

PATRONES DE COLONIZACIÓN MICORRÍZICA Y SU ASOCIACIÓN CON GRADIENTES EDÁFICOS EN UN BOSQUE SECUNDARIO DEL HUMEDAL ABRAS DE MANTEQUILLA

PATTERNS OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL COLONIZATION AND THEIR ASSOCIATION WITH EDAPHIC GRADIENTS IN A SECONDARY FOREST OF THE ABRAS DE MANTEQUILLA WETLAND

Oscar Oswaldo Prieto Benavides^{1*}

¹ Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4101-0523>. Correo: oprieto@uteq.edu.ec

Jennifer Lisseth Vivanco Ube²

² Maestría en Agroecología y Desarrollo Sostenible, Facultad de Posgrado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8426-8854>. Correo: jennifer.vivanco2016@uteq.edu.ec

Lady Diana Molina Zamora³

³ Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0146-2868>. Correo: lady.molina2016@uteq.edu.ec

Ivanna Anabella Villanueva Moran⁴

⁴ Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9843-9444>. Correo: ivanna.villanueva2016@uteq.edu.ec

* Autor para correspondencia: oprieto@uteq.edu.ec

Resumen

El estudio evaluó la dinámica de colonización micorrízica arbuscular y su relación con gradientes edáficos en un bosque secundario del humedal Abras de Mantequilla, con el propósito de comprender la variabilidad funcional de la simbiosis suelo-hongo-planta en especies forestales nativas. Se muestrearon raíces y suelos asociados a *Albizia guachapele*, *Cecropia peltata*, *Eugenia pustulescens* y *Guazuma ulmifolia* durante la estación lluviosa, determinándose el porcentaje de colonización mediante tinción diferencial y evaluación microscópica, mientras que los atributos físicoquímicos del suelo fueron analizados mediante procedimientos

estandarizados. Los resultados revelaron diferencias significativas en la intensidad de colonización, destacándose *Cecropia peltata* como la especie con mayor dependencia micorrízica y *Eugenia pustulescens* como la de menor asociación. La correlación de Pearson mostró relaciones específicas entre la colonización y variables edáficas, incluyendo pH, macro y micronutrientes, y proporciones texturales del suelo; entre ellas, *Guazuma ulmifolia* presentó correlaciones positivas con pH, Al, K y Mn, *Albizia guachapele* con Fe, Mo, Zn y Ca, y *Cecropia peltata* exhibió la mayor amplitud de asociaciones con elementos como Ca, P y Mn. De forma complementaria, las propiedades físicas evidenciaron afinidades texturales contrastantes entre especies, lo que confirma la influencia de la estructura del suelo en la expresión de la simbiosis. Los resultados sugieren que la variabilidad edáfica condiciona la colonización micorrízica y que ciertas especies pueden desempeñar un papel funcional en la estabilidad ecológica del ecosistema, aportando lineamientos relevantes para programas de restauración y manejo forestal en humedales tropicales.

Palabras clave: simbiosis; ecología forestal; nutrientes del suelo; interacciones raíz-hongo; humedales tropicales

Abstract

The study assessed the dynamics of arbuscular mycorrhizal colonization and its relationship with edaphic gradients in a secondary forest of the Abras de Mantequilla wetland, aiming to elucidate the functional variability of the soil-fungus-plant symbiosis in native forest species. Root and soil samples associated with Albizia guachapele, Cecropia peltata, Eugenia pustulescens, and Guazuma ulmifolia were collected during the rainy season; colonization percentages were determined through differential staining and microscopic evaluation, while soil physicochemical attributes were analyzed using standardized procedures. The findings revealed significant differences in colonization intensity, with Cecropia peltata showing the highest mycorrhizal dependence and Eugenia pustulescens the lowest. Pearson correlations indicated species-specific associations between colonization and edaphic variables, including pH, macro- and micronutrient availability, and soil textural proportions. Guazuma ulmifolia exhibited positive correlations with pH, Al, K, and Mn; Albizia guachapele was associated with Fe, Mo, Zn, and Ca; and Cecropia peltata showed the broadest set of relationships, particularly with Ca, P, and Mn. Complementary analyses of soil physical properties revealed contrasting textural affinities among species, confirming the role of soil structure in modulating the symbiosis. Overall, the results suggest that edaphic variability constrains arbuscular mycorrhizal colonization and that certain species may contribute functionally to the ecological stability of the ecosystem, providing relevant insights for restoration strategies and forest management in tropical wetlands.

Keywords: symbiosis; forest ecology; soil nutrients; root–fungus interactions; tropical wetland.

