durante 48 h. Durante este periodo, se observaron las interacciones entre colonias microbianas que crecían en cercanía, y se seleccionaron aquellas colonias que presentaban halos de inhibición alrededor o que mostraban antagonismo evidente frente a otras colonias presentes en la misma placa.

Las colonias seleccionadas fueron posteriormente replicadas en nuevas placas de TSA para obtener cultivos axénicos y continuar con su caracterización.

Los aislamientos de microorganismos fitopatógenos del aguacate (*P. cinnamomi*, *Colletotrichum* spp., *Phomopsis* sp., *Lasiodiplodia theobromae*, *Cylindrocladium* sp., entre otros) se obtuvieron a partir de raíces, hojas y brotes

de árboles sintomáticos y asintomáticos ubicados en distintos huertos comerciales de Antioquia (región noroeste de Colombia). Estos aislamientos fueron mantenidos en agar papa-dextrosa (PDA) o en medios específicos a 21 °C.

Ensayos de antagonismo *in vitro*

La selección de aislamientos con actividad antagonista se llevó a cabo mediante ensayos de cultivo dual en placas de Petri, siguiendo la metodología descrita por Granada et al. (2014). Brevemente, las placas de Petri con agar papa-dextrosa (PDA) se dividieron en cuatro cuadrantes, y cada uno fue inoculado a 1 cm del borde con un aislamiento potencialmente antagonista, utilizando un asa de siembra. En el centro de la placa se colocó un disco de PDA de 6 mm de diámetro colonizado con el patógeno a evaluar, previamente cultivado durante ocho días. Como control de crecimiento, se incluyó un tratamiento con el patógeno en ausencia de antagonistas. Tras seis días de incubación a 24 °C, se midió la zona de inhibición alrededor de cada antagonista. El grado de inhibición se cuantificó en una escala de 0 a 3, donde: 0 = sin halo de inhibición, 1 = halo de 0.1 a 1.0 cm, 2 = halo de 1.0 a 2.0 cm y 3 = halo de 2.0 a 4.0 cm. Todos los ensayos se realizaron por triplicado, con una réplica adicional en el tiempo para validar los resultados (Ramírez et al. 2015).

Pruebas de eficacia *in vivo* en condiciones de laboratorio

Se evaluó la eficacia de aislamientos bacterianos seleccionados y sus extractos aplicados sobre frutos de aguacate infectados artificialmente o bajo condiciones de infección natural, con el objetivo de controlar los fitopatógenos *C. gloeosporioides* (BR45) y *L. theobromae* (SR14), principales agentes causales de *Body Rot* y *Stem End Rot*, respectivamente. Estas pruebas permitieron no solo confirmar la capacidad biocontroladora de los microorganismos, sino también identificar las concentraciones más efectivas de las mismas, incluso del extracto bacteriano frente a las enfermedades poscosecha, así como establecer las formulaciones más prometedoras. Los tratamientos fueron comparados con productos comerciales comúnmente empleados, como Econoy® y Procloraz®.

Identificación de antagonistas bacterianos

Las bacterias biocontroladoras fueron identificadas mediante PCR de colonia, utilizando los cebadores universales de ARNr 16S (27F y 1492R), según Marasco et al. (2018). Los productos amplificados fueron purificados y secuenciados por Macrogen Incorporated (Seúl, Corea). Las secuencias forward y reverse fueron recortadas, editadas y alineadas con el software Geneious versión 5.4 (Drummond et al. 2012). Posteriormente, se empleó la herramienta BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) para comparar las secuencias obtenidas con la base de datos GenBank y determinar su identidad.

Proceso de optimización de la producción de antagonistas bacterianos

Algunas de las bacterias con mayor potencial biotecnológico para el control de fitopatógenos en el cultivo de aguacate fueron sometidas a procesos de optimización de su producción mediante fermentación sumergida. Para ello, se implementó una estrategia de dos fases basada en la metodología descrita por Bedoya et al. (2019), orientada a maximizar tanto la concentración celular como la síntesis de metabolitos bioactivos. Se emplearon enfoques experimentales complementarios, incluyendo el diseño “un factor a la vez” (OFAT) para la selección preliminar de variables críticas, seguido de un diseño Box-Behnken que permitió evaluar interacciones entre factores como la fuente y concentración de carbono, nitrógeno y sales minerales. Como medio base se utilizó un medio mínimo compuesto por 64 g L^{-1} de $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 15 g L^{-1} de KH_2PO_4 , 2.5 g L^{-1} de NaCl , 5 g L^{-1} de NH_4Cl , 2 mL L^{-1} de MgSO_4 1 M, 0.1 mL L^{-1} de CaCl_2 1 M, 25 mL L^{-1} de glucosa al 20% y 773 mL L^{-1} de agua destilada, que fue ajustado según los requerimientos fisiológicos de cada cepa.

Estas condiciones fueron refinadas particularmente para *S. marcescens* ARP5.1 y *B. velezensis* HOB008-290. En el caso de *S. marcescens* ARP5.1, la estrategia se centró en incrementar la producción de metabolitos bioactivos, mientras que para *B. velezensis* HOB008-290 el objetivo principal fue maximizar la producción de biomasa y endosporas. Para ello, se evaluaron diversas fuentes de carbono (glucosa, maltosa, lactosa, sacarosa, glicerol y almidón de yuca) y nitrógeno (extracto de levadura, proteína de soya, urea, peptona, nitrato de amonio, caseína, extracto de malta, nitrato de potasio y sulfato de amonio) (Montoya, 2021). Asimismo, se analizaron variables clave del proceso

fermentativo, como el tiempo de cultivo, la concentración inicial del inóculo, la velocidad de agitación y la temperatura de incubación (Montoya, 2021).

Como resultado de esta optimización, se definieron medios y condiciones de cultivo específicos que permitieron maximizar la producción en fermentaciones a escala de matraz Erlenmeyer (125 mL). Posteriormente, estas condiciones fueron validadas en fermentadores de 14 L (con 7 L efectivos), y en algunos casos se lograron escalamientos exitosos hasta volúmenes de 200 L.

Producción de bacterias por fermentación sumergida para la obtención de metabolitos extracelulares

El aislamiento bacteriano ARP5.1 ha resaltado por su capacidad para inhibir el crecimiento de *P. cinnamomi*. Sin embargo, su identificación como *S. marcescens*, un patógeno nosocomial asociado a brotes sanitarios (Harch et al. 2025), planteó la necesidad de explorar su potencial como fuente de metabolitos extracelulares en lugar de su aplicación directa como agente biocontrolador. *S. marcescens* es reconocida por la producción de compuestos bioactivos, como la Prodigiosina (PG), un pigmento rojo con actividad antimicrobiana contra diversas bacterias y hongos (Hamada & Mohamed, 2024). Por ello, se evaluó la actividad biológica de sus extractos frente a fitopatógenos del aguacate y su viabilidad como bioinsumo basado en metabolitos bacterianos.

Para maximizar la producción de compuestos bioactivos, se evaluaron diferentes medios de cultivo bajo condiciones controladas. Tras 48 h de incubación a 28 °C y 170 rpm, se añadieron 20 mL de acetato de etilo a cada matraz de cultivo y se agitaron suavemente durante 1 h para facilitar la extracción líquido-líquido en una proporción 2:1 (v/v) disolvente:medio de cultivo, siguiendo la metodología de Bosmans et al. (2016) con modificaciones. La fase orgánica fue cuidadosamente separada con una pipeta de vidrio, y el procedimiento se repitió para aumentar la eficiencia de la extracción.

A continuación, se incorporó sulfato de sodio anhidro para eliminar restos de humedad, y la mezcla fue filtrada mediante papel Whatman No. 1 (Merck®, Darmstadt, Alemania). El disolvente fue retirado utilizando un evaporador rotatorio a presión reducida. El extracto seco obtenido se resuspendió en 1.0 mL de metanol (MeOH) y se filtró con un filtro de jeringa de 0.45 µm. Los extractos fueron almacenados a -20 °C hasta su evaluación. Todos los procedimientos se realizaron por duplicado (Granada, 2019).

La actividad de los extractos se probó frente a *Colletotrichum* sp., *P. cinnamomi* y *Phomopsis* sp. mediante ensayos en microplacas de 96 pozos (Sanmartín et al. 2012; Villamil et al. 2012), midiendo la absorbancia a 595 nm. Se incluyeron controles negativos con agua en lugar de extracto y todos los tratamientos se realizaron por cuadruplicado. Las lecturas se tomaron después de 5 días de incubación a 24°C. Los datos se analizaron mediante ANDEVA con pruebas post-hoc de Tukey utilizando el software en línea VassarStats (<http://vassarstats.net/anova1u.html>).

Separación, purificación y elucidación estructural de metabolitos

Los metabolitos de *S. marcescens* con actividad inhibidora frente a *P. cinnamomi* fueron aislados mediante un proceso de separación bioguiada. La metodología detallada para la purificación y elucidación estructural de estos compuestos fue descrita por Granada (2019).

Desarrollo y caracterización de bioformulaciones de células bacterianas o sus extractos

Los componentes de la bioformulaciones fueron seleccionados bajo el criterio de que ninguno de ellos fuera una fuente alternativa de carbono o nitrógeno para los fitopatógenos objetivo, con el fin de evitar la estimulación de su crecimiento.

Se desarrolló una emulsión W/O (Water in Oil – agua en aceite) mediante la homogenización de diferentes componentes antibióticos, antifúngicos, espesantes, estabilizadores protectores y dispersantes con un cultivo líquido de la bacteria seleccionada previamente producido durante 48 horas en biorreactor, a una concentración de 10^8 células/mL y 10^9 endosporas/mL.

La homogenización se realizó mediante un método de alta energía con agitación Ultra-Turrax durante 5 minutos. La bioformulaciones desarrolladas fueron almacenadas en botellas de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1 L a 27°C.

De igual manera, se probó una formulación en polvo mojable para extractos bacterianos secados con una mezcla de dispersantes y humectantes y acetato de etilo, para formar una primera fase que, posteriormente era mezclada con un aditivo alimentario común que funciona como transportador (carrier) y

sometida a rotaevaporación a 120 mbar hasta que la fase dos se encontraba totalmente secas.

Estabilidad en almacenamiento de las bioformulaciones

La viabilidad de las bacterias en las bioformulaciones almacenadas a 27 °C fue evaluada a los 30, 120 y 180 días posteriores a su preparación. Para ello, se tomaba una alícuota de 1 mL para realizar diluciones seriadas, seguida de siembra en Agar Nutritivo (AN) e incubación a 30°C durante 72 horas. Los experimentos se llevaron a cabo bajo un diseño completamente al azar (DCA) con tres repeticiones por cada dilución utilizada. La cantidad de unidades formadoras de colonia (UFC/mL) se calculó mediante la siguiente fórmula (Prasad et al. 2020):

$$UFC = \frac{\text{Promedio del número de colonias} \times \text{Factor de dilución}}{\text{Peso de la muestra} \times \text{Alícuota tomada}}$$

El porcentaje de pureza microbiológica se analizó en placas con agar nutritivo (AN) y agar papa dextrosa (PDA), identificando el número de morfotipos y sus características macroscópicas y microscópicas, relacionadas tanto con las bacterias formuladas como con posibles bacterias y hongos contaminantes.

Además, se evaluaron propiedades fisicoquímicas como pH y densidad. Para ello, los envases con las bioformulaciones fueron agitados adecuadamente para garantizar la dispersión uniforme de los componentes en el líquido, tras lo cual se registraron los valores de pH y densidad. Cada experimento se realizó con cinco repeticiones.

Finalmente, se confirmó la actividad biológica de las formulaciones frente a los fitopatógenos, midiendo el crecimiento de los hongos en PDA suplementado con 0.1 mL de las formulaciones por cada 100 mL de medio. El diámetro micelial se registró diariamente durante cuatro días. Como control negativo, se evaluó el crecimiento de los fitopatógenos en PDA sin formulación.

Pruebas de citotoxicidad, genotoxicidad y mutagenicidad

Prueba de proliferación celular en la línea HaCat: MTT

Para evaluar la citotoxicidad de las bioformulaciones, se emplearon células queratinocíticas humanas inmortalizadas HaCat (ATCC® PTA-1499™). Las células se cultivaron en medio Dulbecco's Modified Eagle (DMEM), suplementado con suero fetal bovino (FBS), penicilina y estreptomycin, en una atmósfera húmeda con CO₂ a 37 °C (Sarin et al. 2021). La viabilidad celular tras la exposición a la bioformulación se utilizó como indicador de citotoxicidad. Esta se determinó midiendo la actividad de la enzima mitocondrial succinato deshidrogenasa sobre el sustrato MTT [3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-difenil tetrazolio bromuro] (Sigma®-Aldrich, St. Louis, EE. UU.), lo que genera un cambio de color debido a la formación de cristales de formazán.

Evaluación de genotoxicidad mediante electroforesis alcalina de células individuales (*Comet Assay*)

La genotoxicidad de las bioformulaciones se evaluó mediante el ensayo de electroforesis alcalina de células individuales (*Comet Assay*), una técnica capaz de detectar rupturas de cadena sencilla en el ADN (SSBs), sitios lábiles en condiciones alcalinas, entrecruzamientos ADN-ADN y SSBs asociados a sitios de reparación incompleta (Tice et al. 2000).

Se sembraron 30.000 células por pozo y se trataron con concentraciones subletales de la bioformulaciones durante 24 horas. Como control positivo se utilizó peróxido de hidrógeno, mientras que los controles negativos fueron solución tampón PBS 1X (libre de calcio y magnesio) y células no tratadas. La viabilidad celular fue evaluada mediante tinción con azul de tripano, asegurando que fuera superior al 85%.

Después de la electroforesis, las células fueron teñidas y analizadas individualmente mediante microscopía de fluorescencia a 40X (Olive y Banáth, 2006). El parámetro de daño utilizado como indicador de daño del ADN de células expuestas a los tratamientos, fue la "longitud del cometa", medida con un micrómetro en 100 células seleccionadas aleatoriamente. Se establecieron cinco categorías o niveles de daño: sin daño (0-12 µm), daño bajo (13-35 µm), daño medio (36-58 µm), daño alto (58-82 µm) y daño total (>100 µm) (Rodríguez et al. 2002).

Prueba de mutagenicidad (*Test de Ames*)

Se emplearon cepas mutantes de *Salmonella typhimurium* (TA98 y TA100) para evaluar la actividad mutagénica de las bioformulaciones. La cepa TA98 permite identificar mutaciones por corrimiento de marco de lectura (frameshift), mientras que la cepa TA100 detecta mutaciones puntuales en diferentes genes del operón de histidina. Estas mutaciones fueron diseñadas para ser sensibles a agentes mutagénicos que actúan mediante diversos mecanismos (Mortelmans y Zeiger, 2000).

El efecto mutagénico se evaluó en presencia y ausencia de enzimas metabolizadoras de xenobióticos, específicamente oxigenasas del citocromo P450 (CYP), contenidas en la fracción microsomal (S9) de hígado de rata macho (Moltox, Molecular Toxicology, Inc) a una concentración del 10 %. Como controles positivos, se emplearon daunomicina para la cepa TA98 y 4-nitroquinolina (4NQ) para la cepa TA100.

Inicialmente, las cepas TA98 y TA100 se cultivaron individualmente y alícuotas de cada cultivo bacteriano fueron tratadas con concentraciones distintas de las bioformulaciones y S9 o PBS. Posteriormente, se determinó el número de colonias revertantes y se calculó el índice de mutagenicidad (IM) mediante la ecuación:

$$IM = \frac{\text{Número promedio de colonias revertantes por tratamiento}}{\text{Número promedio de colonias revertantes del control negativo}}$$

Las bioformulaciones en estudio se clasificaron según su índice de mutagenicidad en tres categorías: fuertemente mutagénico (IM > 2), débilmente mutagénico (IM entre 1 y 2) y no mutagénico (IM ≤ 1).

Pruebas de eficacia *in situ* en ambientes relevantes

Pruebas de eficacia en cultivos exportadores de aguacate

Para evaluar la capacidad de las formulaciones a base de las bacterias y/o sus extractos para prevenir la aparición de enfermedades en fruto, se realizaron aplicaciones en dos cultivos exportadores seleccionados en etapa de floración y que fueron tratados y monitoreados hasta la cosecha (Predio #1 y Predio #2). Posteriormente, los frutos de los árboles tratados fueron cosechados y

trasladados al laboratorio de UFCB, donde se incubaron a temperatura ambiente hasta una ligera sobremaduración. Se evaluó la incidencia de *Body Rot* (pudrición en pulpa) y *Stem End Rot* (pudrición de pedúnculo) mediante cortes longitudinales en los frutos. Los tratamientos aplicados fueron la emulsión de *B. velezensis* HOB008-290 (Bacilo CIB), producto de control químico comercial, producto de control biológico comercial y agua como control absoluto. Cada tratamiento fue aplicado en por lo menos 5 árboles, y se analizaron por lo menos 20 frutos por tratamiento.

Pruebas de eficacia en condiciones de planta empacadora

Para evaluar la eficacia de las bioformulaciones de *B. velezensis* HOB008-290 y el extracto de *S. marcescens* ARP5.1 en condiciones similares a las de una planta empacadora, se seleccionaron frutos de aguacate Hass de calidad de exportación, recién cosechados y sin tratamientos poscosecha. Los tratamientos se aplicaron siguiendo un protocolo estandarizado de inmersión durante 2 minutos, seguido de aspersion manual homogénea con 100 mL de la misma solución sobre cada grupo de frutos. Los tratamientos ensayados se detallan en la Tabla 3.1 e incluyeron aplicaciones individuales y combinadas de los bioproductos, así como controles químicos y absolutos.

Tabla 3.1

Tratamientos aplicados en condiciones de planta empacadora

	Tratamiento	Inmersión	Aspersion
T1	Control (Agua)		Control (Agua)
T2		Emulsión <i>B. velezensis</i> (8 mL/L)	Emulsión <i>B. velezensis</i> (8 mL/L)
T3		Emulsión <i>B. velezensis</i> (8 mL/L)	Extracto ARP5.1 (0.8 g/L)
T4		Extracto ARP5.1 (0.8 g/L)	Extracto ARP5.1 (0.8 g/L)
T5	Control (Manejo convencional con Procloraz) (1 ml/L)		Control (Manejo convencional con Sulfato de cobre pentahidratado) (1 ml/L)

Fuente: Elaboración propia

Cada tratamiento se aplicó sobre un lote de al menos 20 frutos distribuidos en dos repeticiones. Tras la aplicación, los frutos fueron almacenados a temperatura ambiente (22–25 °C) y monitoreados hasta alcanzar una ligera sobremaduración (7–10 días). La eficacia fue determinada con base en la

incidencia porcentual de *Body Rot* (pudrición en pulpa) y *Stem End Rot* (pudrición en pedúnculo), evaluadas mediante cortes longitudinales e inspección visual de síntomas.

Resultados y discusión

Caracterización de los microorganismos aislados

Entre los 667 microorganismos aislados (bacterias y hongos) a partir de las diferentes muestras (suelo rizosférico, raíces, hojas, flores, frutos) de cultivos de aguacate del departamento de Antioquia (Colombia), se cuentan tanto microorganismos patógenos como con potencial benéfico por sus capacidades como biocontroladores, biofertilizantes, bioestimulantes, etc. Algunos de estos microorganismos han sido depositados en la colección de microorganismos inscrita en el Registro Único Nacional de Colecciones Biológicas (RNC) del Instituto von Humboldt (MicroCIB #223) (Tabla 3.2).

Tabla 3.2

Microorganismos aislados de cultivos comerciales de aguacate

Origen	Tipo	Actividad	#
Raíz	Oomicete	Patógeno	98
Raíz	Hongo	Patógeno	3
Fruto	Hongo	Patógeno	17
Rizósfera	Bacteria	Benéfico	158
Hoja	Bacteria	Benéfico	1

Fuente: Elaboración propia

Entre los patógenos radiculares identificados en este estudio se encuentran *P. cinnamomi*, *Cylindrocladiella* sp. e *Ilyonectria* sp., mientras que entre los patógenos de fruto se detectaron *L. theobromae*, *Pestalotiopsis* sp., *Diaporthe sojajae* y *Colletotrichum gloeosporioides*.

Por otro lado, los microorganismos con potencial benéfico incluyen especies del género *Bacillus*, como el complejo *B. subtilis* y *B. siamensis*, así como *S. marcescens* y *S. plymuthica*. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Tzecz et al. (2020) en cultivos de aguacate de México, donde identificaron bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) de los géneros *Bacillus* y *Serratia*.

Además, estos autores describieron la producción de compuestos bioactivos por cepas de *Stenotrophomonas* sp. y la actividad entomopatógena de una cepa de *Chryseobacterium* sp. contra el trips del aguacate (*Scirtothrips perseae*).

De manera similar, Guevara et al. (2017) identificaron bacterias de la rizosfera de árboles de aguacate en California (EE.UU.) con capacidad para inhibir el crecimiento de patógenos relevantes para el cultivo, como *Fusarium euwallaceae*, *Graphium* sp. y *P. cinnamomi*. Estas bacterias pertenecían al complejo *B. subtilis*, y además se registró un aislamiento interesante de *B. mycoides*, que inhibió el crecimiento de *P. cinnamomi* hasta en un 25%.

Ensayos *in vitro* de antagonismo

Entre las cepas aisladas en los proyectos de investigación del grupo, *S. marcescens* ARP5.1 y sus extractos han mostrado el mayor potencial para inhibir al oomicete *P. cinnamomi*, principal agente causal del complejo marchitez en el aguacate (Tabla 3.3) (Granada et al. 2018). Por otro lado, *B. velezensis* HOB008-290 ha demostrado un alto potencial para reducir la incidencia de enfermedades del fruto de aguacate en la poscosecha, inhibiendo patógenos como *C. gloeosporioides*, *Phomopsis* sp. y *L. theobromae* (Montoya, 2021).

