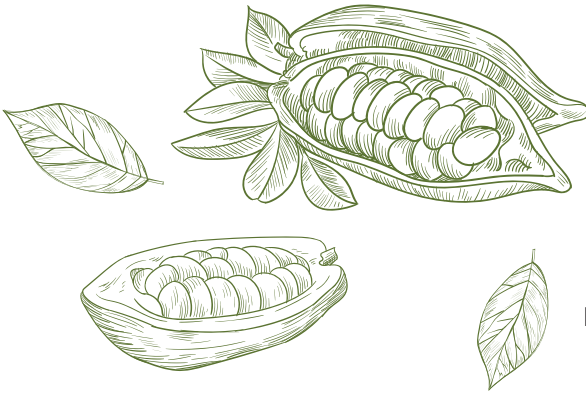


CAPÍTULO 1

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

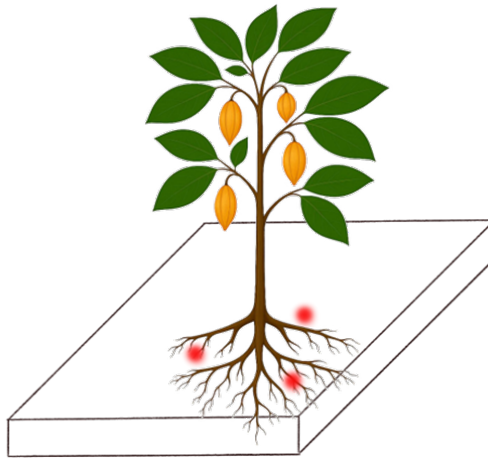
Muestreo de suelos

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>Ammona 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

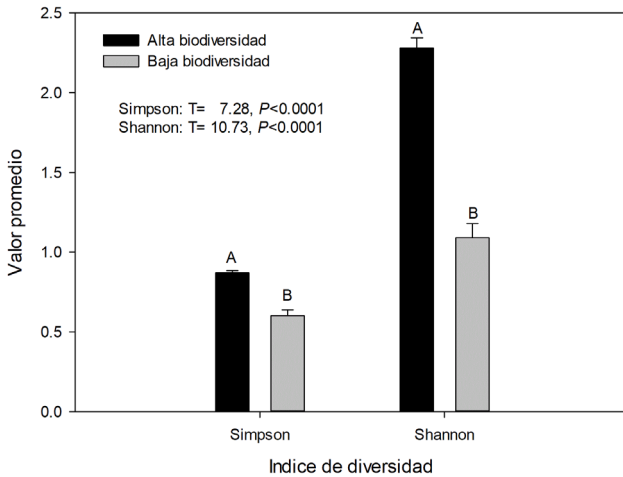
De acuerdo con las tipologías de alta (9–11) y baja (2–5) biodiversidad previamente establecidas para la zona de estudio, la diversidad arbórea de acuerdo a Simpson y Shannon es completamente diferente, conformando grupos separados ($P < 0.0001$), y por lo tanto confirmando que las fincas pueden ser 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)

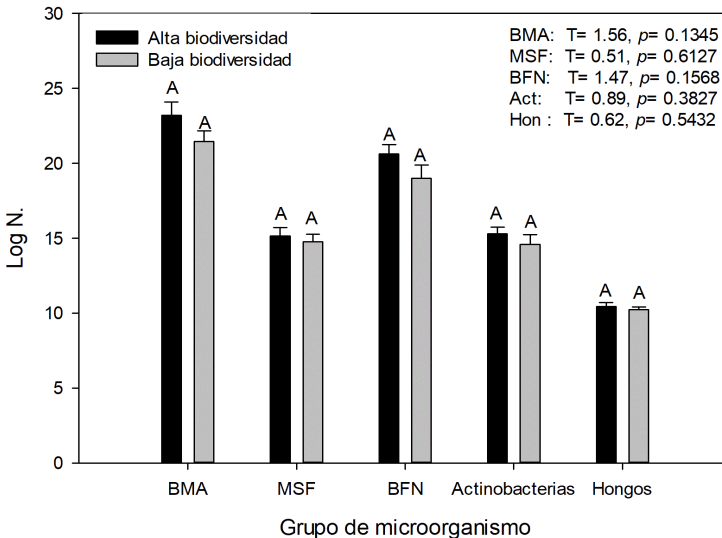
Fuente: Elaboración propia

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

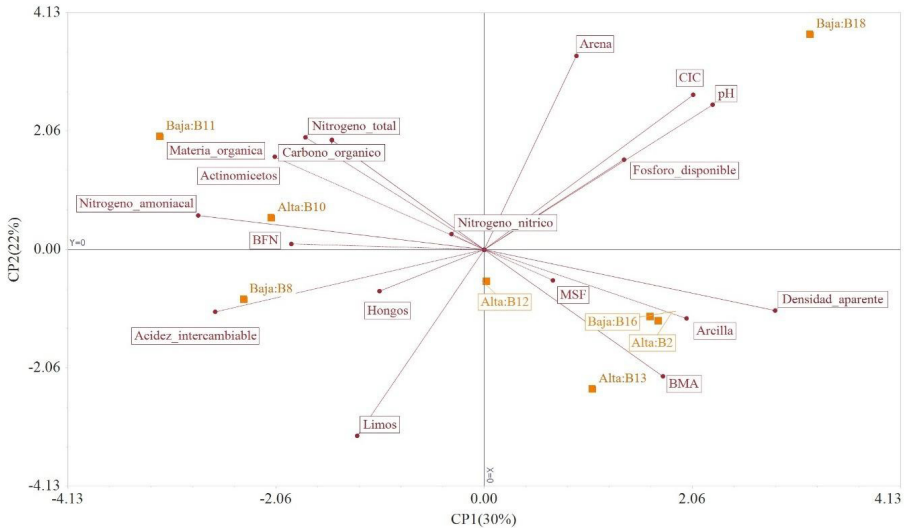
	Simpson		Shannon		Riqueza	
	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja
Bacterias mesófilas aerobias	-0.36	-0.39	-0.37	-0.29	-0.27	-0.22
Hongos	-0.13	0.58*	-0.10	0.55	-0.16	0.54
Bacterias solubilizadoras de fosfato de calcio	0.02	-0.28	0.04	-0.20	-0.03	-0.14
Bacterias fijadoras de nitrógeno	0.62*	0.22	0.62*	0.22	0.57*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