Fecha de recibido: 22/09/2025

Fecha de aceptado: 09/12/2025

Fecha de publicado: 11/12/2025

Introducción

Los bosques tropicales constituyen reservorios esenciales de biodiversidad y funciones ecosistémicas, desempeñando un papel fundamental en el ciclo global de carbono, la regulación hidrológica y la provisión de servicios ecosistémicos (Maldonado y Moreno-Sánchez, 2023). No obstante, gran parte de estos ecosistemas ha sido transformada o fragmentada como resultado de alteraciones antrópicas, deforestación y cambios de uso de suelo, lo que en muchos casos conduce a la formación de bosques secundarios o ecosistemas degradados (Ccahuana, 2025). En ese contexto, comprender los procesos biológicos subterráneos, especialmente, las interacciones planta, suelo y microorganismo resulta crucial para evaluar la recuperación ecológica, la restauración y la resiliencia del ecosistema. Entre tales interacciones, la simbiosis con hongos micorrízicos juega un papel central.

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son organismos clave en los ecosistemas terrestres, pues facilitan la adquisición de nutrientes (especialmente fósforo inorgánico y nitrógeno), mejoran la captación de agua, aumentan la tolerancia a estrés abiótico y patógenos, y promueven la estabilidad funcional de las comunidades vegetales (Medina-García, 2022). Además, las redes hifales contribuyen al flujo de carbono desde las raíces hacia la comunidad microbiana del suelo, mediando procesos de mineralización de materia orgánica y reciclaje de nutrientes (Watson y Rivera, 2025). Este papel integrador entre compartimentos bióticos y abióticos convierte a los HMA en componentes esenciales para la productividad, diversidad y resiliencia de los ecosistemas forestales tropicales.

Diversos estudios han mostrado que la estructura, densidad y diversidad de las comunidades de HMA en bosques tropicales son influenciadas tanto por la identidad de la especie hospedera como por factores edáficos y ambientales. Por ejemplo, la composición de comunidades micorrízicas puede variar notoriamente entre especies arbóreas en un mismo bosque, e incluso a lo largo de gradientes de suelo (fertilidad, pH, textura, disponibilidad de nutrientes) (Silva y Montoya, 2022).

En escenarios de transformación de uso de suelo, como la conversión de bosque natural en plantaciones o en bosques secundarios (Ipinza *et al.*, 2021), los cambios en las condiciones edáficas pueden alterar la riqueza, estructura y colonización de HMA, con consecuencias sobre la regeneración, diversidad vegetal y funcionamiento del ecosistema. Particularmente, en suelos húmedos o húmedo-tropicales, las condiciones de saturación, variabilidad del pH, disponibilidad de fósforo y otros nutrientes, así como la textura y estructura del suelo, pueden ejercer una fuerte presión sobre la composición y eficiencia de la simbiosis (Sagadin *et al.*, 2023).

Sin embargo, a pesar de la importancia ecológica de los HMA, la evidencia disponible para humedales tropicales y bosques secundarios en Latinoamérica sigue siendo limitada, especialmente respecto a cómo los gradientes edáficos influyen en los patrones de colonización y su variabilidad entre especies arbóreas nativas. En este contexto, los humedales del complejo Abras de Mantequilla representan un sistema de alta relevancia ecológica en Ecuador, dada su biodiversidad, su estructura de bosque secundario y las presiones antrópicas y ambientales que moldean sus suelos (Ube *et al.*, 2024).

Por tanto, el presente estudio tiene como objetivo caracterizar los patrones de colonización micorrízica arbuscular en cuatro especies forestales nativas presentes en el bosque secundario del humedal Abras de

Mantequilla, y evaluar su asociación con gradientes edáficos (incluyendo variables químicas y texturales del suelo). Este enfoque permitió revelar la variabilidad funcional de la simbiosis suelo-hongo-planta en un contexto real de bosque tropical húmedo, aportar datos empíricos sobre la dependencia micorrízica de especies nativas, y proporcionar información relevante para estrategias de restauración ecológica, conservación y manejo sostenible del humedal.

Materiales y métodos

Área de estudio y diseño del muestreo

El estudio se desarrolló en el humedal Abras de Mantequilla, ubicado en la provincia de Los Ríos, Ecuador, un ecosistema reconocido internacionalmente por su importancia ecológica y su función como regulador hidrológico en la cuenca baja del río Daule. El sitio de muestreo correspondió a un bosque secundario dentro del sector conocido como “Noé Morán”, caracterizado por una matriz arbórea diversa compuesta por especies nativas propias de ambientes húmedo-tropicales. El clima predominante es megatérmico húmedo, con una temperatura media anual superior a 24 °C y precipitaciones concentradas en los primeros meses del año, lo que favorece la estacionalidad marcada del régimen hídrico (Romero *et al.*, 2024). Los suelos del área presentan variaciones en textura, pH y contenido de nutrientes, lo que genera gradientes edáficos relevantes para la dinámica de los hongos micorrízicos arbusculares.