Tabla 3.3

Concentración Mínima Inhibitoria *in vitro* del extracto de *S. marcescens* ARP5.1 frente a *C. gloeosporioides* y *P. cinnamomi* después de 7 días de incubación. SD: desviación estándar; Δ OD: diferencia de densidad óptica a 595 nm

<i>C. gloeosporioides</i>			<i>P. cinnamomi</i>		
Concentración del extracto ($\mu\text{g.mL}^{-1}$)	Δ OD	SD	Concentración del extracto ($\mu\text{g.mL}^{-1}$)	Δ OD	SD
1000.0	0.021	\pm 0.009	50.0	0.052	\pm 0.034
500.0	0.043	\pm 0.041	25.0	0.053	\pm 0.039
250.0	0.041	\pm 0.051	12.5	0.046	\pm 0.042
125.0	0.082	\pm 0.053	6.3	0.078	\pm 0.053
62.5	0.123	\pm 0.111	3.1	0.117	\pm 0.091
31.1	0.256	\pm 0.123	1.6	0.351	\pm 0.123
15.6	0.531	\pm 0.163	0.8	0.741	\pm 0.136
Control	1.596	\pm 0.142	Control	0.864	\pm 0.125

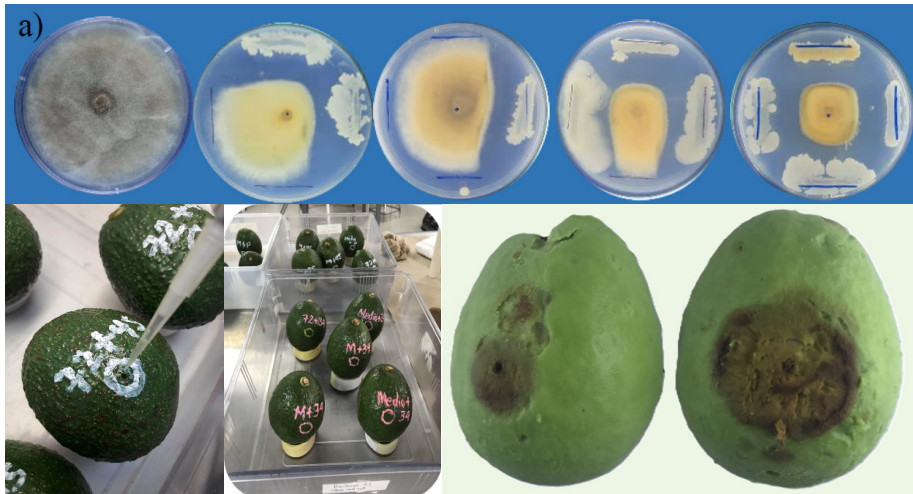
Fuente: Elaboración propia

Pruebas de eficacia *in vivo* en condiciones de laboratorio

En experimentos *in vivo*, cuando los frutos fueron inoculados mediante heridas, *B. velezensis* HOB008-290 logró una protección promedio del 34.4% frente a *C. gloeosporioides* y del 100% frente a *L. theobromae*. En frutos con infección natural, la aplicación de *B. velezensis* HOB008-290 a una concentración de 1×10^8 células/mL redujo el desarrollo promedio de *Body Rot* al 0.37% y previno completamente el desarrollo de *Stem End Rot* (Figura 3.1).

Figura 3.1

Pruebas de antagonismo. a) In vitro: Enfrentamiento de C. gloeosporioides con bacterias aisladas. b) In vivo: Inoculación de C. gloeosporioides en aguacates tratados con bacterias biocontroladoras



Fuente: Elaboración propia

Optimización de la producción de antagonistas bacterianos

Según lo reportaron Granada y colaboradores en 2018, la producción de compuestos bioactivos por *S. marcescens* ARP5.1 ocurrió principalmente, pero no exclusivamente, durante la fase estacionaria del cultivo. Las mejores fuentes de carbono y nitrógeno fueron maltosa y extracto de levadura, en concentraciones del 1% y 0.25%, respectivamente. Después de 20 horas, la fermentación alcanzó su máxima concentración de biomasa (4.8 g L^{-1}) y la

mayor actividad inhibitoria contra el patógeno (*P. cinnamomi*). Además, la actividad inhibitoria se mantuvo constante entre las 20 y 96 horas de fermentación (Tabla 3.4).

Tabla 3.4

Parámetros de fermentación en un biorreactor de tanque agitado para S. marcescens ARP5.1 bajo diferentes condiciones operativas (Granada et al. 2018)

Parámetro	150 rpm / 0.5 vvm	300 rpm / 0.5 vvm	450 rpm / 1.5 vvm	600 rpm / 0.5 vvm	600 rpm / 0.0 vvm
M	0.22	0.16	0.19	0.30	0.05
Td	3.15	4.33	3.67	2.31	13.86
Y _{x/s}	0.84	0.86	0.90	0.84	0.18
%DO _{min}	0.0	0.0	49.9	42.8	0.0
X _{max}	4.8	4.92	5.24	3.63	1.08

Nota: Nomenclatura: μ : tasa de crecimiento celular específica (h^{-1}), t_d : tiempo de duplicación del cultivo celular (h), X_{max} : concentración máxima de biomasa ($g L^{-1}$), $Y_{x/s}$: rendimiento de biomasa (adimensional), %DO_{min}: porcentaje mínimo de oxígeno disuelto ($g O_2 L^{-1}$).

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, la velocidad de agitación más adecuada para la producción de compuestos bioactivos por *S. marcescens* ARP5.1 fue 450 rpm. En cuanto a la aireación, se encontró que la producción de compuestos activos de interés (Serratamolide A, Prodigiosin y Haterumalide NA) era dependiente del oxígeno, pero no se establecieron diferencias en las actividades inhibitorias entre 0.5, 1.0 y 1.5 vvm (Granada et al. 2018). El trabajo de Granada et al. (2018) representa el primer reporte del efecto del oxígeno disuelto en la producción de metabolitos secundarios en *S. marcescens*, registrando una reducción significativa en la actividad del extracto cuando se utilizaron condiciones de baja o nula aireación en las fermentaciones de *S. marcescens* ARP5.1. Wang et al. (2024) también buscaron optimizar los componentes del medio de cultivo de *S. marcescens* para incrementar la producción de Prodigiosina (PG) mediante metodología de superficie de respuesta. La composición óptima del medio fue sacarosa (16.29 g/L), peptona (11.76 g/L), Tween 80 (2.64 g/L), $MgSO_4$ y $FeSO_4$ (2 g/L) y prolina (1 g/L), con un pH de 7.2–7.4. Estas condiciones permitieron un aumento de 65 veces en la producción de PG, alcanzando una

concentración de 1653.95 ± 32.12 mg/L. Mientras que las condiciones óptimas de extracción fueron una relación solvente/líquido de fermentación de 9.12:1, una temperatura de extracción de 25.35 °C y un tiempo de extracción de 30.33 minutos. Se utilizó metanol al 100 % (pH = 2) como solvente, lo que resultó en una producción final de PG de 2142.75 ± 12.55 mg/L.

Con respecto a la producción de *B. velezensis* HOB008-290, los resultados indicaron que las fuentes de carbono más eficientes fueron la sacarosa y el glicerol, optándose por la sacarosa debido a su menor costo y menor viscosidad, lo que facilita su manipulación en procesos industriales. En cuanto a la fuente de nitrógeno, la caseína presentó el mejor desempeño. Las condiciones óptimas de fermentación, establecidas en 30 °C y 190 rpm durante 48 horas, permitieron alcanzar una alta concentración de endosporas (3×10^{10} esporas/mL), lo que sugiere su viabilidad para la producción a escala industrial (Montoya, 2021).

Desarrollo y caracterización de bioformulaciones de células bacterianas o sus extractos

La bioformulación líquida de *B. velezensis* HOB008-290 se obtuvo como una emulsión homogénea, de consistencia cremosa, sin olor y de color beige. El análisis del tamaño de partícula mostró un diámetro promedio en área de 0.86 μm y en volumen de 1.87 μm . El potencial zeta de -39 mV sugiere un sistema coloidalmente metaestable. Además, el ángulo de contacto de avance de 79° indica una interacción predominantemente hidrofílica con tendencia hidrofóbica, mientras que la tensión superficial de 34 mN/m permitió calcular un trabajo de adhesión de 40.5 mJ/m² con la cáscara de aguacate, utilizando la ecuación de Young-Dupré.

En cuanto a la estabilidad del producto, se evaluaron lotes almacenados por hasta seis meses, manteniéndose parámetros como pH (6.0-7.0), densidad (0.992-1.011 g/mL) y ausencia de contaminantes. La concentración celular y de endosporas osciló entre 2×10^{12} y 2×10^{13} UFC/mL, con una actividad antagonista frente a *C. gloeosporioides* del 90 al 100 % según la dosis aplicada (1-3 mL/L). Estos resultados confirman la estabilidad y efectividad del bioformulado a lo largo del tiempo.

Pruebas de citotoxicidad, genotoxicidad y mutagenicidad

Prueba de proliferación celular en la línea HaCat: MTT

Con el extracto metabólico de *S. marcescens* ARP5.1, la viabilidad celular disminuyó por debajo del 50% entre 3.05 y 25.000 ppm, pero concentraciones menores a 1.53 ppm no afectaron la estabilidad mitocondrial. En el caso del Procloraz estándar, usado como control, el compuesto redujo la viabilidad celular en concentraciones de 0.019 ppm y superiores a 1.25 ppm, mientras que concentraciones inferiores a 0.0095 ppm no mostraron citotoxicidad. Se observó que el solvente (DMSO) podría influir en la citotoxicidad a concentraciones más altas.

Por otro lado, el extracto metabólico de *B. velezensis* HOB008-290 mostró una disminución en la viabilidad celular a partir de 0.071 g/mL, mientras que concentraciones inferiores a 0.036 g/mL no fueron citotóxicas. En cuanto a la emulsión, solo la concentración más alta (100%) redujo drásticamente la viabilidad, lo que sugiere que la toxicidad podría deberse a la emulsión en sí o a su solvente.

Evaluación de genotoxicidad mediante electroforesis alcalina de células individuales (*Comet Assay*)

Tanto el extracto de *S. marcescens* ARP5.1 como el estándar de Procloraz causaron daño en el ADN en comparación con el control negativo, con diferencias estadísticamente significativas ($p=0.001$). Sin embargo, más del 95% de las células tratadas con Procloraz estándar no presentaron daño detectable, mientras que con el extracto de *S. marcescens* ARP5.1, aproximadamente el 75% de las células no mostraron daño y el 25% restante presentó daño leve. Estos resultados sugieren que el extracto de *S. marcescens* ARP5.1 podría inducir una mayor frecuencia de daño en el ADN en comparación con el Procloraz estándar.

En el caso de *B. velezensis* HOB008-290, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos y el control negativo, lo que indica que ni el extracto bacteriano ni la emulsión causaron daño al ADN en las células HaCat. Además, el 100% de las células tratadas con ambas formulaciones se clasificaron en la categoría "sin daño".

Prueba de mutagenicidad (*Test de Ames*)

El extracto de *S. marcescens* ARP5.1 no mostró citotoxicidad en ninguna de las concentraciones evaluadas, mientras que el Procloraz estándar presentó citotoxicidad solo a 10 ppm. En ambos casos, el análisis estadístico no evidenció diferencias significativas en la tasa de reversión mutagénica en presencia o ausencia de activación metabólica, lo que indica que los compuestos no presentan potencial mutagénico en las condiciones del ensayo.

Además, el test de Ames mostró que ni el extracto metabólico de *B. velezensis* HOB008-290 ni su formulación presentaron efectos mutagénicos en las cepas *Salmonella typhimurium* TA98 y TA100, tanto en presencia como en ausencia de activación metabólica, sin diferencias significativas respecto al control negativo.

Lo anterior, indica que el extracto de *S. marcescens* ARP5.1 no es mutagénico en el test de Ames, pero sí muestra cierto nivel de citotoxicidad y daño en el ADN en células humanas en cultivo. Su seguridad dependerá de la concentración utilizada y del tipo de exposición. Para considerarlo seguro en aplicaciones humanas o ambientales, se necesitarían estudios adicionales sobre su metabolismo, reparación del daño en el ADN y efectos en modelos más complejos. Mientras que tanto el extracto metabólico de *B. velezensis* HOB008-290 como su emulsión son seguros en las concentraciones evaluadas, sin efectos mutagénicos ni daño en el ADN. Solo la concentración más alta de la emulsión mostró citotoxicidad, lo que sugiere que su seguridad depende de la dosis y de los componentes de la formulación.

En comparación con otros bioinsumos del mercado, la emulsión de *B. velezensis* HOB008-290 y el extracto de *S. marcescens* ARP5.1 presentan perfiles de seguridad diferenciados. La emulsión mostró alta estabilidad y efectividad en el control de *C. gloeosporioides*, sin efectos mutagénicos ni daño en el ADN en células humanas, aunque su citotoxicidad en concentraciones elevadas sugiere que su formulación debe ajustarse para garantizar su inocuidad. Por otro lado, el extracto de *S. marcescens* ARP5.1, aunque no presentó mutagenicidad en el test de Ames, mostró citotoxicidad en concentraciones superiores a 3.05 ppm y causó daño en el ADN en un 25% de las células evaluadas en el ensayo cometa, lo que indica un mayor riesgo genotóxico.

Desde el punto de vista regulatorio, ambos productos deben cumplir con normativas estrictas para su aprobación como bioinsumos agrícolas. La ausencia de mutagenicidad y genotoxicidad en *B. velezensis* HOB008-290 respalda su

potencial para ser registrado bajo regulaciones como las de la EPA (EE.UU.) y la EFSA (Unión Europea), aunque su formulación deberá optimizarse para evitar citotoxicidad en dosis elevadas. En contraste, el extracto de *S. marcescens* ARP5.1 podría enfrentar mayores restricciones debido a su posible efecto genotóxico, ya que la legislación internacional prioriza la seguridad de los bioinsumos en términos de toxicidad y riesgo ambiental.

Para su posible aplicación en la agroindustria, se requieren estudios adicionales que evalúen el metabolismo de ambos productos en diferentes condiciones, su impacto en organismos no objetivo y la persistencia en el ambiente. Mientras que *B. velezensis* HOB008-290 muestra un perfil más seguro para su desarrollo comercial, el extracto de *S. marcescens* ARP5.1 necesitaría una caracterización más profunda de sus efectos a largo plazo y posibles estrategias de reformulación para reducir su citotoxicidad y genotoxicidad.

Pruebas de eficacia *in situ* en ambientes relevantes

Pruebas de eficacia en cultivos exportadores de aguacate

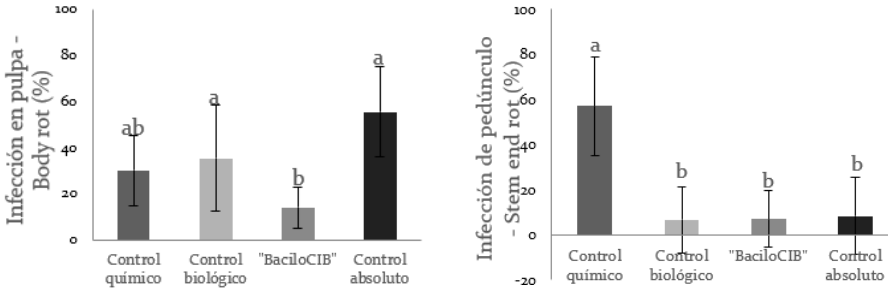
En el predio 1, los resultados mostraron que la bioformulación de *B. velezensis* HOB008-290 logró prevenir la pudrición en pulpa con una eficacia significativamente mayor que los controles químicos y biológicos. Sin embargo, debido a la baja prevalencia de la pudrición en pedúnculo en esta finca, no fue posible determinar su efecto sobre esta enfermedad. Se observó que el tratamiento químico con oxiclورو de cobre podría haber inducido toxicidad en los frutos, generando síntomas similares a los de la infección fúngica (Figura 3.2).

En el predio #2, la bioformulación de *B. velezensis* HOB008-290 nuevamente mostró una alta eficacia en la prevención de infecciones en pulpa, con niveles comparables al control biológico comercial. Además, a diferencia del primer predio, se evidenció un efecto positivo en la reducción de la pudrición peduncular, lo que sugiere que su incidencia pudo haber sido mayor en esta finca (Figura 3.3).

A pesar de la variabilidad observada entre predios, atribuida a diferencias en condiciones climáticas, especies patógenas predominantes y manejo agronómico, los resultados demuestran que el prototipo de formulado a base de *B. velezensis* HOB008-290 tiene un alto potencial como estrategia biológica preventiva contra la antracnosis en aguacate Hass durante la poscosecha.

Figura 3.2

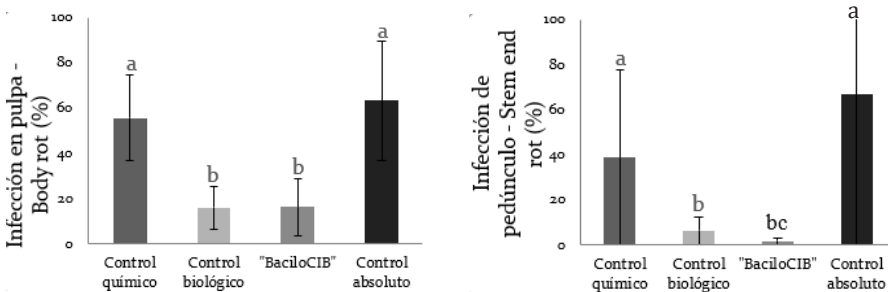
Efecto de los tratamientos para la prevención de Body Rot y Stem End Rot en el predio #1. Las letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos según la prueba de Kruskal-Wallis ($p < 0.05$), seguida de prueba post-hoc de comparaciones múltiples. Control químico: oxiclóruo de cobre; Control biológico: formulado comercial a base de *B. subtilis*; BaciloCIB: formulación con *B. velezensis* HOB008-290; Control absoluto: sin tratamiento



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.3

Efecto de los tratamientos para la prevención de Body Rot y Stem End Rot en el predio #2. Las letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos según la prueba de Kruskal-Wallis ($p < 0.05$), seguida de prueba post-hoc de comparaciones múltiples. Control químico: oxiclóruo de cobre; Control biológico: formulado comercial a base de *B. subtilis*; BaciloCIB: formulación con *B. velezensis* HOB008-290; Control absoluto: sin tratamiento



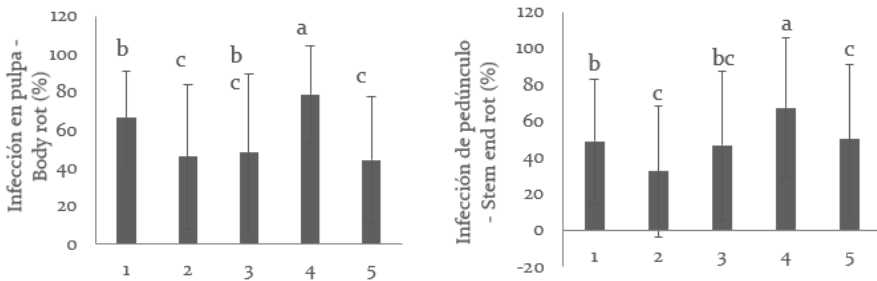
Fuente: Elaboración propia

Pruebas de eficacia en condiciones de planta empacadora

En este experimento, la bioformulación de *B. velezensis* HOB008-290 aplicada en inmersión y aspersión (T2) logró una reducción significativa de *Body Rot*, con un nivel de control comparable al tratamiento químico estándar (T5). Además, fue el tratamiento más efectivo en la disminución de *Stem End Rot*, con una incidencia del 32.24%, lo que indica su potencial en el manejo poscosecha del aguacate (Figura 3.4).

Figura 3.4

*Efecto de los tratamientos para el control de Body Rot y Stem End Rot en la poscosecha. Las letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos según la prueba de Kruskal-Wallis ($p < 0.05$), seguida de prueba post-hoc de comparaciones múltiples. 1. Agua-Agua; 2. BaciloCIB (8mL/L)-BaciloCIB (8mL/L); 3. Emulsión de *B. velezensis* (8ml/L)-Extracto de *S. marcescens* (0.8 g/L). 4. Extracto de *S. marcescens* (0.8 g/L) Extracto Extracto de *S. marcescens* (0.8 g/L) 5. Procloraz (1ml/L)- Sulfato de cobre pentahidratado (1 ml/L)*



Fuente: Elaboración propia

En general, los resultados obtenidos en esta etapa de desarrollo indican que la bioformulación de *B. velezensis* HOB008-290, aplicada sola o en combinación con extractos biológicos, tiene un alto potencial como estrategia preventiva en campo y para el manejo poscosecha del aguacate, alcanzando niveles de control comparables a los tratamientos químicos convencionales. No obstante, su efectividad puede verse afectada por la interacción con otros productos, lo que hace necesario optimizar su formulación y protocolo de aplicación para su implementación a escala comercial. Además, entre las formulaciones evaluadas, esta presenta el mayor potencial comercial, no solo

a nivel técnico, sino también por estudios de mercado y análisis de costos que se han adelantado, aunque no son objeto del presente documento.

Conclusiones

El desarrollo de bioinsumos eficaces y de alta calidad requiere un proceso de investigación riguroso que abarque desde la identificación de microorganismos con potencial biocontrolador hasta la validación de su efectividad en condiciones reales de campo y poscosecha. En este estudio, la bioformulación a base de *B. velezensis* HOB008-290 demostró ser una alternativa viable para el manejo preventivo y poscosecha del aguacate, alcanzando niveles de control comparables a los tratamientos químicos convencionales. Sin embargo, su desempeño puede verse influenciado por factores como la interacción con otros productos y las condiciones de aplicación, lo que resalta la importancia de optimizar su formulación y protocolo de uso antes de su escalamiento comercial.

Estos resultados evidencian que la bioprospección, el diseño racional de formulaciones y la evaluación *in vitro* e *in vivo* son pasos fundamentales en el desarrollo de bioinsumos que sean no solo efectivos, sino también seguros y competitivos en el mercado. La integración de metodologías avanzadas para caracterización microbiológica, estabilidad de formulaciones y evaluación toxicológica permite garantizar que estos productos cumplan con los estándares de calidad y normativas vigentes, facilitando su aceptación en la agroindustria.

En este sentido, la inversión en investigación y desarrollo es clave para ofrecer soluciones innovadoras que reduzcan la dependencia de agroquímicos, contribuyan a la sostenibilidad agrícola y respondan a las crecientes exigencias del mercado en términos de eficacia, seguridad y viabilidad económica.

Referencias

Ayilara, M. S., Adeleke, B. S., Akinola, S. A., Fayose, C. A., Adeyemi, U. T., Gbadegesin, L. A., ... & Babalola, O. O. (2023). Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytopesticides, and nanobiopesticides. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1040901.