Para la evaluación de la colonización micorrízica se seleccionaron cuatro especies arbóreas presentes en el bosque secundario: *Albizia guachapele*, *Cecropia peltata*, *Eugenia pustulescens* y *Guazuma ulmifolia*. La selección se realizó mediante un recorrido sistemático, registrando individuos sanos y representativos de la estructura del bosque (Figura 1). En cada especie se establecieron tres puntos de muestreo independientes, separados espacialmente para evitar autocorrelación y capturar la variabilidad ambiental local. En cada punto se recolectaron raíces finas (<2 mm de diámetro) tomadas a una profundidad aproximada de 20 cm y en un radio cercano al sistema radical activo, además de una muestra compuesta de suelo rizosférico.

Las raíces fueron almacenadas en etanol al 70% hasta su procesamiento en laboratorio, mientras que los suelos se conservaron en bolsas herméticas para análisis de humedad, textura, pH, concentración de macro y micronutrientes, y contenido de aluminio intercambiable. Este diseño permitió integrar la información biológica y edáfica, facilitando la evaluación de las asociaciones entre los patrones de colonización micorrízica y las propiedades fisicoquímicas del suelo a lo largo del gradiente ambiental del bosque secundario.

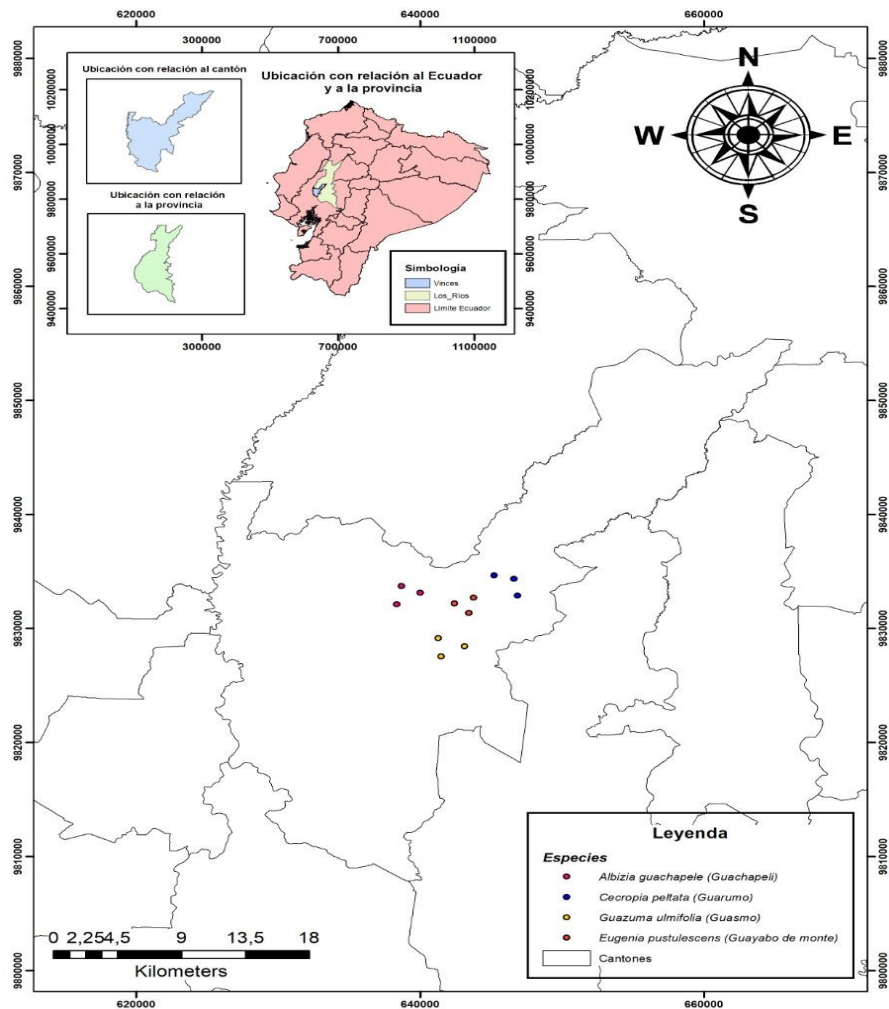


Figura 1. Ubicación geográfica de las muestras recolectadas en el Bosque secundario "Noé Morán" del humedal abras de mantequilla, Cantón Vinces, provincia de los Ríos.