- Bedoya, J. C., Dealis, M. L., Silva, C. S., Niekawa, E. T. G., Navarro, M. O. P., Simionato, A. S., ... & Andrade, G. (2019). Enhanced production of target bioactive metabolites produced by *Pseudomonas aeruginosa* LV strain. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 17, 653-664.
- Bosmans, L., Bruijn, I., Mot, R., Rediers, H., & Lievens, B. (2016). Agar composition affects *in vitro* screening of biocontrol activity of antagonistic microorganisms. *Journal of Microbiological Methods*, 127, 7-9. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2016.05.004>
- Calle, C., Gonzales, E. P., Arango, R. E., & Saldamando, C. I. (2020). Isolation and identification of *Phytophthora cinnamomi* collected in avocado (*Persea americana*) from Northeast Colombia. *Tropical Plant Pathology*, 45, 402-414.
- Cañas, G. P., & Arango, R. E. (2019). Microsatellites revealed genetic diversity and population structure in Colombian avocado (*Persea americana* Mill.) germplasm collection and its natural populations. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 11(4), 106-119.
- Cañas, G. P., Sepulveda, S., López, F., Navas, A. A., & Cortés, A. J. (2022). Inheritance of yield components and morphological traits in avocado cv. Hass from “criollo” “elite trees” via half-sib seedling rootstocks. *Frontiers in plant science*, 13, 843099.
- Drummond, A. J., Ashton, B., Buxton, S., Cheung, M., Cooper, A., Duran, C., Field, M., Heled, J., Kearse, M., Markowitz, S., Moir, R., Stones, S., Sturrock, S., Thierer, T. & Wilson, A. (2012) accession date Geneious, v5.4. <http://www.geneious.com>
- Granada, S. D., Ramírez, S., López, L., Peláez, C. A., & Bedoya, J. C. (2018). Screening of a biological control bacterium to fight avocado diseases: from agroecosystem to bioreactor. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 14, 109-115.
- Granada, S. D. (2019). Metabolitos secundarios microbianos como alternativa de control frente a fitopatógenos del aguacate (*Persea americana* Mill.) (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia (UNAL)).
- Granada García, S.D., Rueda Lorza, A., Peláez, C.A., (2014). Antimicrobial activity of extracellular metabolites from antagonistic bacteria isolated from potato (*Solanum phureja*) crops. *Summa Phytopathol*, 40, 212-220. <https://doi.org/10.1590/0100-5405/1953>

- Granada, S. D., López, L., Ramírez, S., Morales, J., Peláez, C., Andrade, G., & Bedoya, J. C. (2020). Bacterial extracts and bioformulates as a promising control of fruit body rot and root rot in avocado cv. Hass. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(3), 748-758.
- Guevara, E., Carrillo, J. D., Ndinga, C. et al. (2018). Antifungal activity of avocado rhizobacteria against *Fusarium euwallaceae* and *Graphium* spp., associated with *Euwallacea* spp. nr. *forficatus*, and *Phytophthora cinnamomi*. *Antonie van Leeuwenhoek*, 111, 563-572. <https://doi.org/10.1007/s10482-017-0977-5>
- Hamada, M. A., & Mohamed, E. T. (2024). Characterization of *Serratia marcescens* (OK482790) prodigiosin along with *in vitro* and *in silico* validation for its medicinal bioactivities. *BMC Microbiology*, 24, 495. <https://doi.org/10.1186/s12866-024-03634-5>
- Harch, S. A. J., Jenkins, F., Farhat, R., & van Hal, S. J. (2025). Complexities in species identification for *Serratia marcescens* complex for the modern microbiology laboratory. *Microbiology Spectrum*, 13, e01361-24. <https://doi.org/10.1128/spectrum.01361-24>.
- Marasco, R., Rolli, E., Fusi, M., Michoud, G., & Daffonchio, D. (2018). Grapevine rootstocks shape underground bacterial microbiome and networking but not potential functionality. *Microbiome*, 6, 1-17.
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (2021). Convocatoria para el apoyo a programas y proyectos de I+D+i que contribuyan a resolver los desafíos establecidos en la misión "Bioeconomía para una Colombia potencia viva y diversa hacia una sociedad impulsada por el conocimiento". https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo_9_-_niveles_de_madurez_tecnologica_-_trl.pdf
- Montoya, M. P. (2021). Evaluación de bacterias antagonistas para el control de enfermedades en poscosecha de aguacate Hass. [Trabajo de pregrado no publicado]. Universidad de Antioquia.
- Mortelmans, K., & Zeiger, E. (2000). The Ames Salmonella/microsome mutagenicity assay. *Mutation research/fundamental and molecular mechanisms of mutagenesis*, 455(1-2), 29-60.
- Olive, P. L., & Banáth, J. P. (2006). The comet assay: a method to measure DNA damage in individual cells. *Nature protocols*, 1(1), 23-29.

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2025). *Avocado production*. <https://ourworldindata.org/grapher/avocado-production?tab=table&time=2014..latest&mapSelect=~COL&tableFilter=countries>
- Prasad, R. D., Chandrika, K. S. V. P., & Godbole, V. (2020). A novel chitosan biopolymer based *Trichoderma* delivery system: Storage stability, persistence and bio efficacy against seed and soil borne diseases of oil seed crops. *Microbiological research*, 237, 126487.
- Ramírez, S., Arias, J. D., Bedoya, J. C., Rueda, E. A., Sánchez, Y., & Granada, S. D. (2015). Metabolites produced by antagonistic microbes inhibit the principal avocado pathogens *in vitro*. *Agronomía Colombiana*, 33(1), 58-63.
- Ramírez, J. G., & Morales, J. G. (2021). Diseases and disorders associated with different stages of crop development and factors that determine the incidence in Hass avocado crops. *Revista Ceres*, 68(1), 71-82.
- Ramírez, S., Calle, C., Arbeláez, L. M., Bedoya, J. C., Hoyos, R. A., & Granada, S. D. (2021). Siderophore containing extract from *Serratia plymuthica* AED38 as an efficient strategy against avocado root rot caused by *Phytophthora cinnamomi*. *Biocontrol Science and Technology*, 31(3), 284-298.
- Rani, L., Thapa, K., Kanojia, N., Sharma, N., Singh, S., Grewal, A. S., ... & Kaushal, J. (2021). An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. *Journal of cleaner production*, 283, 124657.
- Rodríguez, G., Cancino, L., López, M., Palermo, A., Mudry, M., González, P., & Carballo, M. A. (2002). DNA single strand breaks in peripheral blood lymphocytes induced by three nitroimidazole derivatives. *Toxicology Letters*, 132(2), 109–115.
- Sanmartín, P., López X., Pemberthy, M. P., Granada, D. & Rueda, E.A. (2012). Análisis del modo de acción de la capacidad antagónica de *Trichoderma asperellum* sobre *Colletotrichum gloeosporioides* y *Fusarium* sp. *Rev. Tumbaga*, 2, 29-49.
- Sarin, J., Vuorenmaa, M., Vallittu, P. K., Grénman, R., Boström, P., Riihilä, P., ... & Pulkkinen, J. (2021). The viability and growth of HaCaT

cells after exposure to bioactive glass S53P4-containing cell culture media. *Otology & Neurotology*, 42(5), e559-e567.

- Talavera, A., Gonzalez, J.J., Carrasco, A., Olmo, L., & Hormaza, J.I. (2023). Avocado: Agricultural Importance and Nutraceutical Properties. In: Kole, C. (eds) *Compendium of Crop Genome Designing for Nutraceuticals*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3627-2_40-1
- Tice, R. R., Agurell, E., Anderson, D., Burlinson, B., Hartmann, A., Kobayashi, H., et al. (2000). Single cell gel/comet assay: Guidelines for *in vitro* and *in vivo* genetic toxicology testing. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 35(3), 206-21.
- Tzec, J. A., Desgarenes D., Carrión, G., Monribot, J. L., Guerrero, J. A., Ferrera, O., et al. (2020). Characterization of plant growth-promoting bacteria associated with avocado trees (*Persea americana* Miller) and their potential use in the biocontrol of *Scirtothrips perseae* (avocado thrips). *PLoS ONE*, 15(4): e0231215. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231215>
- Villamil, J. E., Blanco, J. O. & Viteri, S. E. (2012). Evaluación *in vitro* de microorganismos nativos por su antagonismo contra *Moniliophthora roreri* Cif & Par en cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 65(1), 6305-6315.
- Wang, X., Cui, Z., Zhang, Z., Zhao, J., Liu, X., Meng, G., ... & Zhang, J. (2024). Two-Step Optimization for Improving Prodigiosin Production Using a Fermentation Medium for *Serratia marcescens* and an Extraction Process. *Fermentation*, 10(2), 85.

CAPÍTULO 4

Gmelina arborea como modelo experimental en laboratorio, vivero y campo



Ximena Carolina Pulido Villamil¹
Laura Daniela Devia Grimaldo²
Lizeth Carolina Ospina Cespedes¹
Gisou Diaz Rojo³
Maryeimy Varón López¹
Jose Alexander Correa Díaz⁴
Joseph Fernando Cristancho Gomez¹
Gloria Lucia Martinez Restrepo¹
Indira García Quintero¹
Jairo Ricardo Mora Delgado¹

<https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5.cap4>

1 Departamento de Química, Grupo de Química Aplicada a Procesos Ecológicos (QUAPE), Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia.

2 Departamento de Biología, Grupo de investigación Genética y Biotecnología Vegetal, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia.

3 Departamento de Matemáticas y Estadística, Grupo de Investigación en Análisis Estadístico de la Universidad del Tolima -GINVAE-UT, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia.

4 Departamento de Producción Pecuaria, Grupo de Investigación Sistemas Agroforestales Pecuarios, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia.

Resumen

Gmelina arborea es una especie de importancia agroforestal y puede ser considerada como modelo experimental en el laboratorio, vivero y campo. En este capítulo se muestran resultados de la interacción de esta planta con el suelo y los microorganismos, a nivel de laboratorio, se enfoca en el aislamiento de solubilizadores de fosfato a partir de suelo asociado a cuatro árboles de las mejores progenies de esta especie. En vivero, se estudió el efecto de la inoculación de consorcios microbianos en la germinación y el crecimiento de la planta; en campo, se evaluó un arreglo agroforestal de callejón de pasturas de *Bohtriochloa pertusa* e interacción con esta especie. Los resultados sugieren que el suelo asociado a *G. arborea* es un reservorio de microorganismos solubilizadores de fosfato nativos y el aislamiento de estos, es más favorable en época de baja precipitación. En vivero, *G. arborea* responde a la fertilización química, pero esta puede ser sustituida hasta un 75% sin que se afecten los indicadores de crecimiento y en campo, *G. arborea* compite con éxito por espacio con *B. pertusa*, aunque puede haber una reducción del forraje debido a la interceptación de radiación fotosintéticamente activa en el dosel, que afecta la producción de materia seca.

Palabras Claves: Comunidades microbianas, Sistema agroforestal, Microorganismos promotores de crecimiento, Fosfato.

Abstract

Gmelina arborea is an important agroforestry species and can be considered an experimental model in the laboratory, nursery, and field. This chapter presents the results of the interaction of this plant with soil and microorganisms. At the laboratory level, the focus is on isolating phosphate solubilizers from soil associated with four of the best progeny trees of this species. In the nursery, the effect of inoculation of microbial consortia on plant germination and growth was studied, and in the field, an agroforestry arrangement of *Bohtriochloa pertusa* pasture alleys and its interaction with this species was evaluated. The results suggest that the soil associated with *G. arborea* is a reservoir of phosphate-solubilizing microorganisms native to tropical dry forests, and their isolation is more favorable during periods of low rainfall. In the nursery, *G. arborea* responds to chemical fertilization, but this can be replaced up to 75% without affecting growth indicators and in the field, *G. arborea* competes successfully for space with *B. pertusa*, although there may be a reduction in forage due to the interception of photosynthetically active radiation in the canopy, which affects the production of dry matter.

Keywords: Microbial communities, Agroforestry system, Growth-promoting microorganisms, Phosphate.

Cómo citar este capítulo

Pulido Villamil, X. C., Devia Grimaldo, L. D., Ospina Céspedes, L. C., Díaz Rojo, G., Varón López, M., Correa Díaz, J. A., Cristancho Gómez, J. F., Martínez Restrepo, G. L., García Quintero, I., & Mora Delgado, J. R. (2025). *Gmelina arborea* como modelo experimental en laboratorio, vivero y campo. En N. C. Higuera Mora & R. H. Posada Almanza (Eds.), *Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales* (pp. 135–166). Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO. <https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5.cap4>

Introducción

Gmelina arborea es una especie leñosa originaria de la India, su importancia agroforestal radica en los múltiples usos reportados, como en el establecimiento de plantaciones comerciales (Ramírez et al. 2011; Ramírez-Gil, 2019); puede estar asociada a cultivos de ciclo corto y gramíneas; como en sistemas de reforestación (Hernández-Castro et al. 2021). También, es una especie útil en la generación de servicios ambientales, como prácticas de conservación y recuperación de suelos (Guillermo-Ramírez, 2017) y alto potencial en el secuestro del carbono, disminuyendo esta molécula de la atmósfera, por lo cual, es una especie funcional ante el cambio climático (Tamang et al. 2021).

Dada su importancia, es necesario garantizar el desarrollo de esta planta en diferentes condiciones de ecosistemas de bosque seco tropical. Para ello, se puede usar la inoculación de bacterias, hongos y hongos micorrízicos arbusculares (Zambrano & Díaz, 2008; Hernández & Salas, 2009; Ramírez-Gil, 2019) como alternativa para mejorar la fertilidad del suelo y el crecimiento de esta planta.

Diferentes estudios se han enfocado en demostrar el papel de los microorganismos en la interacción con *G. arborea*. Por ejemplo, Zambrano y Díaz (2008) inocularon *Azospirillum brasilense* inmovilizado en microperlas de alginato y los hongos micorrízicos arbusculares *Glomus manihotis* y *Glomus occultum* en semillas de esta planta en la costa norte de Colombia, en dos sustratos de siembra, suelo y turba compactada, determinando la respuesta de la germinación y del crecimiento de plántulas, demostrándose que el mejor tratamiento fue la inoculación con *Azospirillum brasilense* y el sustrato suelo (Zambrano & Díaz, 2008). Además, se ha estudiado el efecto de la inoculación de *Glomus fasciculatum* en la zona sur de Costa Rica, evidenciándose que variables como el diámetro basal, altura total, peso seco del follaje y radicular, absorción de nutrimentos en el follaje y el sistema radicular mostraron incrementos de 16.9 % en promedio; mientras que las plantas inoculadas en campo presentaron diferencias significativas en diámetro, altura total y absorción de nutriente con un incremento en los porcentajes del 37.9, 31.7 y 32.2%, respectivamente (Hernández & Salas, 2009). También, se evaluó la dependencia, colonización y crecimiento de esta planta frente a la inoculación con *Rhizoglosum fasciculatum*, *Rhizoglosum aggregatum*, *Rhizoglosum irregulare*, *Glomus fistulosum* y *Entrophospora colombiana* en suelo de Medellín, Colombia, y a diferentes concentraciones de fósforo, demostrándose que las plantas

inoculadas con *R. fasciculatum*, *R. aggregatum*, *R. irregulare* presentaron un aumento significativo en su crecimiento (Ramírez-Gil, 2019).

El crecimiento de las plantas es la respuesta a las condiciones bióticas y abióticas del entorno, entre ellas la fertilidad del suelo; depende de las interacciones bioquímicas gobernadas por microorganismos a nivel de la rizosfera (Gupta et al. 2022; Hartmann & Six, 2023; Hermans et al. 2023). Los microorganismos se encuentran ampliamente distribuidos en el suelo, y después de las plantas representan la mayor fracción de biomasa global en la tierra; siendo las bacterias las más abundantes (15%), seguido por los hongos con un 2% y las arqueas con 1%; así, el suelo es el mayor reservorio de la diversidad microbiana en la tierra con aproximadamente más de 50.000 especies y 0.5 mg de biomasa microbiana por gramo de suelo (Banerjee & Van der Heijden, 2023).

La diversidad de la comunidad microbiana puede tener influencia directa o indirecta en la salud del suelo, planta, animal e indirectamente en la salud humana. Los efectos directos están relacionados con el ciclo de nutrientes principalmente el del nitrógeno, fósforo, hierro, entre otros; esto incluye fijación de nitrógeno, nitrificación, desnitrificación, solubilización de fosfato, formación de sideróforos y contribuir a mantener la fertilidad del suelo, etc. En cuanto a la salud de la planta, los efectos directos están relacionados con su crecimiento, productividad y nutrición (Banerjee & Van der Heijden, 2023).

La inoculación de las plantas y del suelo con microorganismos, solos o en consorcios, es una estrategia en prácticas agronómicas que contribuye a la producción sostenible, ya que promueve la eficiencia en el uso de los nutrientes, contribuyendo a mejorar la salud del suelo al reducir sustancialmente el uso de fertilizantes sintéticos y, por ende, disminuir sus efectos negativos (Maitra et al. 2021). La importancia de los microorganismos puede probarse a diferentes escalas: laboratorio, vivero y campo.

El papel de los microorganismos puede aprovecharse mediante el aislamiento y la caracterización de sus capacidades de promoción de crecimiento vegetal. En esta línea se destaca la solubilización de fosfato, actividad de gran interés para la elección de bioinoculantes a escala de laboratorio y la posterior evaluación de su efectividad en las plantas a escala de vivero y campo; por ejemplo, el uso de microorganismos solubilizadores de fosfato presentes en el suelo, pueden disminuir el uso de fertilizantes fosfatados y promover el crecimiento de las plantas (Suleimanova et al. 2023).

La respuesta de las plantas, en vivero y campo, a la biofertilización, constituye una prueba para medir el rendimiento, y en especial su capacidad de interacción con otras especies vegetales; esto es relevante cuando se trata de seleccionar especies leñosas y herbáceas para el diseño de sistemas agroforestales. Por otra parte, en las últimas cuatro décadas se ha hecho énfasis en la importancia de usar indicadores holísticos y de fácil obtención, como un criterio fundamental en la evaluación agronómica y ecofisiológica (Hunt et al. 2002).

De esta forma, evaluaciones en los viveros han demostrado que los parámetros más útiles para medir las respuestas de plantas forrajeras son el porcentaje de germinación, la tasa de crecimiento y la producción de biomasa (Melgarejo et al. 2010); en virtud de que estos indicadores integran respuestas fisiológicas y morfométricas de las plantas a diferentes tratamientos. Entre estos parámetros, la tasa de crecimiento y la producción de biomasa son los más sensibles a la inoculación con microorganismos. No obstante, esto depende de la especie evaluada y a su destinación forestal o agroforestal, por ejemplo, en *G. arborea*, la relación hoja-tallo es el parámetro más importante en la producción como forraje y el diámetro del tallo y la altura para medir su potencial maderable (Pakos, 2012).

Entre los indicadores más utilizados para evaluar calidad de suelo a escala de campo, se destacan la resistencia a la penetración (RP), un indicador de la estructura del suelo que está altamente asociado a otros atributos edáficos, por lo cual su determinación da idea del estado de otras características físicas del suelo; de hecho, la RP tiene una asociación lineal con la densidad aparente (DA), la humedad, la textura y la materia orgánica (MO) (Ramírez & Salazar, 2012; Lardy et al. 2022), de tal manera que a partir de la RP se podrían predecir los valores de los otros atributos mencionados (Domínguez et al. 2018). Agronómicamente, este es un indicador importante para la toma de decisiones ya que está asociado a la productividad de las plantas y a su incidencia en la salud edáfica; de tal manera que suelos con cultivos de sistemas radicales vigorosos, incidirán en el rendimiento de los cultivos y en la porosidad del suelo (Piñeros et al. 2019).

Por otro lado, la inoculación de microorganismos puede aumentar las interacciones de la comunidad microbiana, que conlleva a mejorar la fertilidad de los suelos, la cual es mayor en las proximidades de los árboles (Obrador et al. 2004), derivada de una intensa actividad microbiana en sitios de mayor

contenido de materia orgánica y presencia de exudados radicales; esto se refleja en la tasa de respiración de los microorganismos edáficos asociados a las raíces del componente leñoso (Piñeros et al. 2019; Durang et al. 2015).

En las plantas, la estructura del dosel es otra variable que tiene efecto sobre el suelo y las comunidades microbianas asociadas dadas sus características de posición, orientación, tamaño y forma; así, la arquitectura del dosel también puede considerarse como parte de su estructura, la cual cambia con escalas de tiempo afectadas por Accorrientes de viento, agua, y transmitancia o retención de la radiación solar (Weiss et al. 2004). Bajo esta variación del dosel, la radiación que llega al estrato rasante también es variable, por lo cual su medición es importante para entender las interacciones entre el componente leñoso, herbáceo y microorganismos en un sistema agroforestal. Así, la radiación fotosintéticamente activa (RAFA) medida bajo el dosel, y sobre el dosel, brinda una idea de la cantidad de luz que efectivamente llega a las plantas herbáceas, y por tanto, incide en su productividad (Rosati et al. 2021; METER, 2024).

Bajo estos antecedentes, este capítulo presenta los resultados del aislamiento de microorganismos solubilizadores de fosfato aislados de suelo asociado a *G. arborea* en un ecosistema de bosque seco tropical. Además, se evalúa el efecto de la inoculación de consorcios microbianos en plántulas de esta especie a escala de vivero, y se hacen evaluaciones en campo de un arreglo agroforestal de callejones de pastura y líneas de *G. arborea*, para monitorear las interacciones de esta especie con el componente herbáceo y el suelo (Figura 4.1).

Estos estudios fueron guiados con el propósito de generar hallazgos que validan la importancia de la interacción entre árboles y pastos potenciada por la acción de los microorganismos. En este orden, el objetivo de la presente investigación fue demostrar como *G. arborea* constituye un modelo experimental en laboratorio, vivero y campo de las interacciones suelo-planta-microorganismos.

Metodología

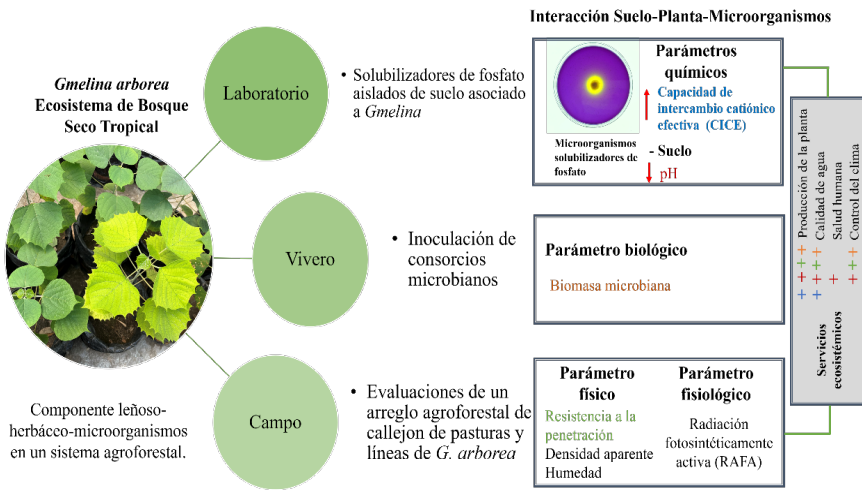
Área de estudio

Las evaluaciones se realizaron a nivel de laboratorio, vivero y campo. Los primeros se desarrollaron en los laboratorios de Microbiología y Micorrizas (LMM) y en el de Ecofisiología Tropical (LEFT), los de vivero en el campus

de Santa Helena y finca las Brisas, y los de campo en la finca el Recreo localizada en el municipio del Guamo y Centro Universitario Regional del Norte de la Universidad del Tolima (CURN), ubicado en el municipio de Armero, (74°54'20.25". 5° 0'37.98"). Todos espacios experimentales adscritos a la Universidad del Tolima, bajo condiciones de bosque seco tropical según Holdridge (1977).

Figura 4.1

Diagrama del modelo experimental de Gmelina arborea en laboratorio, vivero y campo y sus interacciones



Fuente: Elaboración propia

En los suelos usados para los ensayos de laboratorio, vivero y campo se les realizó la caracterización fisicoquímica, la cual fue llevada a cabo por Agrilab Laboratorios S.A.S. En este análisis se tuvieron en cuenta los parámetros pH (conductimétrico), textura (análisis directo/Método de Bouyoucos), conductividad eléctrica (CE, conductimétrico), saturación de humedad media (gravimétrico) y los siguientes parámetros fueron determinados por cálculo que incluye densidad aparente, capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), la materia orgánica, el nitrógeno total y la saturación de Magnesio (Mg), Sodio (Na), Aluminio (Al), Potasio (K), Calcio (Ca), carbono orgánico oxidable, el Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Sodio (Na) intercambiable, el Hierro (Fe) y el Manganeseo (Mn), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Boro (B), Azufre (S) y Fósforo (P).

Etapa de laboratorio

Suelo asociado a árboles adultos de *G. arborea* establecido en el CURN fue colectado para realizar los ensayos en laboratorio. Para ello, se realizaron dos muestreos del área circundante de cuatro individuos de las mejores progenies de esta especie (identificadas con las letras E, F, G y J); reconocidas mediante investigaciones previas de Melo Cruz et al. (2019). El muestreo 1 se realizó en el mes de abril de 2022 (época de alta precipitación) y el muestreo 2 se realizó en el mes de septiembre de 2023 (época de baja precipitación). Las muestras compuestas del suelo se tomaron a una profundidad de 0 a 20 cm, con un barreno tipo holandés; estas fueron transportadas y almacenadas a 4°C hasta su análisis físico, químico y microbiológico. Los dos muestreos realizados conformaron los grupos a comparar en el análisis estadístico.

Aislamiento de microorganismos solubilizadores de fosfato (PO_4^{3-})

Una vez extraídas las muestras de suelo desde campo en un rango de tiempo menor a 24h, se llevó a cabo el aislamiento de bacterias y hongos mediante la técnica de dilución seriada (Naqqash et al. 2022), a partir de 10 g de suelo suspendidos en 90 ml de solución salina al 0.85% (p/v) con agitación por 150 rpm durante una hora, se realizaron diluciones en serie de 1 ml en 10^{-3} , 10^{-4} y 10^{-5} . De cada dilución se sembró masivamente 100 μL en medio Pikovskaya (PVK) suplementado con fosfato tricálcico $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (Tabla 4.1) para detectar los microorganismos solubilizadores de PO_4^{3-} . Los cultivos se incubaron a 28°C durante cinco días y se determinaron las Unidades Formadoras de Colonia (UFC) a través de la siguiente fórmula:

$$\text{UFC/ml} = \frac{\text{Número de colonias contadas}}{(\text{volumen de la muestra en ml})(\text{factor de dilución})}$$

También, se observó la formación de un halo transparente o de acidificación de color amarillo alrededor de la colonia bacteriana y fúngica. El índice de solubilización (IS) se calculó mediante la siguiente fórmula.

$$\text{IS} = \frac{\text{Diámetro del halo (mm)} + \text{Diámetro de la colonia}}{\text{Diámetro de la colonia (mm)}}$$

De esta manera, se determinó y seleccionó el número de microorganismos solubilizadores de fosfato con $IS \geq 2.5$.

Etapa de vivero

El trabajo de vivero fue realizado en la finca experimental “Las Brisas” ubicada en Ibagué, Colombia (4°25' 35.5"N75°13'47.8"W), a 1.285 m.s.n.m., con una temperatura promedio de 22 °C, humedad relativa del 94% y precipitaciones anuales de 1.620 mm.

En la Tabla 4.1 puede verse los valores de parámetros químicos y físicos de los suelos de la finca El Recreo.

Tabla 4.1

Análisis físico-químico de suelos de la finca El Recreo, Guamo Tolima

pH	MO (%)	CICE (meq/100g)	N (%)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)	DA (g/cm ³)	Textura
5.8	1.24	6.92	0.06	2.39	51.3	949	234	1.53	F-A-Ar

pH: potencial de hidrógeno; *MO*: materia orgánica; *CICE*: Capacidad Efectiva de Intercambio Catiónico; *DA*: densidad aparente; *F*: Franco, *A*: arcilloso, *Ar*: arenoso
 Fuente: Elaboración propia

En vivero, se aplicó urea y se inoculó, en bandejas, el sustrato con un consorcio microbiano constituido *Paenibacillus taichungensis* y *Pseudomonas* sp. Se usó un testigo y tres niveles de sustitución a manera de tratamientos (T0, Urea; T1 Urea 75% +inóculo; T2 urea 50% + inóculo y T3, urea 25% + inóculo). Luego, entre el día 7 al 35 post-inoculación se registró semanalmente el número de plantas germinadas, para determinar el porcentaje de emergencia (%); para ello, se contaron todas las plántulas emergidas de más de un centímetro de altura. Una vez que más del 50% de las plantas alcanzaron la altura mínima de 10 cm se trasplantaron a bolsas en el día 42. Para ello, se separaron las plántulas provenientes de poliembrionía, para luego colocar una plántula una por bolsa de polietileno de 2.5 kg con sustrato de cascarilla de arroz y suelo en una proporción de 3:1, siguiendo las instrucciones del proveedor de la semilla. Se les proporcionó riego diario, ajustado según la precipitación y la humedad del suelo. La evaluación del crecimiento y desarrollo se llevó a cabo semanalmente, del día 60 al 123.

Etapa de campo

La fase de campo, fue realizada en la granja experimental “El Recreo” de la Universidad del Tolima y localizado a $74^{\circ}04'39''\text{W}$ y $4^{\circ}35'46''\text{N}$ en el municipio de El Guamo (Tolima). Posee una temperatura promedio de 28°C , una precipitación promedio anual de 1.400 mm con régimen bimodal y una altitud de 326 m.s.n.m.

Se sembraron 200 plantas de 30 cm de altura de *G. arborea*, inoculadas con consorcio microbiano, a una distancia de dos metros entre plántulas, sobre una pastura de *Bohtriochloa pertusa* sin fertilización. Posteriormente, se hicieron mediciones de crecimiento con una cinta métrica, se contaron las hojas y se evaluó parámetros fisiológicos como Radiación Fotosintéticamente Activa (RAFA) usando un ceptómetro Acuppar LP 80. Además, se hicieron mediciones de indicadores físicos del suelo a tres distancias del tronco de *G. arborea* (10, 50, 100 y 150 cm) como se ilustra en la Figura 4.1. Se midió resistencia a la penetración con un penetrómetro de presión; densidad aparente con muestras no disturbadas tomadas con cilindros; la humedad del suelo se calculó mediante el método gravimétrico, secando la muestra de suelo al horno por 24 horas a 110°C y estableciendo la diferencia del peso de la muestra húmeda menos el peso de la muestra seca, y se lo expresa en porcentaje. Además, un aforo del estrato herbáceo usando un marco de $50 * 50$ cm fue realizado en las tres distancias. La materia seca de tallos y hojas de *G. arborea* y forraje de *B. pertusa* se hizo en estufa siguiendo protocolos estandarizados de la AOAC (1965). La actividad microbiana en el suelo fue determinada por respirometría siguiendo el protocolo del IGAC (1990), y la biomasa microbiana con el método de Vance et al. (1987).

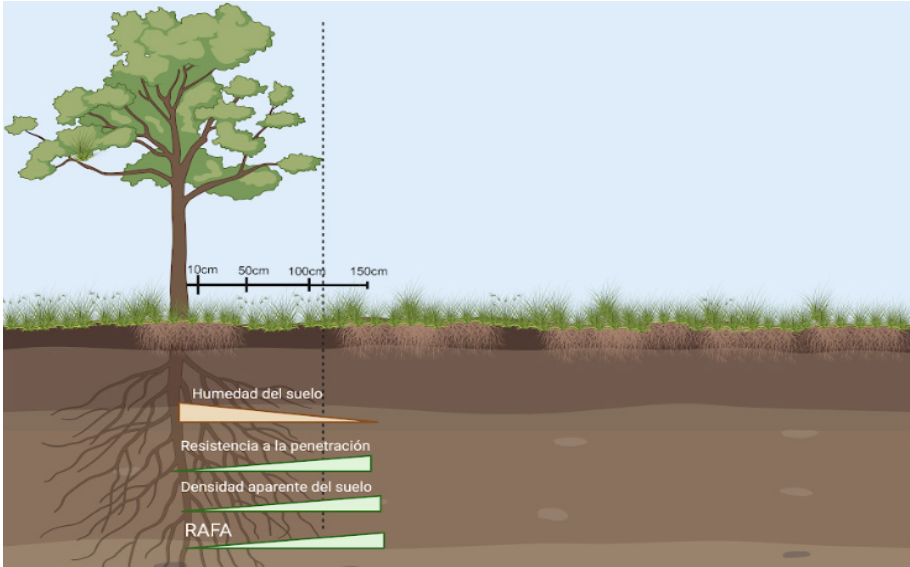
En la Figura 4.2, se representa la tendencia de las respuestas esperadas en cuanto a la resistencia a la penetración, densidad aparente, humedad del suelo y la RAFA transmitida en un sistema de *G. arborea* con *B. pertusa*.

Análisis estadístico

Para todas las variables numéricas medidas en las tres etapas se calcularon medidas de tendencia central (media y mediana) y medidas de dispersión (desviación estándar, DE y rango intercuartílico, RIC). Además, se construyeron gráficas de barras y Boxplot para mostrar el comportamiento de los grupos comparados.

Figura 4.2

Modelo analógico de los puntos de medición y sus tendencias en indicadores físicos del suelo



Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de los datos obtenidos en laboratorio, se realizó la prueba de normalidad Shapiro-Wilk y la prueba de homogeneidad de varianza de Levene. Para las variables que no presentaron distribución normal, se utilizó la prueba de Wilcoxon para comparar las dos épocas de interés, y para las variables que si presentaron normalidad como es el caso de las características fisicoquímicas del suelo, se utilizó la prueba t-Student. También, se calculó el coeficiente de correlación entre las variables de microorganismos solubilizadores de fosfato y parámetros fisicoquímicos del suelo como pH, CICE, N.A. y DA, entre otros, por medio del coeficiente de Pearson.

En el análisis de los datos de vivero y campo se realizó la prueba de normalidad Shapiro-Wilk y la prueba de homogeneidad de varianza de Levene, para todas las variables cuantitativas. Para la comparación de los tratamientos, se utilizó un análisis de varianza (ANDEVA), y se aplicó una prueba de comparaciones múltiples de Tukey para los casos en que la ANDEVA detectó diferencias significativas entre los tratamientos. Para todos los análisis estadísticos se utilizó un nivel de significancia de $\alpha=0.05$ y el software Infostat.

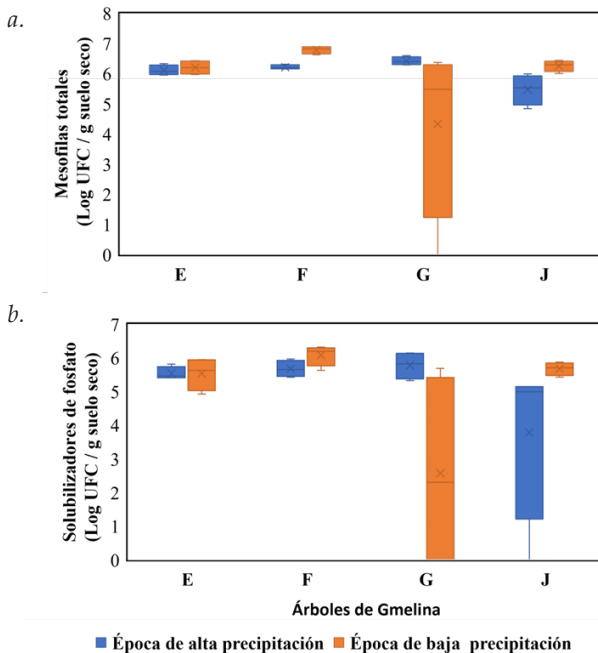
Resultados y discusión

Suelo asociado a *Gmelina arborea* como fuente de microorganismos solubilizadores de fosfato

El aislamiento de los microorganismos solubilizadores de fosfato asociados a suelo de *G. arborea*, en dos condiciones meteorológicas (alta y baja precipitación) y cuatro árboles diferentes (identificados con las letras E, F, G y J), mostró una abundancia de bacterias mesófilas totales con valores promedio entre 4.3-6.8 Log UFC/g de suelo seco y solubilizadores de fosfato con valores promedio entre 2.3-6.2 Log UFC/g de suelo seco, donde la mayoría de los solubilizadores fue obtenido bajo condiciones meteorológicas de baja precipitación como se muestra en las Figuras 4.3a y 4.3b.

Figura 4.3

Conteo de microorganismos en suelo asociado a G. arborea de la época de alta precipitación (muestreo 1) y época de baja precipitación (muestreo 2), según los árboles. A. Mesófilas totales (Log UFC totales/g de suelo seco), B. Solubilizadores de fosfato tricálcico $Ca_3(PO_4)$ (Log UFC/g de suelo seco)



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.2 muestra la media y la desviación estándar para las variables Log UFC totales y Log UFC solubilizadores de fosfato asociados a los suelos de los árboles muestreados, en conjunto con la prueba de Wilcoxon. Se observan diferencias significativas para los árboles denominados J y F, que fueron los árboles que presentaron mayor abundancia para estos grupos microbianos. Esto permitió el aislamiento de mayor número de colonias y número de solubilizadores de fosfato en el muestreo 2 (Figura 4.3a) que se realizó en una época de baja precipitación en comparación con el muestreo 1 que corresponde a una época más lluviosa.

Tabla 4.2

Resultados de la prueba de Wilcoxon de la variable número de colonias totales aislado del suelo asociado a *G. arborea* de la época de alta precipitación (muestreo 1) y época de baja precipitación (muestreo 2)

Variable	Árbol		Época de alta precipitación	Época de baja precipitación	Prueba de Wilcoxon (p)
Bacterias mesófilas Totales (Log UFC/g)	E	Media ± DE	6.1 ± 0.2	6.2 ± 0.2	0.4857
		Mediana ± RIC	6.1 ± 0.2	6.2 ± 0.4	
	F	Media ± DE	6.2 ± 0.1	6.8 ± 0.1	0.0286
		Mediana ± RIC	6.2 ± 0.1	6.8 ± 0.3	
	G	Media ± DE	6.4 ± 0.1	4.3 ± 2.9	0.1143
		Mediana ± RIC	6.4 ± 0.2	5.5 ± 6.1	
	J	Media ± DE	5.5 ± 0.5	6.3 ± 0.2	0.0286
		Mediana ± RIC	5.5 ± 0.9	6.3 ± 0.3	
Solubilizadores de fosfato (Log UFC/g)	E	Media ± DE	5.5 ± 0.2	5.5 ± 0.5	1.0000
		Mediana ± RIC	5.5 ± 0.1	5.6 ± 1.0	
	F	Media ± DE	5.7 ± 0.3	6.1 ± 0.3	0.1143
		Mediana ± RIC	5.7 ± 0.4	6.2 ± 0.6	
	G	Media ± DE	5.8 ± 0.4	2.6 ± 3.0	0.1102
		Mediana ± RIC	5.8 ± 0.8	2.3 ± 4.6	
	J	Media ± DE	3.8 ± 2.5	5.7 ± 0.2	0.0294
		Mediana ± RIC	4.9 ± 5.1	5.7 ± 0.3	

Los valores que están en negrilla corresponden a las diferencias significativas $p \leq 0.05$.
Desviación estándar (DE) y rango intercuartílico (RIC).

Fuente: Elaboración propia

Estudios similares realizados con suelo asociado a *G. arborea* han demostrado que es una fuente de microorganismos solubilizadores de fosfato dado que a partir de suelo rizosférico de estas plantaciones en Coimbatore, Tamil Nadu (India), se realizó el aislamiento de 24 microorganismos que incluyó 5 actinomicetos, 10 bacterias en medio Pikovskaya y 9 hongos con diferente morfología; algunos de los actinomicetos fueron eficaces en la solubilización de fosfatos y producen una cantidad significativa de ácido indol acético (AIA), seguido de bacterias y hongos (Mohan et al. 2018). De igual manera, se ha demostrado que a partir de diferentes muestras de zona de las raíces de *G. arborea* se han aislado microbios rizosféricos y se muestra que hay más UFC/g de suelo de bacterias en comparación a los actinomicetos y hongos (Mohan et al. 2018).

Por otra parte, en la variable solubilizadores de fosfato (Log UFC/g de suelo seco) solo existe diferencias significativas en el sitio J entre los dos muestreos (Figura 4.3b).

Así mismo, en cuanto al número de microorganismos solubilizadores de fosfato con un índice de solubilización (IS) ≥ 2.5 , se aislaron 9 y 22 bacterias en los muestreos 1 y 2, respectivamente. Esto indica que el suelo asociado a Melina actúa como un reservorio de solubilizadores de fosfato, representando el 100% de las bacterias aisladas en el muestreo 1 y el 91% en el muestreo 2. En contraste, los hongos con IS ≥ 2.5 estuvieron ausentes en el primer muestreo, mientras que en el segundo representaron el 9% del total de aislamientos. Por otra parte, estudios realizados con muestras de suelos de diferentes sistemas agroforestales en Tamil Nadu (India) reportan que las poblaciones bacterianas se encontraron en mayor proporción en comparación a las poblaciones fúngicas. Sin embargo, específicamente en el caso de las muestras de suelos asociadas a *G. arborea* se encontró más hongos (Radhakrishnan & Varadharajan, 2016) a diferencia de lo encontrado en este estudio en donde prevalecen más las bacterias.

Las características físicas y químicas del suelo asociado a plantaciones de *G. arborea* se muestran en la Tabla 4.3. En general, no se observan variaciones en cuanto a los parámetros analizados en las épocas de los dos muestreos, debido a que no se favorecen transformaciones en un tiempo tan corto en estas propiedades o no son notables. El suelo analizado tiene un pH entre 6 y 5.9; contiene en promedio 4.3 y 3.9% de MO, 0.2% de nitrógeno total, 3.3 y 2.39 mg/Kg de fósforo, respectivamente entre el muestreo 1 y el muestreo 2.

Tabla 4.3

Características físicas y químicas del suelo asociado a G. arborea en el cual se realizó el aislamiento de microorganismos de la época de alta precipitación (muestreo 1) y la época de baja precipitación (muestreo 2)

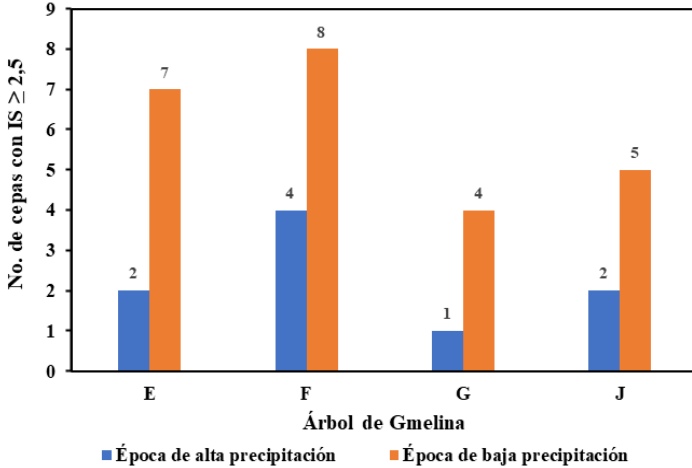
Parámetro	Unidades	Época de alta precipitación	Época de baja precipitación	Prueba t-Student p-valor
Propiedades Químicas				
pH		6.0±0.1	5.9±0.1	0.1372
CE	dS/m	0.3±0.0	0.4±0.1	0.9393
CICE	meq/100g	24.8±1.7	27.1±2.4	0.2077
N.A.	%	30.9±2.8	28.1±1.7	0.1753
COOx	%	2.5±0.3	2.2±0.5	0.2960
MO	%	4.3±0.5	3.9±0.9	0.2951
Ntotal	%	0.2±0.0	0.2±0.0	0.2950
P	mg/Kg	3.3±2.3	2.39±1.5	0.3416
DA	g/cm ³	1.2±0.0	1.3±0.1	0.2289
K intercambiable	mg/kg	49.2±5.7	55.0±6.7	0.3370
Ca intercambiable	mg/kg	3220±214.8	3450±192.7	0.2967
Mg intercambiable	mg/kg	1038±149.7	1178±192.4	0.1779
Na intercambiable	mg/kg	22.1±2.3	25.3±3.3	0.0690
Propiedades Físicas				
Arcilla	%	42	40	
Arena	%	35	40.5	
Limo	%	23	19.5	
Textura	%	Arcilloso	Arcilloso	

CE: Conductividad eléctrica, CICE: Capacidad de Intercambio catiónica efectiva, N.A. saturación de humedad media, COOx: Carbono Orgánico oxidable, MO: Materia orgánica, N total: Nitrógeno Total, DA: Densidad Aparente. Los valores corresponden a las medias de cuatro réplicas. medias ± desviación estándar para cada parámetro. Los datos fueron analizados con prueba t-Student pareada para comparar las diferencias significativas entre los dos muestreos.