Muestreo de suelo y raíces

El muestreo se realizó durante la estación lluviosa, periodo en el cual las condiciones de humedad favorecen la actividad rizosférica y la expresión de la simbiosis micorrízica. Para cada una de las cuatro especies seleccionadas (*Albizia guachapele*, *Cecropia peltata*, *Eugenia pustulescens* y *Guazuma ulmifolia*), se identificaron tres individuos separados espacialmente, a fin de obtener réplicas independientes que representaran la variabilidad ambiental del bosque secundario.

En cada individuo se extrajeron raíces finas con diámetros menores a 2 mm, correspondientes a los tejidos más activos en la formación de arbusculos y vesículas. Las raíces fueron obtenidas mediante excavación cuidadosa alrededor de la zona de mayor densidad radical, aproximadamente a 20 cm de profundidad, procurando evitar daños mecánicos que afectaran la integridad de los tejidos. Posteriormente, las muestras se

lavarón suavemente para eliminar restos de suelo adherido y se almacenaron en etanol al 70% en frascos esterilizados hasta su procesamiento en laboratorio.

De manera complementaria, se recolectó suelo rizosférico asociado a cada individuo, correspondiente a la fracción de suelo que permanece adherida a las raíces después de un leve sacudido manual. Este suelo se obtuvo empleando herramientas desinfectadas para evitar contaminación cruzada y se depositó en bolsas herméticas correctamente rotuladas. La muestra de suelo sólida se dividió en dos subfracciones: una destinada al análisis físico (textura, humedad y densidad aparente) y otra al análisis químico (pH, materia orgánica, nitrógeno total, fósforo disponible, potasio intercambiable y micronutrientes), preservando condiciones óptimas de almacenamiento para garantizar la estabilidad de los parámetros.

Este protocolo de muestreo permitió obtener material biológico y edáfico representativo, garantizando la trazabilidad de cada unidad muestral y asegurando la consistencia requerida para los análisis de colonización micorrízica y su asociación con los gradientes edáficos del sitio de estudio (González *et al.*, 2021).

Análisis de propiedades químicas y granulometría del suelo

Las propiedades químicas y textural del suelo asociadas a cada individuo muestreado se evaluaron mediante procedimientos analíticos estandarizados, con el propósito de caracterizar los gradientes edáficos y determinar su relación con los patrones de colonización micorrízica arbuscular. Las muestras de suelo rizosférico fueron secadas a temperatura ambiente, homogenizadas y tamizadas a 2 mm para la obtención de la fracción fina destinada a los análisis.

La textura del suelo se determinó mediante el método de la pipeta o hidrómetro, obteniéndose los porcentajes de arena, limo y arcilla para caracterizar la estructura granulométrica del suelo en cada punto de muestreo, el pH del suelo se determinó en una suspensión suelo-agua (1:2,5) utilizando un potenciómetro previamente calibrado. El contenido de materia orgánica se cuantificó mediante el método de Walkley-Black por oxidación húmeda (da Silva *et al.*, 2024). El nitrógeno total se estimó mediante el procedimiento de Kjeldahl, mientras que el fósforo disponible se determinó utilizando el método Bray II, apropiado para suelos ácidos característicos de ambientes húmedo-tropicales. El potasio intercambiable, junto con Ca, Mg y Na, se extrajo mediante acetato de amonio 1N a pH 7, y su concentración fue cuantificada por fotometría de emisión o absorción atómica según el elemento analizado.

Los micronutrientes Fe, Mn, Zn y Cu se obtuvieron mediante extracción con DTPA (ácido dietilentriaminopentaacético) y se analizaron por espectrofotometría de absorción atómica (Gannini *et al.*, 2021). El aluminio intercambiable se determinó mediante extracción con KCl 1N y cuantificación posterior por titulación o espectrofotometría, según el protocolo del laboratorio. Todos los análisis fueron realizados en condiciones controladas y siguiendo normas de calidad que aseguran la precisión y reproducibilidad de los datos.

Aclaración, coloración y evaluación de la colonización micorrízica de raíces

Las raíces finas conservadas en etanol al 70% fueron procesadas siguiendo protocolos modificados de Phillips y Hayman (1970) para la aclaración, coloración y evaluación de estructuras micorrízicas arbusculares. Inicialmente, las raíces fueron lavadas con agua destilada para retirar el etanol residual y posteriormente sometidas a un proceso de aclaración con KOH al 10% en baño térmico a 90 °C durante 20 a 30 minutos,

dependiendo del nivel de lignificación del tejido. Una vez aclaradas, las raíces se enjuagaron cuidadosamente y se neutralizaron mediante inmersión breve en HCl al 1%, lo que favoreció una mejor fijación del colorante.