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.4

Número de cepas con índice de solubilización de fosfato con un $IS \geq 2.5$ aislado del suelo asociado a *G. arborea* de la época de alta precipitación (muestreo 1) y la época de baja precipitación (muestreo 2)



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las propiedades físicas del suelo asociado a plantaciones de *G. arborea*, es de textura arcillosa teniendo en cuenta los porcentajes de arcillas, arenas y limos que se observa en la Tabla 4.3.

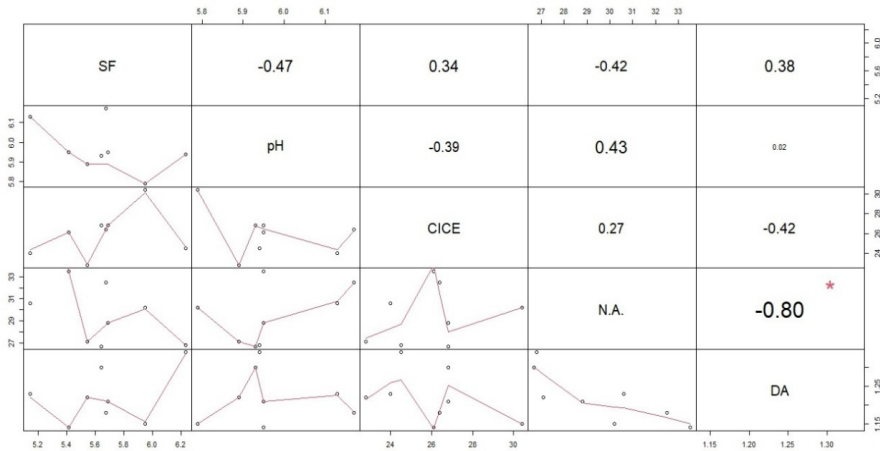
En la Figura 4.5 se muestra el gráfico con los coeficientes de correlación de Pearson entre los solubilizadores de fosfato y diferentes variables fisicoquímicas del suelo asociado a *G. arborea*. Se observa una correlación positiva entre los solubilizadores de fosfato con el CICE (0.34) y con la DA (0.38), mientras que una correlación negativa entre los solubilizadores de fosfato con los parámetros pH (-0.47) y N.A. (-0.42). Por otra parte, se calculó el coeficiente de correlación entre los solubilizadores de fosfato con las variables CE, COOx, MO y N total, detectándose muy baja correlación.

El pH del suelo es un parámetro químico fundamental que sirve como indicador universal de las características estructurales de las comunidades bacterianas y fúngicas del suelo (Lauber et al. 2008) y además, influye en las comunidades de bacterias solubilizadoras de fosfato inorgánico (Zheng et al. 2019). Los resultados obtenidos en este estudio sugieren una posible correlación negativa entre los solubilizadores de fosfato y la variable pH, que ha sido evidenciada por autores como Amri et al. (2023), quienes evaluaron

la correlación entre el promedio de la concentración de los solubilizadores de fosfato de 5 especies bacterianas con las propiedades del suelo, las cinco muestras de suelo, 4 y 1 fueron de tipo forestales y de agricultura, respectivamente, demostrándose una fuerte correlación negativa con el pH del suelo. Los aislados solubilizadores de fosfato aislados de suelos con pH entre 7.05 y 6.50 evidenciaron un alto potencial de solubilización de fosfatos. Esto probablemente, se relaciona con que las bacterias solubilizadoras, incrementan la disponibilidad de este anión por secreción de ácidos orgánicos que causan una disminución en el pH a 6.0 (Son et al. 2006), así, un mecanismo de acidificación implica la liberación de H^+ que se asocian a la asimilación de cationes que con lleva a la solubilización de fosfato (Asea et al. 1998; Timofeeva, et al. 2022)

Figura 4.5

Gráfico de correlación entre solubilizadores de fosfato (Log UFC/g de suelo seco) y diferentes variables fisicoquímicas (pH, CICE, N.A. y DA) del suelo asociado a *G. arborea*. SF: Solubilizadores de fosfato, CICE: Capacidad de Intercambio catiónica efectiva, N.A: Saturación de Humedad media, DA: Densidad Aparente. *Estadísticamente significativo $p < 0.05$



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, aunque con los datos obtenidos los valores de la correlación no son tan altos, el hecho de que la correlación sea positiva entre los solubilizadores de fosfato y CICE, probablemente, se debe a que existe un

mecanismo alternativo para la solubilización de fosfatos minerales por la producción de ácidos orgánicos a partir de los que se libera H^+ en la superficie extracelular vía intercambio catiónico o actividad ATPasa con translocación de H^+ (Illmer & Schinner, 1995; Timofeeva, et al. 2022).

En cambio, con las otras variables fisicoquímicas mostradas en esta figura, que incluyen materia orgánica, saturación de humedad media la correlación fue baja. En otros estudios, se ha demostrado que la distribución de la población microbiana en algunos sistemas agroforestales está influenciada por factores edáficos como el pH, el contenido de humedad y la materia orgánica del suelo (Radhakrishnan & Varadharajan, 2016).

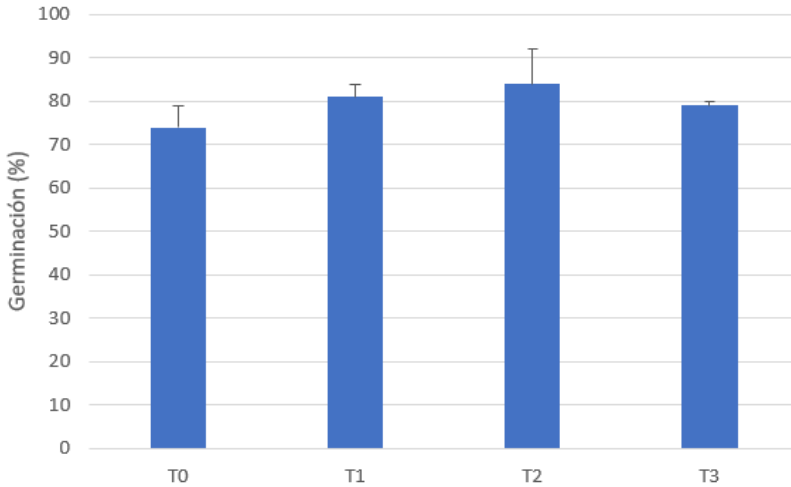
Experimentos con *G. arborea* de inoculación de consorcios microbianos a escala de vivero

La influencia del inóculo de un consorcio de microorganismos en la fase de vivero fue evidente en este estudio. Así lo demuestra el indicador de germinación cuyos valores alcanzados del 80%, alrededor de los 35 días, sugieren que no hay diferencias entre el testigo (T0), en el cual se usó urea al 100%, respecto a los tratamientos donde se sustituyó la urea por inóculo de microorganismos. De hecho, los datos en el tiempo denotan una mejor respuesta en la germinación a los tratamientos con el consorcio (T1, T2 y T3) hasta los 28 días. De hecho, los datos en el tiempo denotan una tendencia de mejor respuesta en la germinación a los tratamientos con el consorcio (T1, T2 y T3) hasta los 21 días, pero sin diferencias significativas (Figura 4.6).

No obstante, desde el punto de vista productivo, un indicador fundamental de benevolencia de un estímulo es la producción de biomasa, pues esta sugiere la intensidad en el grado de aprovechamiento de los nutrientes extraídos del suelo. La Figura 4.7 y la comparación de las medias con la prueba Tukey ($p < 0.05$), sugiere que no hubo diferencias estadísticas entre tratamientos. En el mismo sentido, los datos de crecimiento de las plántulas, hasta los 120 días, confirman el efecto positivo de la sustitución de fertilizante por el bioinóculo, lo cual permite inferir que es factible sustituir hasta un 50% del abono nitrogenado, pues no se presentaron diferencias estadísticas entre T0 y T2. Es evidente la afectación negativa en el crecimiento cuando se sustituye el fertilizante en un 75% ($p < 0.0001$).

Figura 4.6

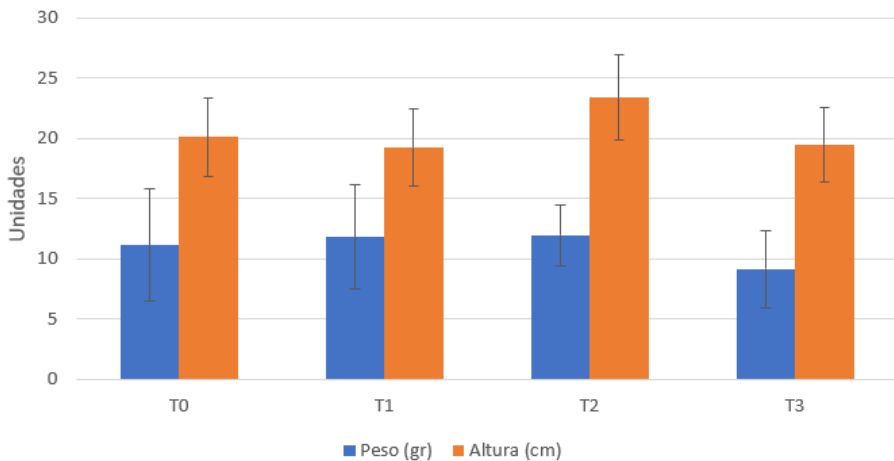
Germinación a los 21 días de G. arborea a diferentes niveles de sustitución de fertilizante químico utilizando un inóculo microbiano en etapa de vivero. T0, Urea; T1 Urea 75% + inóculo; T2 urea 50% + inóculo y T3, urea 25% + inóculo



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.7

Promedio del peso seco y la altura de las plantas de G. arborea al día 90 entre tratamientos de sustitución de fertilizante químico



Fuente: Elaboración propia

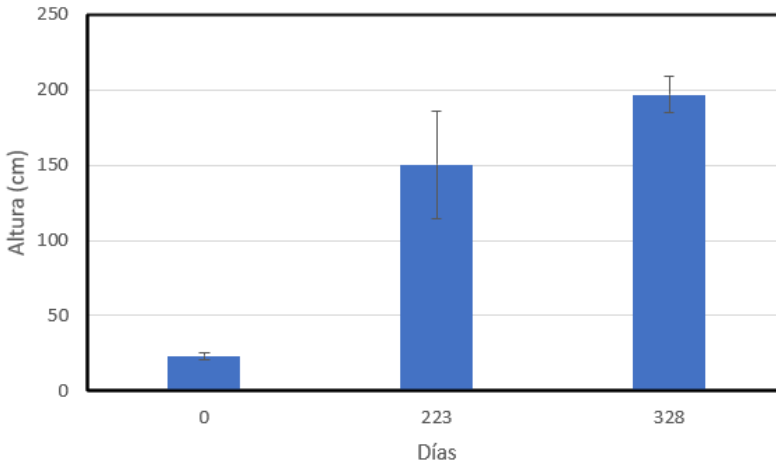
Interacciones *G. arborea* con gramíneas a escala de parcela

Plantas vigorosas, crecidas bajo buenas condiciones de nutrición en la etapa de vivero, reflejan su potencial bajo condiciones de campo; especialmente, cuando deben competir con una especie herbácea para su establecimiento y desarrollo, como sucede en una silvopastura. Así, la interacción entre el componente leñoso y el estrato herbáceo constituye un tema de análisis importante en la escogencia de especies a asociar en un sistema agroforestal. De ahí, la relevancia de los resultados encontrados reportados en este capítulo.

Los datos del ensayo a escala de parcelas de campo denotan la buena respuesta de establecimiento de *G. arborea* asociada con *B. pertusa*. La altura promedio alcanzada de 197 cm a los 328 días (Figura 4.8) con una tasa de crecimiento de 0.52 cm/día, sugieren que, a pesar de ser un suelo con limitaciones físicas y químicas, la respuesta de Gmelina en términos de crecimiento fue aceptable si se compara con estimaciones con base a reportes de literatura, los cuales tuvieron una tasa de crecimiento entre 0.63 y 0.89 cm/día (Valverde et al. 2020; Mora y Manosalva, 2018)

Figura 4.8

Crecimiento de Gmelina arborea en una pastura de Bohtriochloa pertusa en al Guamo (Tolima)



Fuente: Elaboración propia

La influencia del sistema radical de *Gmelina* sobre una característica física del suelo sugiere una tendencia positiva, a medida que se acerca a la zona de mayor actividad rizosférica, cerca de la zona de mayor crecimiento radical. En la Tabla 4.4 se puede apreciar que la resistencia a la penetración es menor en el suelo bajo el dosel, disminuyendo a menor distancia del árbol y aumentando a medida que el suelo tiene menor influencia del sistema radical de la especie leñosa. Las diferencias son significativas ($p \leq 0.05$) entre las resistencias tomadas a menos de 0.5 m respecto a la gotera (1 m) y a la zona libre de influencia del dosel, a 1.5 m; así, los indicadores físicos del suelo tienden a valores de un suelo compactado en el área alejada de la influencia de la raíz del componente leñoso. Similar tendencia sugiere los datos de densidad aparente del suelo como pueden verificarse en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4

Promedio y desviación estándar de parámetros físicos del suelo determinados a escala de parcela

Parámetros	0.1 m	0.5 m	1.0 m	1.5 m
Resistencia a la penetración (MPa)	1.39±0.35	1.80±0.36	2.05±0.29	2.10±0.25
Densidad aparente (g/cm ³)	1.30±0.11a	1.36±0.13a	1.34±0.10a	1.40±0.05a
Humedad (%)	51.40±5.03a	44±3.16b	36.6±3.13c	21.8±1.92d

Letras iguales denotan que no hay diferencias significativas entre distancias ($p > 0.05$)

Fuente: Elaboración propia

Estos parámetros, se reflejan en la actividad microbiológica que actúa sobre la materia orgánica, expresándose en una mayor respiración. En la Tabla 4.4 se sugiere una tendencia de mayor actividad microbiana en las proximidades del cuello de la raíz respecto al suelo alejado de éste.

La influencia sobre la biomasa comestible

Por otra parte, la interacción entre la especie leñosa y la herbácea se expresa en productividad de biomasa. En la Tabla 4.5 se aprecia una reducción del 8% del rendimiento del pasto a libre exposición respecto al crecimiento bajo el dosel de *G. arborea*, lo cual es el reflejo de una menor actividad fotosintética en el estrato rasante, derivado de la menor transmitancia de RAFA interferida por la lámina foliar de *G. arborea*. Como se puede ver en la Tabla 4.5, la diferencia

de RAFA transmitida bajo el dosel respecto a la luz captada por el sensor a libre exposición representa un 52.77% de reducción en la radiación incidente.

Pachas et al. (2018) y Gándara et al. (2019) demostraron que el nivel de intensidad de sombra que da el dosel del componente leñoso, en una silvopastura, es uno de los principales factores que afectan negativamente la producción de biomasa en los pastizales tropicales; esto a su vez, está relacionado con la arquitectura del árbol, altura y densidad arbórea. Cuando la transmitancia de la RAFA es mayor se favorece la llegada de suficiente radiación solar a los pastos, lo cual facilita la fotosíntesis; al respecto, Sun y Wang (2018) sostienen que la energía que impulsa la fotosíntesis en las plantas es la luz, que proviene principalmente de la radiación solar, esto ha sido documentado para demostrar una relación positiva entre la tasa fotosintética neta (Pn) y la radiación fotosintéticamente activa (RAFA).

Tabla 4.5

Producción de forraje y radiación transmitida en un arreglo agroforestal con G. arborea

Parámetros	Libre exposición	Bajo dosel
Forraje verde(g/m ²)	806.40±31.43a	745.60±79.83b
Materia seca (g/m ²)	266.11±10.37	246.05±26.34
RAFA (µm mol s ⁻¹ m) ⁻²	1666.30 ±727.81a	787.06±432.29b

Medias con letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Fuente: Elaboración propia

No obstante, esta reducción de la biomasa de la gramínea, podría compensarse con una producción de la biomasa en la lámina foliar de *G. arborea*, que puede alcanzar a 1097 ± 334 g/m² de forraje verde, con un 44.6% de materia seca. Los reportes de literatura dan cuenta del excelente valor nutricional de las hojas de *G. arborea* que alcanza a aportes de 78.5% de materia seca; un amplio rango de proteína que oscila entre 11.7 y 26.7% a través del año, con una alta digestibilidad dados los bajos contenidos de fibra detergente neutro (FDA) que oscilan entre 19 y 31.9% (Badillo, 2018).

G. arborea es una especie leñosa que entra en la categoría de especies de rápido crecimiento y, por lo tanto, importante para su uso en sistemas

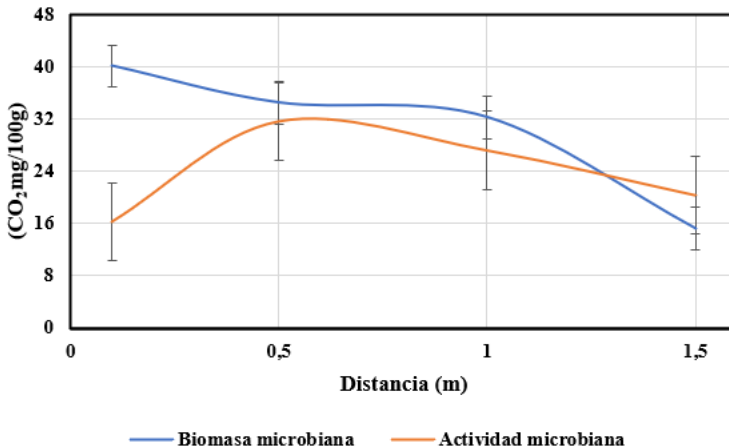
agroforestales. No obstante, es importante conocer sus características cuando se asocia a una especie herbácea, como es el caso de las gramíneas en una silvopastura. Los hallazgos en este estudio, sugieren que, si bien mejora características biofísicas del suelo, también constituye un factor de reducción en la producción de biomasa comestible en el estrato rasante. No hay reportes específicos del efecto de la sombra del dosel de *Gmelina* sobre gramíneas, pero los hallazgos en un sistema agroforestal de esta especie con cultivos de ciclo corto es un buen referente. Ya este efecto había sido reportado por Swamy y Mishra (2014), quienes observaron una disminución en soja del 8.1% a 34.5% y en trigo de 8.8% a 13.6% bajo diferentes densidades de siembra de *G. arborea*; esto se da básicamente por competencia por los recursos de luz y suelo; además, la disminución del 20-35% en la RAFA bajo rodales de *G. arborea*, disminuyen en un 28% en la producción de soja (Swamy et al. 2003). Por el contrario, otros estudios, han reportado un aumento significativamente mayor en el rendimiento de materia seca bajo sistema silvopastoril que en monocultivo (Kaleeswari, 2015).

Estos indicadores, se reflejan en la actividad microbiológica que actúa sobre la materia orgánica, expresándose en una mayor respiración. La Figura 4.9 sugiere una tendencia de mayor actividad microbiana en la parte media del dosel, respecto al borde de la copa, y de estas respecto a la zona a libre exposición (Figura 4.9). La baja actividad microbiana cerca al fuste del árbol, podría explicarse por un escaso volumen de biomasa de raíces finas en dicha zona; sin embargo, esta es una hipótesis que debe comprobarse. Si bien, la distribución de raíces finas es clara, pues varios autores confirman que la mayor densidad se presenta en la capa de suelo entre 0 – 30 cm (Jiang et al. 2016), no es clara la relación entre la distribución de raíces en la capa superficial del suelo (20 cm) y su distancia al fuste (Nambiar, 1983), por el contrario, Diaz (2019) y Bucheli et al. (2013) reportaron efectos significativos en la longitud y superficie de raíz y la densidad de raíces finas, respectivamente, de especies leñosas con respecto a la posición bajo la copa en la cual se extrajo la muestra, registrando que la mayor longitud de raíces finas es mayor cerca del fuste árbol (25% de copa) y disminuye con la distancia hacia el perímetro de la copa. Si la tendencia es como se expresa en estos dos últimos estudios citados, la explicación de la mayor actividad microbiana en la zona media del área de influencia del dosel en el suelo y una menor en el borde de la copa y en el suelo a libre exposición, esto podría obedecer a una mayor densidad de raíces (Arnáez & Ortiz, 2010) y suelo rizosférico, donde la actividad microbiana es

más intensa. La misma tendencia puede observarse en la actividad microbiana. Los resultados de la Figura 4.9, muestran que el suelo bajo el dosel presenta una biomasa estadísticamente superior al suelo alejado 1.5 m del fuste del árbol; la tendencia sugiere que entre más cerca al cuello de la raíz, la biomasa microbiana es mayor. Esto puede estar relacionado con una mejor condición ambiental, evidenciada por el mayor contenido de humedad bajo el dosel, que se incrementa a mayor cercanía del cuello de la raíz (Donoso et al. 2002; Lal, 2020).

Figura 4.9

*Actividad microbiana y biomasa microbiana en muestras de suelo a cuatro distancias del fuste de *G. arborea**



Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, no hay un patrón de la influencia de la posición bajo el dosel o fuera de este sobre la productividad del forraje; ya que mientras unos estudios reportan un incremento de la biomasa forrajera en las proximidades del fuste del árbol (Casanova et al. 2022; Torres et al. 2009), otros estudios, muestran una tendencia muy irregular, aumentando significativamente el forraje con la distancia. Algunos estudios sugieren que esto es el resultado de interacciones entre la fertilidad del suelo (Piñeros et al. 2019; Obrador et al. 2004) y la transmitancia de la radiación solar a través del dosel arbóreo (METER, 2024; Rosati et al. 2021)

Conclusiones

Los resultados obtenidos a nivel de laboratorio evidenciaron que el suelo asociado a *G. arborea* es un reservorio de microorganismos solubilizadores de fosfatos nativos de este bosque seco tropical. Es más favorable el aislamiento de estos microorganismos en época de baja precipitación en comparación a la época más lluviosa, en especial la población bacteriana prevalece. Es necesario que se continúe explorando los diferentes aislados por separados o en consorcios como una estrategia amigable desde el punto de vista ambiental, y como posible bioinoculantes que contribuyan a la disponibilidad de minerales para mejorar la productividad de los sistemas agroforestales en donde esta planta está presente.

A pesar de no detectar una correlación fuerte entre los solubilizadores de fosfato y algunos parámetros fisicoquímicos, se observó una relación directa entre los solubilizadores de fosfato con la capacidad de Intercambio catiónica efectiva, y densidad aparente del suelo asociado a esta planta, mientras que entre los solubilizadores de fosfato y los parámetros pH y saturación de humedad media, se observó una relación inversa.

G. arborea es una especie leñosa que responde a la fertilización química, pero esta puede ser sustituida hasta un 75% sin que se afecten los indicadores de crecimiento en la etapa de vivero.

En el campo, *G. arborea* compite con éxito por espacio con *B. pertusa*, aunque puede haber una reducción del forraje debido a la interceptación de RAFA en el dosel, lo cual afecta la producción de materia seca bajo el dosel; no obstante, la materia seca del estrato rasante disminuida puede ser compensada con la materia seca por lámina foliar producida por *G. arborea*.

Referencias

- Amri, M., Rjeibi, M. R., Gatrouni, M., Mateus, D.M.R., Asses, N., Pinho, H.J.O., & Abbes, C. (2023). Isolation, Identification, and Characterization of Phosphate-Solubilizing Bacteria from Tunisian Soils. *Microorganisms*, 11(3), 783. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030783>
- AOAC. (1965). Official Methods of Analysis of the Association of Official Agricultural Chemists. AOAC, Washington DC.

- Arnáez Serrano, E. & Ortiz Vargas, R. (2010). Estudio radicular de *Vochysia ferruginea* (botarrama) en plantaciones y condiciones naturales en Costa Rica. *Tecnología en marcha*, 23 (1), 9-18.
- Asea, P.; Kucey, R.; Stewart, J. (1988). Inorganic phosphate solubilization by two *Penicillium* species in solution culture and soil. *Soil Biol. Biochem.* 20, 459-464
- Badillo, B. (2018) Análisis de hojas de *Gmelina arborea* y actividad enzimática de bacterias ruminales adheridas a partículas de alimento. [Tesis doctoral]. Colpos.
- Banerjee S. & Van der Heijden M.G.A. (2023). Soil microbiomes and one health. *Nat Rev Microbiol*, 21(1), 6-20. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00779-w>. Epub 2022 Aug 23. PMID: 35999468.
- Bucheli, P; Benjamin, T.; Rusch, G., Ibrahim, M., Casals, P. Sanchez, D & Pugnaire, F. (2013). Estrategias de los árboles para el uso eficiente del agua y tolerancia a la sequía en sistemas silvopastoriles. *Agroforestería en las Américas*, 50 (1), 53-84.
- Casanova-Lugo, F., Villanueva-López, G., Alcudia-Aguilar, A., Nahed-Toral, J., Medrano-Pérez, O.R., Jiménez-Ferrer, G., Alayón-Gamboa, J.A. & Raj Aryal, D. (2022). Effect of Tree Shade on the Yield of *Brachiaria brizantha* Grass in Tropical Livestock Production Systems in Mexico. *Rangeland Ecology & Management*, 80 (1), 31-38.
- Diaz, S.M. (2019). Patrones de distribución de raíces finas en plantaciones forestales de *Eucalyptus pellita* F. Muell. sometidos a distintos esquemas de fertilización con potasio, calcio y fósforo en Puerto López (Meta). [Tesis de Maestría]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Domínguez Palacio, D., Pozo Gálvez, C., & León Sánchez., M.A. (2018). Estimación de la densidad volumétrica y porosidad total usando el penetrómetro. *Cultivos Tropicales*, 39 (4), 34-41 2018<https://www.redalyc.org/journal/1932/193260659005/html/>
- Donoso S., Ruiz F. & Herrera M. (2002). Distribución y cantidad de biomasa de raíces finas en plantaciones clonales de *Eucalyptus globulus*. *Ciencias Forestales* 16 (1-2). http://www.revistacienciasforestales.uchile.cl/2001-2002_vol16-17/n1-2a1.pdf

- Durang, W., Uribe, L, Henríquez, C, & Mata, R. (2015). Respiración, Biomasa Microbiana y Actividad Fosfatasa del Suelo en Dos Agroecosistemas y un Bosque en Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 39(1), 37-46. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242015000100003&lng=en&tlng=es.
- Gándara L., Pereira MM. & Stup M. (2019). A preliminary study of spatial distribution and plant density in a leucaena-grass planting in north Corrientes, Argentina. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales* 7, 143–145. doi: 10.17138/TGFT(7)143-145.
- Guillermo-Ramírez, J. (2017). Desarrollo en etapa de vivero de *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm sometida a tres dosis de fertilización y dos sustratos. *Cultivos Tropicales*, 38(2), 47-52. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362017000200006&lng=es&tlng=es.
- Gupta A, Singh UB, Sahu PK, Paul S, Kumar A, Malviya D, Singh S, Kuppusamy P, Singh P, Paul D, Rai JP, Singh HV, Manna MC, Crusberg TC, Kumar A & Saxena AK. (2022). Linking Soil Microbial Diversity to Modern Agriculture Practices: A Review. *Int J Environ Res Public Health*. 19(5), 3141. doi: 10.3390/ijerph19053141. PMID: 35270832; PMCID: PMC8910389.
- Hartmann, M., & Six, J. (2023). Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nat Rev Earth Environ*, 4, 4–18. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>.
- Hermans SM, Lear G, Case BS & Buckley HL. (2023). The soil microbiome: An essential, but neglected, component of regenerative agroecosystems. *iScience*, 26(2), 106028. doi: 10.1016/j.isci.2023.106028. PMID: 36844455; PMCID: PMC9947323.
- Hernández, W. & Salas, E. (2009). La inoculación con *Glomus fasciculatum* en el crecimiento de cuatro especies forestales en vivero y campo. *Agronomía Costarricense*, 33(1). <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6732>.
- Hernández Castro, W., Badilla Valverde, Y., Esquivel Segura, E. & Murillo Gamboa, O. (2021). Comportamiento de clones de *Gmelina arborea* Roxb. en condiciones de suelo ácidos. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), 229-249. <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.11>

- Holdridge, L., Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA) & Jiménez Saa, H. (1977). *Ecología basada en zonas de vida*. <https://hdl.handle.net/11324/7936>.
- Hunt, R., Causton, D.R. Shipley, B. & Askew, P. (2002). A modern tool for classical plant growth analysis. *Annals of botany*, 90: 485-488.
- IGAC. (1990). *Manual de métodos analíticos de laboratorio de suelos*. Subdirección agrológica. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Illmer, P. & Schinner, F. (1995). Solubilization of inorganic calcium phosphates—Solubilization mechanisms. *Soil Biol. Biochem*, 27, 257–263.
- Jiang, H., Bai, Y., Du, H., Hu, Y., Rao, Y., Chen, C., & Cai, Y. (2016). The spatial and seasonal variation characteristics of fine roots in different plant configuration modes in new reclamation saline soil of humid climate in China. *Ecological Engineering*, 86, 231–238. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.020>
- Kaleeswari, R.K. (2015) Assessment of Biological Efficiency of Silviculture. *Systems Madras Agric. J.*, 102 (10-12), 386-389. <https://doi.org/10.29321/MAJ.10.001140>.
- Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265-3277.
- Lardy, J. M., DeSutter, T.M., Daigh, A. L. M., Meehan, M. A., & Staricka, J. A. (2022). Effects of soil bulk density and water content on penetration resistance. *Agricultural & Environmental Letters*, 7, e20096. <https://doi.org/10.1002/acl2.20096>.
- Lauber CL, Strickland MS, Bradford MA, & Fierer N. (2008). The influence of soil properties on the structure of bacterial and fungal communities across land-use types. *Soil Biol Biochem*, 40, 2407-2415. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.05.021>.
- Maitra, S., Hossain, A., Brestic, M., Skalicky, M., Ondrisik, P., Gitari, H., Brahmachari, K., Shankar, T., Bhadra, P., Palai, J. B., Jena, J., Bhattacharya, U., Duvvada, S. K., Lalichetti, S., & Sairam, M. (2021). Intercropping—A Low Input Agricultural Strategy for Food and Environmental Security. *Agronomy*, 11(2), 343. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020343>.

- Melgarejo, L., Romero, M., Hernández, S., Barrera, J., Solarte, M., Suárez, D., Pérez, L., Rojas, A., Cruz, M., Moreno, L., Crespo, S & Pérez, W. (2010). *Experimentos en fisiología vegetal*. Universidad Nacional de Colombia.
- METER. (2024). *The researcher's complete guide to Leaf Area Index (LAI)*. <https://metergroup.com/education-guides/the-researchers-complete-guide-to-leaf-area-index-lai/>.
- Mohan, V., Saranya Devi, K. & Santhiya, M. (2018). *Gmelina arborea* rhizomicrobiome as potential plant growth promoter and antagonistic agent against *Fusarium oxysporum*. *J. Acad. Indus. Res*, 6, 207-212.
- Mora, E.R. & Manosalva, C.V. (2018). Impacto de la fertilización mineral y enmiendas sobre *Gmelina arborea* y *Schizolobium parahyba* en suelos andesíticos de la Amazonía Ecuatoriana. *Centro Agrícola*, 45(4), 49-58. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852018000400049&lng=pt&tlng=es.
- Nambiar, E. K. S. (1983). Root development and configuration in intensively managed radiata pine plantations. *Plant and Soil*, 71, 37-47.
- Naqqash, T., Malik, K. A., Imran, A., Hameed, S., Shahid, M., Hanif, M. K., Majeed, A., Iqbal, M. J., Qaisrani, M. M., & van Elsas, J. D. (2022). Inoculation With *Azospirillum* spp. Acts as the Liming Source for Improving Growth and Nitrogen Use Efficiency of Potato. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.929114>.
- Obrador, J.J., Moreno, G., Mosquera-Losada, M.R., Rigueiro-Rodríguez, A., & Mcadam, J.H. (2004). *Soil nutrient status and forage yield at varying distances from trees in four dehesas in Extremadura, Spain*.
- Pachas, A. N. A., Shelton, H. M., Lambrides, C. J., Dalzell, S. A. & Murtagh, G. J. (2018). Effect of tree density on competition between *Leucaena leucocephala* and *Chloris gayana* using a Nelder wheel trial. I. Above ground interactions. *Crop and Pasture Science*, 69, 419-429.
- Pakos, P.V., (2012). Comportamiento y manejo de *Gmelina arborea* Roxb., en Zamorano Honduras. [Trabajo de grado].
- Piñeros Varón, R, Guevara Muñetón, L.P. y Almarío Leiva, G.A. (2019). *Indicadores de salud en el continuum suelos – pasturas*. Universidad del Tolima.

- Radhakrishnan, S. & Varadharajan, M. (2016). Status of microbial diversity in agroforestry systems in Tamil Nadu, India. *J Basic Microbiol*, 56(6), 662-9. doi: 10.1002/jobm.201500639. Epub 2016 Feb 29. PMID: 26924716.
- Ramírez-Gil, J. G. (2019). Dependency, colonization, and growth in *Gmelina arborea* inoculated with five strains of Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 72(2), 8775-8783. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n2.74691>.
- Ramírez, M., Serralde, D., Roveda, G., Rosero, A., Rivedo, S., Baquero, C., & Pérez, D. (2011). Manual de uso y aplicación de hongos formadores de micorrizas arbusculares en especies forestales. Corpoica.
- Ramírez, R. & Salazar, C. (2012). Cambios de la resistencia a la penetración en un suelo con diferentes sistemas de manejo y su relación con algunas propiedades físicas en un andisol-Marinilla La Montañita. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 27 (52), 481-506.
- Rosati, A.; Marchionni, D., Mantovani, D., Ponti, L. & Famiani, F. (2021) Intercepted Photosynthetically Active Radiation (PAR) and Spatial and Temporal Distribution of Transmitted PAR under High-Density and Super High-Density Olive Orchards. *Agriculture*, 11, 351. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040351>
- Suleimanova, A., Bulmakova, D., Sokolnikova, L., Egorova, E., Itkina, D., Kuzminova, O., Gizatullina, A. & Sharipova, M. (2023). Phosphate Solubilization and Plant Growth Promotion by *Pantoea brenneri* Soil Isolates. *Microorganisms*, 11(5), 1136. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051136>
- Son, H. J.; Park, G.-T.; Cha, M.-S., & Heo, M.-S. (2006) Solubilization of insoluble inorganic phosphates by a novel salt- and pH-tolerant *Pantoea agglomerans* R-42 isolated from soybean rhizosphere. *Bioresour. Technol.*, 97, 204-210.
- Sun, D.B. & Wang, Q.S. (2018) Linear Relationships between Photosynthetic Rate and Photochemical Energy Expressed by $PAR \times F_v/F_m$. *American Journal of Plant Sciences*, 9, 125-138.
- Swamy, S.L. & Mishra, A. (2014). Comparison of Biomass and C Storage in Three Promising Fast Growing Tree Plantations under Agroforestry System in Sub-humid Tropics of Chhattisgarh, *India Universal Journal*

of *Agricultural Research* 2(8): 284-296, <https://doi.org/10.13189/ujar.2014.020802>

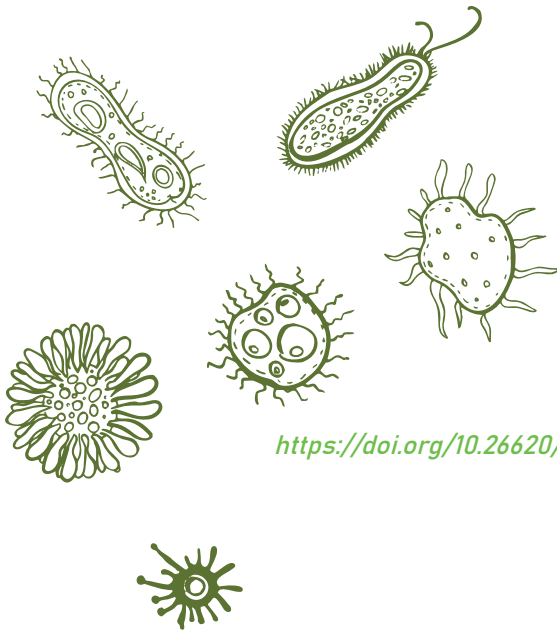
- Swamy, S.L., Mishra, A., & Puri, S. (2003). Biomass production and root distribution of *Gmelina arborea* under an agrisilviculture system in sub-humid tropics of Central India. *New Forests*, 26: 167-186.
- Tamang M, Chettri R, Vineeta, Shukla G, Bhat JA, Kumar A, Kumar M, Suryawanshi A, Cabral-Pinto M, & Chakravarty S. (2021). Stand Structure, Biomass and Carbon Storage in *Gmelina arborea* Plantation at Agricultural Landscape in Foothills of Eastern Himalayas. *Land*. 10(4), 387. <https://doi.org/10.3390/land10040387>.
- Timofeeva, Anna, Maria Galyamova, & Sergey Sedykh. (2022). Prospects for Using Phosphate-Solubilizing Microorganisms as Natural Fertilizers in Agriculture. *Plants* 11(16), 2119. <https://doi.org/10.3390/plants11162119>.
- Torres, L.L., Aragon, L.V., & Parra, A.S. (2009). Efecto de la acacia (*Acacia decurrens*) en el desarrollo y producción del pasto aubade (*Lolium multiflorum*, Lam), Botana, departamento de Nariño. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 26 (1), 25-45.
- Valverde, JC, Méndez, D, & Arias, D. (2020). Efectos del defoliador *Atta cephalotes* Linnaeus. en el crecimiento y el desarrollo fisiológico e hidráulico de árboles juveniles de *Gmelina arborea* Roxb. en condiciones controladas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(170), 214-226. Epub June 15, 2021. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1030>
- Vance, E.D., Brookes, P.C., & Jenkinson, D.S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19,703-707. doi:10.1016%2F0038-0717(87)90052-6.
- Weiss, M. Baret, F. Smith, G.J. Jonckheere, I. & Coppin, P. (2004). Review of methods for *in situ* leaf area index (LAI) determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121 (1-2), 37-53.
- Zambrano, J. A., & Díaz, L. A. (2008). Efecto de la inoculación de *Azospirillum brasilense* y *Glomus* sp. en *Gmelina arborea* durante su germinación y manejo en vivero. *Universitas Scientiarum*, 13(2), 162-170. <http://>

www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-74832008000200007&lng=en&tlng=es.

Zheng, B. X., Zhang, D. P., Wang, Y., Hao, X. L., Wadaan, M. A. M., Hozzein, W. N., Peñuelas, J., Zhu, Y. G., & Yang, X. R. (2019). Responses to soil pH gradients of inorganic phosphate solubilizing bacteria community. *Scientific reports*, 9(1), 25. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37003-w>

CAPITULO 5

Microorganismos en los sistemas de producción agrícola y agroforestales. Una apuesta hacia la sostenibilidad



Johan Steven Alcántara Cortes¹
Nubia Carolina Higuera Mora¹
Raúl Hernando Posada Almanza^{1,2}

<https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5.cap5>

Cómo citar este capítulo

Alcántara Cortes, J. S., Higuera Mora, N. C., & Posada Almanza, R. H. (2025). Microorganismos en los sistemas de producción agrícola y agroforestales: Una apuesta hacia la sostenibilidad. En N. C. Higuera Mora & R. H. Posada Almanza (Eds.), *Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales* (pp. 167–185). Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO. <https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5.cap5>

1 Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO. Programa de Ingeniería Agroecológica. Rectoría Bogotá. Grupo de Investigación Agroeco y Gestión ambiental.

2 Zenkinoko S.A.S

Introducción

El microbioma edáfico es un componente esencial en la dinámica de los agroecosistemas, desempeñando roles fundamentales en la fertilidad del suelo, la sanidad vegetal y la productividad agrícola (Dubey et al. 2019). La importancia del microbioma y su diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales reside en las funciones esenciales que sustenta, como la solubilización de nutrientes, descontaminación, desalinización, estabilización de la estructura, fijación biológica de nitrógeno, transporte y absorción de nutrientes, y control biológico de patógenos, entre otros, generando beneficios ecosistémicos y agronómicos fundamentales (Hermans et al. 2023; Shah et al. 2022). La biotecnología en reconocimiento de este potencial ha impulsado el aprovechamiento de la diversidad microbiana, como una alternativa innovadora a las prácticas de manejo agrícolas convencionales, consolidándose como un campo de estudio prometedor y necesario para abordar desafíos actuales como la degradación del suelo, el cambio climático y las enfermedades en sistemas agrícolas, contribuyendo a la sostenibilidad, resiliencia y eficiencia de los sistemas agrícolas y agroforestales (Bakker & Berendsen, 2022; Jansson et al. 2023).

Los microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPMs por sus siglas en inglés) tienen diversos mecanismos de acción tales como la solubilización de fosfatos, fijación de nitrógeno y degradación de la materia orgánica, lo que contribuye a la liberación de micronutrientes y una mejora en la nutrición de las plantas (Taheri et al. 2025). Gracias a estas capacidades, estos microorganismos pueden utilizarse para suplir o complementar los procesos de fertilización química tradicional que generan a largo plazo un deterioro en la calidad del suelo, por lo que constituyen una herramienta clave para estimular el crecimiento vegetal; actuando a través de mecanismos directos, como la liberación de hormonas y enzimas, e indirectos, como la resistencia a estrés abiótico y el control biológico de patógenos (De Souza et al. 2015; Hanif et al. 2024).

Por su parte, los Hongos de Micorriza Arbuscular (HMA) destacan por su eficiencia en la adquisición y transporte de múltiples nutrientes escasos en la rizosfera, especialmente fósforo, y permitir una alta adaptabilidad a condiciones de estrés como suelos salinos (Taheri et al. 2025). Su presencia es vital en la comunidad microbiana del suelo, ya que son un componente clave para garantizar la nutrición vegetal.

Por otro lado, el desarrollo de la actividad microbiana y la biomasa edáfica son considerados como factores clave al momento de evaluar características como la calidad y la salud del suelo, ya que pueden condicionar factores como la regulación de los ciclos biogeoquímicos (mineralización del fósforo, fijación y transformación de carbono y nitrógeno) y la promoción del crecimiento vegetal a nivel de la rizosfera, que pueden ser cruciales para el aumento de la productividad y la reducción de la fertilización química tradicional (Volpiano et al. 2022).

Sin embargo, la presencia, diversidad y funcionalidad de los microorganismos en los sistemas agrícolas y agroforestales dependen de diversos factores como el clima, la topografía, el tipo y diversidad vegetal, las prácticas de manejo como la labranza, la adición de enmiendas, y el uso de fertilizantes y pesticidas (Beule et al. 2022; Camelo et al. 2021; Nahon et al. 2024). La compleja interacción de estos factores determina la composición, abundancia y actividad del microbioma edáfico y, por ende la salud y productividad de los sistemas agrícolas y agroforestales. Por ejemplo, en los sistemas agroforestales (SAF), conocidos sistemas de producción integrado entre cultivos y especies forestales, hay condiciones microclimáticas favorables y una mayor cantidad de materia orgánica, que crean nichos diversos para los microorganismos, promoviendo un suelo más saludable y biodiverso (Camelo et al. 2021; Nahon et al. 2024).

A pesar del amplio reconocimiento de la importancia y rol de los microorganismos, el uso intensivo de prácticas agrícola, la expansión de los monocultivos y el uso indiscriminado de fertilizantes y pesticidas representan una amenaza para la salud del suelo y disminuyen la acción benéfica de la microbiota edáfica (Belete & Yadete, 2023; Vahter et al. 2022). Esta situación reduce el potencial del suelo como una valiosa fuente de recursos genéticos, limitando la posibilidad de recuperar aquellos microorganismos con un alto potencial biotecnológico, aunado a su posible uso como indicadores de calidad del suelo (Belete & Yadete, 2023; Thiele-Bruhn et al. 2012; Vahter et al. 2022). Por lo tanto, aunque en la actualidad no se conozcan todos los usos específicos de la biodiversidad asociada a los sistemas agrícolas, su conservación es crucial ante la posibilidad de futuros descubrimientos y aplicaciones.

En este contexto, el presente capítulo de cierre expone una síntesis funcional de los hallazgos obtenidos a través de cuatro estudios de caso centrados en los cultivos de cacao (*Theobroma cacao*), cebolla (*Allium cepa*),

aguacate (*Persea americana*) y *Gmelina arborea*, explorando su perspectiva microbiológica en la sostenibilidad. A lo largo del libro, se ha destacado la relevancia de implementar estrategias basadas en la diversidad microbiana para mejorar la salud del suelo, la calidad edáfica y la productividad. Los estudios presentados subrayan el potencial de estas prácticas para construir modelos predictivos y promover sistemas agrícolas más resilientes a largo plazo. Adicionalmente, no solo recoge estos hallazgos, sino que también señala las futuras direcciones de investigación destacando la importancia de considerar la diversidad microbiana en la agricultura sostenible mediante el desarrollo de bioinsumos.

En el primer capítulo se abordó el uso de las poblaciones microbianas como un indicador de calidad del suelo y su asociación con patrones de diversidad vegetal y analitos fisicoquímicos edáficos, encontrando que la diversidad vegetal puede estar asociada a los diferentes grupos funcionales cultivables; estos a su vez, podrían relacionarse con algunas condiciones fisicoquímicas que podrían interpretarse como indicadores de la salud edáfica para los cultivos de cacao. Las bacterias fijadoras de nitrógeno fueron particularmente relevantes en los sistemas agroforestales de cacao, donde su presencia fue más destacada en contextos de alta biodiversidad. Estos microorganismos son capaces de incorporar nitrógeno atmosférico al suelo en formas asimilables para las plantas, promoviendo la fertilidad y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas sin depender de fertilizantes nitrogenados sintéticos (Kuypers et al. 2018; Xu & Wang, 2023). Además, los sistemas con alta biodiversidad arbórea presentaron una mayor abundancia de bacterias solubilizadoras, lo cual se asocia con una mejora en la disponibilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y carbono orgánico (Alori et al. 2017; Moreno et al. 2018).

Del segundo capítulo se resalta el uso de los HMA como indicadores de calidad de suelos gracias a la interacción de estas poblaciones con parámetros fisicoquímicos edáficos. Aquí se pudo observar que existieron grupos de HMA conservados entre las fincas que, por las condiciones a las que se ven expuestas, podrían generar mayores umbrales de resistencia, colonizar ambientes de alta intensidad agrícola y promover el crecimiento vegetal de forma específica, generando un reservorio ecológico de microorganismos que podrían utilizarse a futuro como bioinoculantes en suelos degradados. Los HMA mejoran la absorción de fósforo, estabilizan la estructura del suelo y aumentan la resiliencia del cultivo frente a factores bióticos y abióticos

(Piliarová et al. 2019). En esta sección se encontró que la salud del suelo influye más en la composición de especies de HMA que en su riqueza, y que estos hongos pueden persistir incluso en condiciones edáficas adversas, proporcionando una herramienta clave en la restauración funcional del suelo.

En cuanto al tercer capítulo, se proporcionó una perspectiva biotecnológica del procedimiento de bioprospección encaminado hacia la búsqueda de microorganismos nativos, encontrados en cultivos de aguacate, que pueden ejercer un efecto bicontrolador frente a patógenos asociados al cultivo, además la estrategia propuso una interesante metodología para recolectar e identificar microorganismos asociados a diferentes nichos vegetales, que podrían adaptarse de una manera más adecuada durante su aplicación en campo, además de describir el procedimiento de escalamiento y formulación basado en productos microbianos con aplicación directa o indirecta. Los ensayos de antagonismo *in vitro* y en condiciones reales de cultivo demostraron la viabilidad técnica de prototipos de bioinsumos formulados a partir de estas cepas. Asimismo, las investigaciones resaltaron el potencial de estos bioproductos para ser incorporados en estrategias de manejo integrado de cultivos, disminuyendo el uso de agroquímicos sintéticos.

Por último, el cuarto capítulo describió el uso de *G. arborea* como un modelo que puede utilizarse para llevar a cabo la selección y evaluación de microorganismos con potencial bioinoculante a nivel de laboratorio, vivero y campo, generando una metodología para analizar la interacción de esta planta con microorganismos solubilizadores de fosfato y gramíneas como *B. pertusa*, para la promoción de sistemas agroforestales con enfoque sostenible y agroecológico. Aquí se obtuvo como resultado una interacción positiva entre los árboles y especies herbáceas en arreglos agroforestales, mediada por el incremento de la actividad microbiana a nivel de la rizosfera. Adicionalmente, se obtuvo como resultado la posibilidad de generar un reemplazo de hasta el 75% de la fertilización química sin afectar los indicadores de desarrollo vegetal, demostrando la capacidad del modelo para la evaluación de inoculantes microbianos con potencial biofertilizador.

A continuación, se plantean algunas temáticas que pueden plantearse a partir de la lectura y análisis de los cuatro capítulos de investigación, sustentados desde los hallazgos planteados en este libro.

Relación entre la biodiversidad y funciones microbianas en los sistemas de producción agrícola y agroforestales

Si bien el libro abordó diferentes casos de estudio, centrarse en las funciones microbianas como eje articulador permite reafirmar que, aunque los agroecosistemas son ecosistemas modificados para la agricultura, y su establecimiento genera dinámicas coevolutivas que alteran la microbiota original, favoreciendo comunidades específicas a cada sistema productivo, los agroecosistemas también pueden ser un reservorio de biodiversidad. El libro documenta la presencia de microorganismos con diferentes funciones en los sistemas de producción de cacao (*Theobroma cacao*), cebolla (*Allium cepa*), aguacate (*Persea americana*) y *Gmelina arborea*, confirmando su potencial para contribuir significativamente a mejorar la disponibilidad de nutrientes, control biológico y recuperación de suelos degradados. Además, estos microorganismos no solo contribuyen a la fertilidad del suelo, sino que también modifican las propiedades físicas y químicas de este, promoviendo un entorno más favorable para el crecimiento vegetal (Hartmann & Six, 2023; Mooney et al. 2024).

La rizosfera del aguacate, por ejemplo, como nicho ecológico altamente dinámico, constituye una fuente valiosa de agentes de control biológico (ACB), dada su riqueza microbiana y la presencia de cepas que establecen relaciones simbióticas o antagonistas con fitopatógenos. Muchos de estos microorganismos son capaces de producir compuestos bioactivos (antibióticos, sideróforos, enzimas líticas, etc.) que inhiben directa o indirectamente el crecimiento de patógenos (Hasan et al. 2024). Este enfoque no solo representa una alternativa sustentable frente al uso de fungicidas sintéticos, sino que también promueve el desarrollo de bioproductos que podrían incluirse en programas de manejo integrado del cultivo, para ser utilizados en procesos de bioestimulación y restauración de suelos.

Por su parte, *Gmelina arborea*, ampliamente reconocida por su valor como especie leñosa en plantaciones comerciales, sistemas agroforestales y procesos de restauración ecológica, en el contexto de este libro, se destaca por su importancia como una fuente de microorganismos con capacidad para solubilizar fosfatos en el suelo. Además, se plantea su uso como modelo experimental para evaluar el efecto de dichos microorganismos en condiciones de laboratorio, vivero y campo, así como para estudiar su interacción con otras especies vegetales, particularmente pasturas del género *Bothriochloa pertusa*.

Por otro lado, los cultivos de cebolla y cacao mostraron una presencia significativa de microorganismos como HMA y bacterias mesófilas aerobias, solubilizadoras de fósforo, fijadoras de nitrógeno, hongos y actinobacterias. Su asociación con diferentes condiciones fisicoquímicas de suelo, diversidad y manejo de los cultivos permitió analizar posibles acciones dirigidas a la conservación de estos microorganismos y sus funciones en los agroecosistemas.

Microorganismos edáficos y su asociación con el manejo de los agroecosistemas

Es fundamental reconocer que los microorganismos del suelo influyen directa e indirectamente en la salud del suelo, de las plantas, los animales y los seres humanos. Estos organismos cumplen un rol fundamental en el ciclo de los nutrientes, participando en procesos clave como la fijación biológica del nitrógeno y la solubilización de fosfatos, siendo la rizosfera un entorno determinante para la absorción de nutrientes, estimulando el crecimiento vegetal y fortaleciendo las defensas naturales de las plantas (Pantigoso et al. 2022). El suelo, como reservorio natural de diversidad microbiana, debe conservar su salud para que estos beneficios se manifiesten y perduren; sin embargo, la expresión de este potencial depende en gran medida del tipo de manejo que se implemente en los cultivos (Beule et al. 2022).

Modelos productivos como el cacao (*Theobroma cacao* L) con un total de 259.609 hectáreas cultivadas (Fedecacao, 2025; UPRA, 2024), puede desarrollarse en sistemas agroforestales, los cuales suelen integrarse con otras especies vegetales que proporcionan beneficios como sombra, reduciendo el estrés del cultivo y preservando la biodiversidad vegetal (Suárez et al. 2021). Estos sistemas favorecen procesos ecológicos clave como el secuestro de carbono, la mejora de la fertilidad del suelo y el control biológico de plagas (Suárez et al. 2021). Por ello, los productos provenientes de prácticas agrícolas orgánicas y enfoques agroecológicos presentan una alta demanda tanto a nivel nacional como internacional.

Mediante la caracterización de cultivos de cacao en la región de Pauna, Boyacá, asociadas a sistemas agroforestales de alta y baja diversidad arbórea, no se observaron diferencias marcadas en los parámetros fisicoquímicos generales del suelo. No obstante, ciertos elementos como hierro, manganeso y nitrógeno nítrico fueron mayores en cultivos asociados a alta biodiversidad

arbórea, mientras que CIC, azufre, boro, potasio y calcio fueron superiores en baja biodiversidad. Esto indica que, a pesar de las diferencias en la composición y estructura arbórea, ambos tipos de sistemas comparten condiciones fisicoquímicas comparables, representativas de la zona de estudio. Por otro lado, como resultados de la exploración de poblaciones microbianas cultivables asociadas a nivel de la rizosfera, se encontró mayor abundancia de microorganismos en los cultivos con mayor diversidad arbórea, con excepción de actinobacterias. Estos resultados sugieren que la biodiversidad vegetal puede estar relacionada positivamente con la actividad microbiana rizosférica y que características fisicoquímicas similares entre estos tipos de manejo, está asociado a que ambas clases de sistemas recibieron los beneficios de los sistemas agroforestales, independiente de su biodiversidad.

Estos resultados sugieren que parámetros como la diversidad vegetal y microbiológica influyen en los componentes bióticos del sistema. Esta influencia se traduce en beneficios para el cultivo, especialmente por el papel funcional de ciertos grupos microbianos, como las bacterias fijadoras de nitrógeno y las solubilizadoras de fósforo, que contribuyen a la provisión de nutrientes esenciales como el nitrógeno (N) y el fósforo (P) para la planta. A partir de este estudio, se logró establecer una relación entre factores bióticos y abióticos que inciden en el comportamiento y la distribución de las poblaciones microbianas. Comprender cómo estas poblaciones interactúan con los componentes biológicos y fisicoquímicos del suelo resulta clave para elucidar los mecanismos que sostienen la funcionalidad del agroecosistema cacaotero. Por lo tanto, el cultivo de cacao bajo estos sistemas biodiversos no solo respalda prácticas agrícolas más resilientes y ecológicas, sino que también se convierte en un modelo clave para la transición hacia la sostenibilidad.

Además del tipo de sistemas de producción agrícola diseñados, las prácticas de cultivo tienen una incidencia directa en las poblaciones microbianas del suelo. Los resultados de estudio en cebolla (*Allium cepa*), permitieron el avance del conocimiento en este sentido. El cultivo de cebolla en Colombia, altamente influenciada por el uso de enmiendas químicas durante todas las etapas fenológicas del cultivo, desde la siembra hasta la cosecha, que sumado a una alta presión por plagas y enfermedades (Galeano Mendoza et al. 2018), sugiere un posible deterioro progresivo del suelo, lo que podría derivar en una reducción de los rendimientos y en la degradación de los ecosistemas agrícolas.

El capítulo No. 2 del libro, que muestra los resultados de la evaluación de la riqueza y composición de HMA en 15 cultivos de cebolla de bulbo en Boyacá - Colombia con diferente grado de deterioro edáfico, analizando parámetros fisicoquímicos del suelo. Se encontró variabilidad entre las 23 morfoespecies de HMA y parámetros edáficos entre las diferentes fincas, oscilando entre 11 a 20 morfoespecies por finca. Se encontró exceso de algunos nutrientes y déficit de otros, con mediana a buena Capacidad de Intercambio Catiónico y un pH poco uniforme. Como producto de la variabilidad en salud del suelo donde se produce la cebolla de bulbo, las comunidades de HMA esporulan de manera diferencial, algunas especies como *Acaulospora* sp., *Acaulospora mellea*, *Funneliformis coronatum* y *Glomus trufemii* son constantes en su aparición, lo que muestra una gran resistencia de estas especies a diferentes condiciones edáficas, mientras otras como *Gigasporas* sp. *Glomus ambisporum*, *Rhizoglomus irregulare*, *Glomus microcarpum*, responden y esporulan como respuesta ante uno o varios parámetros edáficos como el pH, contenidos y proporciones iónicas (Ca^+ , K^+ , Mg^+), y/o bajos contenidos de carbono orgánico y nitrógeno.

Los hongos de micorriza arbuscular (HMA) se han perfilado como una alternativa para mejorar la salud del suelo, la calidad del bulbo y la productividad (Chaudhary et al. 2025; Rozpadek et al. 2016). Dentro de los resultados destacados, la salud del suelo, evaluada mediante diferentes parámetros fisicoquímicos en cultivos de cebolla de bulbo, mostró que se relaciona más con la composición que con la riqueza de especies de HMA en cultivos con actividad agrícola intensiva. Este hallazgo sugiere que los HMA son capaces de adaptarse a diferentes condiciones ambientales, demostrando una versatilidad que les permite proporcionar servicios ecosistémicos esenciales, incluso en suelos estresados. Adicionalmente, el manejo intensivo del cultivo de cebolla puede generar presión selectiva sobre las comunidades de HMA, favoreciendo la aparición de cepas con mayor tolerancia a fungicidas y otras condiciones adversas. Esta capacidad de adaptación sugiere que algunos HMA podrían desarrollar mecanismos que les permitan persistir en condiciones propias del manejo tradicional intensivo.

Control biológico, una función microbiana que se plantea desde una perspectiva biotecnológica

Los microorganismos tienen un alto potencial como controladores biológicos (Bonaterra et al. 2022; Garcia et al. 2016). Esta función microbiana fue

ampliamente documentada en el capítulo de investigación en aguacate. El aguacate en Colombia enfrenta desafíos significativos derivados de la intensificación de enfermedades fitopatógenas y el uso excesivo de fertilización química, factores que comprometen tanto la sostenibilidad del sistema agrícola como el cumplimiento de exigencias fitosanitarias impuestas por los mercados internacionales (García et al. 2021).

Dentro de los patógenos asociados al cultivo de aguacate se destaca *Phytophthora cinnamomi*, como un agente responsable de pérdidas económicas que se ha aislado extraído de varias regiones productoras en Colombia y que ha ocasionado efectos negativos durante la etapa de postcosecha, afectando la calidad de los frutos (Marulanda Medina, 2018). Para llevar a cabo la búsqueda de microorganismos con potencial para el control biológico se realizó la colecta de microorganismos de diferentes sitios plata-específicos (raíces, hojas, flores y frutos) de 240 plantas de aguacate aparentemente sanas, en tres regiones del departamento de Antioquia. De igual manera, plantas sintomáticas y asintomáticas fueron utilizadas para la recolección de fitopatógenos que fueron expuestos a interacción con los microorganismos potencialmente biocontroladores en ensayos *in vitro*. En este estudio, se lograron aislar 667 microorganismos (bacterias y hongos) de diferentes partes de la planta de aguacate y el suelo rizosférico, incluyendo patógenos y microorganismos con potencial benéfico (biocontroladores, biofertilizantes, bioestimulantes). Se desarrollaron bioformulaciones líquidas a partir de *Bacillus velezensis* HOB008-290 y extractos metabólicos de *Serratia marcescens* ARP5.1. La bioformulación de *B. velezensis* resultó en una emulsión homogénea y estable por hasta seis meses, con altas concentraciones celulares y de endosporas, y mostró una actividad antagonista del 90-100% contra *Colletotrichum gloeosporioides* (agente causal de la antracnosis) en condiciones *in vitro*. El extracto de *S. marcescens* también demostró actividad antagonista *in vitro*.

La búsqueda de alternativas sostenibles para el manejo fitosanitario de los cultivos agrícolas es un desafío creciente, impulsado por la necesidad de reducir el uso de agroquímicos y minimizar su impacto ambiental y en la salud humana (Mamani De Marchese, A., & Filippone, 2018). En este contexto, el desarrollo de bioinsumos basados en microorganismos benéficos ha cobrado gran relevancia, posicionándose como una estrategia clave dentro de los sistemas de producción agrícola. Sin embargo, la transición hacia el uso de estos productos requiere un enfoque integral que combine investigación,

innovación y articulación con el sector productivo (Mamani De Marchese, A., & Filippone, 2018).

Producción de bioinoculantes, una apuesta para el uso sostenible de la biodiversidad

El desarrollo de bioinsumos con aplicabilidad en campo requiere un proceso de investigación exhaustivo, que permita demostrar su eficacia tanto en condiciones de laboratorio como en ambientes reales de cultivo. El proceso de desarrollo de un bioinsumo eficaz no es inmediato ni sencillo, sin embargo, los capítulos de investigación en aguacate y *Gmelina* muestran como a través de una investigación rigurosa se pueden obtener productos consolidados que ofrecen alternativas biológicas a desafíos reales. Durante el desarrollo de los capítulos, se pudieron identificar las diferentes etapas para la obtención de un producto biológico, un proceso que inicia con la bioprospección de microorganismos con potencial biocontrolador o bioestimulante, seguida de su caracterización, formulación y evaluación en diferentes escalas, desde laboratorio hasta condiciones de vivero, campo e incluso postcosecha.

Factores como las condiciones de aplicación, la compatibilidad con otros insumos agrícolas y la estabilidad del producto pueden influir significativamente en su desempeño, lo que hace indispensable optimizar los protocolos de uso. En este sentido, el diseño racional de bioinsumos debe contemplar etapas fundamentales como la bioprospección microbiana, la formulación basada en parámetros adecuados, y la validación tanto *in vitro* como *in situ*. Asimismo, es prioritario garantizar la seguridad de estos productos mediante estudios toxicológicos y de mutagenicidad (Sáenz et al. 2013). Estas estrategias representan una alternativa ecológica viable para reducir la dependencia de agroquímicos, minimizar el deterioro del suelo, mejorar la productividad agrícola y mitigar la aparición de resistencia en fitopatógenos.

En el estudio de aguacate, las cepas con mayor potencial biocontrolador fueron optimizadas para su producción a escala de erlenmeyer y biorreactor de 14 litros. Dentro de los aislamientos encontrados se destacaron las cepas de *B. velezensis* HOB008-290 y *S. marcescens* ARP5.1 por su alto potencial biocontrolador contra *Colletotrichum* sp., *P. cinnamomi* y *Phomopsis* sp. El primero fue utilizado para optimizar la producción de biomasa y la esporulación; mientras que el segundo, dado su posible rol patógeno en

humanos, fue optimizado para la producción de extractos extracelulares. Las formulaciones obtenidas fueron sometidas a pruebas de citotoxicidad, genotoxicidad y mutagenicidad, con el propósito de validar su seguridad biológica antes de su aplicación en ensayos de eficacia en campo bajo condiciones reales de cultivo y durante la etapa de postcosecha. En el estudio, el prototipo de formulado a base de *B. velezensis* HOB008-290 demostró un alto potencial como estrategia biológica preventiva contra la antracnosis en aguacate Hass durante la postcosecha, con resultados variables entre fincas debido a factores ambientales y de manejo agronómico.

Por otro lado, los resultados mostrados con el modelo experimental de *Gmelina arborea*, profundizaron en los estudios que se deben realizar para validar los resultados de laboratorio en una mayor escala, permitiendo corroborar la eficacia de los productos en condiciones reales. Para las pruebas en etapa de vivero se prepararon cuatro tratamientos para comparar diferentes concentraciones de urea sobre la actividad de un inoculante constituido por *Paenibacillus taichungensis* y *Pseudomonas* sp. durante la germinación (% de emergencia) y el desarrollo de *G. arborea* (día 60 al 123). Finalmente, durante la etapa de campo se sembraron 200 plantas de 30 cm de altura de *G. arborea* inoculadas con el consorcio microbiano, sobre una pastura de *Bohtriochloa pertusa* sin fertilización. Durante esta última etapa se realizaron mediciones de crecimiento con una cinta métrica, se contaron las hojas, se evaluaron parámetros fisiológicos como Radiación Fotosintéticamente Activa (RAFA). Además, se hicieron mediciones de indicadores físicos del suelo a tres distancias del tronco de *G. arborea* (10; 50; 100 y 150 cm) donde se evaluó resistencia a la penetración, densidad aparente y el porcentaje de humedad del suelo.

Asimismo, en los resultados obtenidos en los ensayos de vivero se destacó el uso del consorcio *Paenibacillus taichungensis* y *Pseudomonas orientalis*, principalmente por la capacidad que posee para reducir hasta en un 50% el uso de urea como fertilizante tradicional y de generar un mayor porcentaje de germinación hasta los 35 días de cultivo. Además, se resalta con mayor eficacia, el valor que presentaron estos bioinsumos al comparar variables como el peso seco y la altura hacia el final de los 120 días de cultivo, donde tratamientos con inóculo bacteriano alcanzaron niveles ligeramente más altos en comparación con el testigo. Esto indicaría que los bioinsumos seleccionados podrían ser utilizados para reducir el uso de agroquímicos como la urea, dado el papel que juegan para promover el crecimiento vegetal por mecanismos

como la fijación biológica de nitrógeno, además, si se usan en conjunto con fertilizantes químicos, pueden aumentar las características agronómicas a lo largo de todo el cultivo.

En cuanto a los ensayos de campo, se demostró que *G. arborea* es una especie robusta y adaptable, capaz de competir efectivamente con cultivos herbáceos como *Bohtriochloa pertusa*. A pesar de las disminuciones en la biomasa de la gramínea debido a la reducción de la radiación fotosintéticamente activa (RAFA) bajo su dosel, las plantas leñosas compensaron esta pérdida mediante la producción de biomasa foliar, lo que refleja su capacidad para contribuir a la nutrición animal en sistemas silvopastoriles. Además, los datos recuperados sobre el suelo y la actividad microbiana revelaron que *G. arborea* fomenta un ambiente más favorable para las comunidades microbianas en la rizosfera, mejorando las propiedades físicas del suelo.

A pesar de los avances alcanzados, aún existen desafíos en la adopción de bioinsumos a gran escala. La regulación de estos productos sigue evolucionando y, en muchos casos, las barreras normativas y la falta de conocimiento técnico dificultan su masificación. Además, su eficacia puede verse influenciada por múltiples factores, como las condiciones agroecológicas, la interacción con otros insumos agrícolas y la variabilidad de los sistemas productivos. Superar estos retos requiere continuar con investigaciones que permitan mejorar la estabilidad, compatibilidad y la eficiencia de los bioinsumos, así como fortalecer su aceptación entre productores y consumidores.

Consideraciones finales

Los microorganismos aportan una valiosa fuente de recursos genéticos y servicios ecosistémicos que pueden ser integrados de formas como las abordadas en este libro, para mejorar los sistemas de producción agrícola y agroforestales, además brindan la posibilidad de generar estrategias que a largo plazo podrían utilizarse para mitigar los impactos de fenómenos como el cambio climático, la erosión de suelos y el aumento de las enfermedades, con la finalidad de afrontar estos retos desde los recursos genéticos encontrados en ecosistemas colombianos. Los resultados obtenidos no solo amplían el conocimiento sobre las interacciones ecosistémicas, sino que también ofrecen herramientas prácticas para promover la construcción de cultivos sanos y sostenibles.

La diversidad microbiana desempeña un papel crítico en la salud y productividad de los suelos. Parte de la investigación tratada en este libro ha demostrado que la conservación de la biodiversidad vegetal en cultivos promueve comunidades microbianas más beneficiosas, mejorando las condiciones nutricionales del suelo. Asimismo, en sistemas de cultivo en donde la asociación entre microorganismos y suelo es compleja y específica según la especie, la mejora del microhábitat sigue demostrando el potencial de los microorganismos para la restauración del suelo y la mejora de su salud.

Las interacciones entre suelo, microorganismos y plantas son fundamentales para el funcionamiento de los ecosistemas agropecuarios. Los microorganismos, como los micorrízicos, biofertilizantes (fijadores de nitrógeno y solubilizadores de fosfatos) y biocontroladores, desempeñan roles esenciales en la mejora de la fertilidad del suelo, el control biológico de patógenos y la promoción del crecimiento vegetal. Estas funciones microbianas no solo reducen el uso de insumos químicos, sino que también contribuyen a la regeneración del suelo y al aumento de la resiliencia ambiental.

Por otra parte, el desarrollo de bioinsumos basados en microorganismos representa un avance significativo hacia la agricultura del futuro, donde el uso de tecnologías biológicas contribuirá a reducir el impacto ambiental y mejorar la seguridad alimentaria. Este libro actúa como un recurso valioso para investigadores, estudiantes y profesionales interesados en biotecnología agrícola, microbiología edáfica y manejo agroforestal, ofreciendo una visión integrada de los desafíos y oportunidades en el ámbito de la sostenibilidad agrícola. Adicionalmente, aborda de manera exhaustiva la importancia de implementar el uso de la diversidad microbiana como una herramienta clave para mejorar la salud del suelo, la productividad agrícola y la sostenibilidad en diferentes sistemas agroforestales, proponiendo a los microorganismos como indicadores clave de la salud y sanidad del suelo.

La agricultura se enfrenta a desafíos importantes relacionados con la sostenibilidad, la seguridad alimentaria y el impacto ambiental. En este contexto, el desarrollo de bioinsumos basados en microorganismos surge como una solución innovadora que contribuye a reducir la dependencia de productos químicos y a promover prácticas agrícolas más respetuosas con el medio ambiente.

Estos productos biológicos no solo reducen el impacto ambiental asociado al uso de agroquímicos, sino que también promueven la sostenibilidad y la

resiliencia de los sistemas agrícolas. El impulso de estas tecnologías biológicas requiere un trabajo colaborativo entre la comunidad científica y el sector agrícola. La selección de indicadores microbiológicos con potencial beneficioso para la agricultura debe estar acompañada de estrategias de divulgación y capacitación que faciliten su adopción. Estas acciones son esenciales para garantizar que los avances en biotecnología sean accesibles y efectivos para los productores.

Para consolidar estos avances, es fundamental desarrollar bioinsumos adaptados a condiciones locales y fomentar investigación transdisciplinar que integre microbiología, ecología funcional y manejo agronómico participativo. La promoción de prácticas como la agroforestería, que favorecen la biodiversidad microbiana, es clave para aprovechar los beneficios ecosistémicos y avanzar hacia una agricultura más sostenible y productiva.

Los estudios presentados en este libro subrayan la importancia de integrar el conocimiento sobre la microbiología del suelo en prácticas agrícolas sostenibles. La biodiversidad microbiana no solo es un indicador clave de la salud del suelo, sino que también ofrece herramientas innovadoras para mejorar la productividad y reducir el impacto ambiental. De esta manera, los avances presentados demuestran el valor de la investigación en la construcción de soluciones biotecnológicas aplicadas al agro. La bioprospección y el desarrollo de bioinsumos representan una oportunidad para mejorar la productividad y competitividad de la agricultura, reduciendo su dependencia de productos químicos, aprovechando el uso de los servicios ecosistémicos que cumplen dentro de estos sistemas y promoviendo la conservación de la biodiversidad del suelo. El reto hacia el futuro es consolidar estrategias que permitan que estos desarrollos trasciendan el ámbito experimental y se conviertan en herramientas accesibles y efectivas para el sector agrícola, asegurando así una producción más sostenible y alineada con las demandas del mercado global.

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. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>
- Bakker, P. A. H. M., & Berendsen, R. L. (2022). The soil-borne ultimatum, microbial biotechnology and sustainable agriculture. *Microbial*

Biotechnology, 15(1), pp. 84–87). <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13947>

- Belete, T., & Yadete, E. (2023). Effect of mono cropping on soil health and fertility management for sustainable agriculture practices: A Review. *Journal of Plant Sciences*. <https://doi.org/10.11648/j.jps.20231106.13>
- Beule, L., Vaupel, A., & Moran-Rodas, V. E. (2022). Abundance, Diversity, and Function of Soil Microorganisms in Temperate Alley-Cropping Agroforestry Systems: A Review. *Microorganisms*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030616>
- Bonaterra, A., Badosa, E., Daranas, N., Francés, J., Roselló, G., & Montesinos, E. (2022). Bacteria as Biological Control Agents of Plant Diseases. *Microorganisms*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091759>
- Camelo, D., Dubeux, J. C. B., Dos Santos, M. V. F., Lira, M. A., Fracetto, G. G. M., Fracetto, F. J. C., da Cunha, M. V., & de Freitas, E. V. (2021). Soil microbial activity and biomass in semiarid agroforestry systems integrating forage cactus and tree legumes. *Agronomy*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy11081558>
- Chaudhary, A., Poudyal, S., & Kaundal, A. (2025). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Maintaining Sustainable Agroecosystems. *Applied Microbiology (Switzerland)*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/app1microbiol5010006>
- De Souza, R., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. P. (2015). Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and Molecular Biology*, 38(4), 401–419. <https://doi.org/10.1590/S1415-475738420150053>
- Dubey, A., Malla, M. A., Khan, F., Chowdhary, K., Yadav, S., Kumar, A., Sharma, S., Khare, P. K., & Khan, M. L. (2019). Soil microbiome: a key player for conservation of soil health under changing climate. *Biodiversity and Conservation*, 28(8–9), 2405–2429. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01760-5>
- Fedecacao. (2025). *Santander, Antioquia y Arauca reportaron la mayor producción de cacao en 2024. Sin embargo, el contrabando sigue siendo un flagelo.*

<https://www.fedecacao.com.co/post/santander-antioquia-y-araucareportaron-la-mayor-produccion-de-cacao-en-2024-sin-embargo-el-contr>

- Galeano Mendoza, C. H., Baquero Cubillos, E. F., Molina Varón, J. A., & Cerón Lasso, M. del S. (2018). Agronomic evaluation of bunching onion in the colombian Cundiboyacense high plateau. *International Journal of Agronomy*, 1(8). <https://doi.org/10.1155/2018/4940589>
- Garcia, A. R. M., Rocha, A. de P., Moreira, C. C., Rocha, S. L., Guarneri, A. A., & Elliot, S. L. (2016). Screening of Fungi for Biological Control of a Triatomine Vector of Chagas Disease: Temperature and Trypanosome Infection as Factors. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 10(11), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0005128>
- García, J. S. A., Hurtado-Salazar, A., & Ceballos-Aguirre, N. (2021). Current overview of hass avocado in Colombia. Challenges and opportunities: A review. *Ciencia Rural*, 51(8). <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200903>
- Hanif, M. S., Tayyab, M., Baillo, E. H., Islam, M. M., Islam, W., & Li, X. (2024). Plant microbiome technology for sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1500260>
- Hartmann, M., & Six, J. (2023). Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(1), 4–18. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>
- Hasan, A., Tabassum, B., Hashim, M., & Khan, N. (2024). Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as a Plant Growth Enhancer for Sustainable Agriculture: A Review. *Bacteria*, 3(2), 59–75. <https://doi.org/10.3390/bacteria3020005>
- Hermans, S. M., Lear, G., Case, B. S., & Buckley, H. L. (2023). The soil microbiome: An essential, but neglected, component of regenerative agroecosystems. *IScience*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.isci>
- Jansson, J. K., McClure, R., & Egbert, R. G. (2023). Soil microbiome engineering for sustainability in a changing environment. *Nature Biotechnology*, 41(12), 1716–1728. <https://doi.org/10.1038/s41587-023-01932-3>

- Kuypers, M. M. M., Marchant, H. K., & Kartal, B. (2018). The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Reviews Microbiology*, 16(5), 263–276. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2018.9>
- Mamani De Marchese, A., & Filippone, M. P. (2018). Bioinsumos: componentes claves de una agricultura sostenible. *Rev. Agron. Noroeste Argent*, 38.
- Marulanda Medina, C. (2018). *Identificación de aislamientos de Phytophthora cinnamomi asociados aguacate en el sur occidente de Colombia*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/64244>
- Mooney, S. J., Castrillo, G., Cooper, H. V., & Bennett, M. J. (2024). Root-soil-microbiome management is key to the success of regenerative agriculture. *Nature Food*. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-01001-1>
- Moreno, A., García, V., Reyes, J. L., Vásquez, J., & Cano, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 20(1), 68–83. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n1.73707>
- Nahon, S. M. R., Trindade, F. C., Yoshiura, C. A., Martins, G. C., Costa, I. R. C. da, Costa, P. H. de O., Herrera, H., Balestrin, D., Godinho, T. de O., Marchiori, B. M., & Valadares, R. B. da S. (2024). Impact of Agroforestry Practices on Soil Microbial Diversity and Nutrient Cycling in Atlantic Rainforest Cocoa Systems. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(21). <https://doi.org/10.3390/ijms252111345>
- Pantigoso, H. A., Newberger, D., & Vivanco, J. M. (2022). The rhizosphere microbiome: Plant-microbial interactions for resource acquisition. *Journal of Applied Microbiology*, 133(5), 2864–2876. <https://doi.org/10.1111/jam.15686>
- Piliarová, M., Ondreičková, K., Hudcovicová, M., Mihálik, D., & Kraic, J. (2019). Arbuscular Mycorrhizal Fungi - Their Life and Function in Ecosystem. *Agriculture (Pol'nohospodarstvo)*, 65(1), 3–15. <https://doi.org/10.2478/agri-2019-0001>
- Rozpádek, P., Rapała-Kozik, M., Wężowicz, K., Grandin, A., Karlsson, S., Ważny, R., Anielska, T., & Turnau, K. (2016). Arbuscular mycorrhiza improves yield and nutritional properties of onion (*Allium cepa*). *Plant Physiology and Biochemistry*, 107, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.06.006>

- Sáenz, J., Cotes, A. M., & Díaz, A. (2013). Diseño y validación del proceso de producción por fermentación de biomasa de *Pseudomonas fluorescens* Ps006. *Agrosavia*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/19560>
- Shah, A. M., Khan, I. M., Shah, T. I., Bangroo, S. A., Kirmani, N. A., Nazir, S., Malik, A. R., Aezum, A. M., Mir, Y. H., Hilal, A., & Biswas, A. (2022). Soil Microbiome: A Treasure Trove for Soil Health Sustainability under Changing Climate. *Land*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/land11111887>
- Suárez, L. R., Suárez Salazar, J. C., Casanoves, F., & Ngo Bieng, M. A. (2021). Cacao agroforestry systems improve soil fertility: Comparison of soil properties between forest, cacao agroforestry systems, and pasture in the Colombian Amazon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 314, 107349. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107349>
- Taheri, P., Puopolo, G., & Santoyo, G. (2025). Plant growth-promoting microorganisms: New insights and the way forward. *Microbiological Research*, 297, 128168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micres.2025.128168>
- Thiele-Bruhn, S., Bloem, J., de Vries, F. T., Kalbitz, K., & Wagg, C. (2012). Linking soil biodiversity and agricultural soil management. In *Current Opinion in Environmental Sustainability* (Vol. 4, Issue 5, pp. 523–528). <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.06.004>
- UPRA, U. de P. R. A. (2024). *Resultados preliminares de las Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA) – Diciembre 2024*. UPRA. https://upra.gov.co/es-co/Evas_Documentos/BolEVADic.pdf
- Vahter, T., Sepp, S. K., Astover, A., Helm, A., Kikas, T., Liu, S., Oja, J., Öpik, M., Penu, P., Vasar, M., Veromann, E., Zobel, M., & Hiiesalu, I. (2022). Landscapes, management practices and their interactions shape soil fungal diversity in arable fields – Evidence from a nationwide farmers’ network. *Soil Biology and Biochemistry*, 168, 108652. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108652>
- Volpiano, C. G., Lisboa, B. B., de São José, J. F. B., Beneduzi, A., Granada, C. E., & Vargas, L. K. (2022). Soil-plant-microbiota interactions to enhance plant growth. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 46. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210098>

Xu, P., & Wang, E. (2023). Diversity and regulation of symbiotic nitrogen fixation in plants. In *Current Biology* (Vol. 33, Issue 11, pp. R543–R559). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.04.053>

Lista de Tablas

Tabla 1.1 Servicios ecosistémicos ofrecidos por los microorganismos	30
Tabla 1.2 Análisis fisicoquímicos realizados a las muestras de suelo	62
Tabla 1.3 Análisis microbiológicos realizados a las muestras de suelo	63
Tabla 1.4 Variables de biodiversidad evaluadas en cultivos de cacao	64
Tabla 1.5 Caracterización de especies arbóreas en SAF de cacao con alta biodiversidad	65
Tabla 1.6 Caracterización de especies arbóreas en SAF de cacao con baja biodiversidad	67
Tabla 1.7 Valores promedio +/- error estándar de los parámetros evaluados en campo, discriminados en alta y baja diversidad	70
Tabla 1.8 Correlaciones de Pearson entre las variables fisicoquímicas y las variables de diversidad (Índices de Simpson, Shannon y Riqueza) de las fincas analizadas de acuerdo con su riqueza de especies arbóreas	76
Tabla 1.9 Correlaciones de Pearson entre las variables microbiológicas y las variables de diversidad (Índices de Simpson, Shannon y Riqueza) de fincas analizadas de acuerdo con su riqueza de especies arbóreas	78
Tabla 2.1 Resultados de análisis físico-químicos de suelos de fincas productoras de cebolla de bulbo seleccionadas	94
Tabla 2.2 Valores de V-Kramer (P asociado) para las variables edáficas influyentes en la abundancia relativa de Hongos de micorriza arbuscular en 15 fincas productoras de cebolla de bulbo	98
Tabla 3.1 Tratamientos aplicados en condiciones de planta empacadora ...	119
Tabla 3.2 Microorganismos aislados de cultivos comerciales de aguacate .	120
Tabla 3.3 Concentración Mínima Inhibitoria in vitro del extracto de <i>S. marcescens</i> ARP5.1 frente a <i>C. gloeosporioides</i> y <i>P. cinnamomi</i> después de 7 días de incubación. SD: desviación estándar; Δ OD: diferencia de densidad óptica a 595 nm	121

Tabla 3.4 Parámetros de fermentación en un biorreactor de tanque agitado para <i>S. marcescens</i> ARP5.1 bajo diferentes condiciones operativas (Granada et al. 2018)	123
Tabla 4.1 Análisis físico-químico de suelos de la finca El Recreo, Guamo Tolima	143
Tabla 4.2 Resultados de la prueba de Wilcoxon de la variable número de colonias totales aislado del suelo asociado a <i>G. arborea</i> de la época de alta precipitación (muestreo 1) y época de baja precipitación (muestreo 2)	147
Tabla 4.3 Características físicas y químicas del suelo asociado a <i>G. arborea</i> en el cual se realizó el aislamiento de microorganismos de la época de alta precipitación (muestreo 1) y la época de baja precipitación (muestreo 2) ..	149
Tabla 4.4 Promedio y desviación estándar de parámetros físicos del suelo determinados a escala de parcela	155
Tabla 4.5 Producción de forraje y radiación transmitida en un arreglo agroforestal con <i>G. arborea</i>	156

Lista de Figuras

Figura 1.1 Distribución de los puntos de muestreo alrededor de las plantas de cacao	61
Figura 1.2 Comparación de los índices de diversidad de Simpson y Shannon considerando la clasificación de fincas de alta y baja biodiversidad. Comparación de medias con prueba T	68
Figura 1.3 Concentración de microorganismos (hongos y bacterias) en sistemas de alta y baja biodiversidad	72
Figura 1.4 Distribución de grupos microbianos y de fincas, de acuerdo con el ACP a partir de datos fisicoquímicos de suelo en fincas de alta y baja biodiversidad	78
Figura 2.1 Mapa de los municipios de Cucaita, Toca y Samacá en el departamento de Boyacá	91
Figura 2.2 APC para las especies de hongos de micorriza arbuscular, a partir de los datos de las variables mencionadas en la tabla 10 de 15 fincas productoras de cebolla en Boyacá	96
Figura 2.3 APC para los parámetros físico-químicos edáficos, a partir de los datos de 15 fincas productoras de cebolla en Boyacá	97
Figura 3.1 Pruebas de antagonismo. a) <i>In vitro</i> : Enfrentamiento de <i>C. gloeosporioides</i> con bacterias aisladas. b) <i>In vitro</i> : Inoculación de <i>C. gloeosporioides</i> en aguacates tratados con bacterias biocontroladoras	122
Figura 3.2 Efecto de los tratamientos para la prevención de Body Rot y Stem End Rot en el predio #1	128
Figura 3.3 Efecto de los tratamientos para la prevención de Body Rot y Stem End Rot en el predio #2	128
Figura 3.4 Efecto de los tratamientos para el control de Body Rot y Stem End Rot en la poscosecha	129
Figura 4.1 Diagrama del modelo experimental de <i>Gmelina arborea</i> en laboratorio, vivero y campo y sus interacciones	141

Figura 4.2 Modelo analógico de los puntos de medición y sus tendencias en indicadores físicos del suelo 145

Figura 4.3 Conteo de microorganismos en suelo asociado a *G. arborea* de la época de alta precipitación (muestreo 1) y época de baja precipitación (muestreo 2), según los árboles. A. Mesófilas totales (Log UFC totales/g de suelo seco), B. Solubilizadores de fosfato tricálcico $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)$ (Log UFC/g de suelo seco) 146

Figura 4.4 Número de cepas con índice de solubilización de fosfato con un $\text{IS} \geq 2.5$ aislado del suelo asociado a *G. arborea* de la época de alta precipitación (muestreo 1) y la época de baja precipitación (muestreo 2) .. 150

Figura 4.5 Gráfico de correlación entre solubilizadores de fosfato (Log UFC/g de suelo seco) y diferentes variables fisicoquímicas (pH, CICE, N.A. y DA) del suelo asociado a *G. arborea* 151

Figura 4.6 Germinación a los 21 días de *G. arborea* a diferentes niveles de sustitución de fertilizante químico utilizando un inóculo microbiano en etapa de vivero 153

Figura 4.7 Promedio del peso seco y la altura de las plantas de *G. arborea* al día 90 entre tratamientos de sustitución de fertilizante químico 153

Figura 4.8 Crecimiento de *Gmelina arborea* en una pastura de *Bohtriochloa pertusa* en al Guamo (Tolima) 154

Figura 4.9 Actividad microbiana y biomasa microbiana en muestras de suelo a cuatro distancias del fuste de *G. arborea* 158

El libro “Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales”, es el resultado del esfuerzo conjunto entre la Universidad del Tolima, Corporación Universitaria Minuto de Dios (UNIMINUTO), Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB), como centro de investigación; y ZENKINOKO SAS. Esta colaboración se desarrolló en el marco del programa “Productos y procesos tecnológicos con microorganismos rizosféricos para la restauración de suelos degradados en ecosistemas agroforestales y agrícolas” (Contrato 450 de 2021, Ministerio de Ciencias, Fondo Francisco José de Caldas).

La obra reúne cinco capítulos que presentan experiencias de investigación orientadas a entender la interacción entre los microorganismos y las plantas, y a desarrollar soluciones biotecnológicas para la producción agropecuaria. Desde estudios de laboratorio hasta aplicaciones en campo, se abordan procesos de bioprospección y desarrollo de bioinsumos con potencial para fortalecer la sostenibilidad agrícola.

Los casos presentados evidencian cómo las alternativas biotecnológicas pueden contribuir a mejorar la productividad y calidad de cultivos como cacao, aguacate, cebolla de bulbo y melina, respondiendo a los retos actuales y futuros de la agricultura. Además, destacan la relevancia de la investigación, el desarrollo y la innovación en la bioprospección aplicada al sector agroindustrial, con posibilidades de ser replicadas en otros sistemas productivos.

Confiamos en que este libro se constituya en un punto de referencia para investigadores, docentes y estudiantes interesados en la biotecnología agrícola, la salud del suelo, así como la restauración y el manejo sostenible de los agroecosistemas.



UNIMINUTO
Corporación Universitaria Minuto de Dios
Educación de calidad al alcance de todos