La coloración se realizó utilizando azul de tripano al 0,05% preparado en lactoglicerol, manteniendo las raíces en la solución colorante a 90 °C durante 10 minutos y dejándolas reposar posteriormente para permitir una penetración homogénea en los tejidos. Finalizado este proceso, las raíces fueron conservadas en lactoglicerol para evitar decoloración y facilitar la observación microscópica.

La evaluación de la colonización micorrízica se llevó a cabo mediante el método de intersecciones aleatorias bajo microscopio óptico compuesto (40×), analizando entre 80 y 100 fragmentos por muestra, cortados en segmentos de aproximadamente 1 cm de longitud. En cada fragmento se registró la presencia o ausencia de estructuras típicas de hongos micorrízicos arbusculares, incluyendo hifas intracelulares, arbusculos y vesículas. Con esta información se calculó el porcentaje de colonización total y se identificaron patrones de variación entre especies arbóreas.

Análisis estadístico de los datos

Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software IBM SPSS Statistics versión 23. Los porcentajes de colonización micorrízica arbuscular obtenidos para *Albizia guachapele*, *Cecropia peltata*, *Eugenia pustulescens* y *Guazuma ulmifolia* fueron transformados mediante la función $\arcsen\sqrt{x}$ con el propósito de cumplir los supuestos de normalidad requeridos para el análisis paramétrico. Posteriormente, las diferencias entre especies en el porcentaje de colonización se evaluaron mediante la prueba *t* de Student, empleando un criterio de significancia de $p \leq 0,05$.

Para determinar la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la colonización micorrízica, se aplicó un análisis de correlación de Pearson considerando todas las variables edáficas medidas. Las diferencias entre los promedios asociados a las correlaciones se interpretaron utilizando la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$), incorporando adicionalmente un nivel de significancia más estricto ($p \leq 0,01$) para identificar asociaciones altamente confiables. Este enfoque permitió establecer patrones estadísticos robustos que vinculan los gradientes edáficos con la intensidad de colonización micorrízica en las especies estudiadas.

Resultados y discusión

Análisis químico del suelo

La Tabla 1 revela diferencias claras en los porcentajes de colonización micorrízica arbuscular entre las cuatro especies evaluadas, evidenciando una respuesta diferencial de las plantas frente a las condiciones edáficas del bosque secundario. *Cecropia peltata* presentó el valor más alto de colonización, lo cual concuerda con su papel como especie pionera y su elevada dependencia de la simbiosis para sostener tasas aceleradas de crecimiento en ambientes con fluctuaciones nutrimentales.

Este resultado sugiere que la colonización micorrízica constituye un componente central de su estrategia ecológica, permitiéndole optimizar la adquisición de recursos en suelos con limitaciones de fósforo u otros nutrientes esenciales (Carrillo *et al.*, 2022). De acuerdo con Medina (2022), el elevado grado de colonización observado también puede reflejar una mayor compatibilidad con la comunidad local de hongos micorrízicos arbusculares (HMA), lo que favorecería su establecimiento temprano en mosaicos edáficos heterogéneos.

Guazuma ulmifolia mostró un nivel de colonización moderado, lo que indica una asociación activa pero no tan intensiva como la registrada en *C. peltata*. Este comportamiento es coherente con su carácter de especie secundaria temprana, capaz de prosperar en suelos con niveles variables de fertilidad sin depender estrictamente de la simbiosis. Por su parte, *Albizia guachapele* presentó valores intermedios a bajos, lo que sugiere que la fijación biológica de nitrógeno característica de las Fabaceae podría reducir parcialmente su necesidad de una alta colonización micorrízica (De Bedout *et al.*, 2022). Este patrón podría estar reforzado por su presencia en micrositos con mayor disponibilidad de nutrientes, donde la simbiosis deja de ser una ventaja comparativa determinante.

En cuanto que, *Eugenia pustulescens* registró la menor colonización, lo cual indica una dependencia micorrízica más reducida o una menor compatibilidad con la comunidad de HMA presente en el sitio. Este patrón puede deberse a estrategias ecofisiológicas más conservadoras, asociadas a una mayor eficiencia en la absorción directa de nutrientes o a la preferencia por microambientes que no favorecen el desarrollo fúngico (Almaguer *et al.*, 2023). Desde una perspectiva funcional, Carrillo *et al.* (2021) mencionan que estas diferencias interespecíficas evidencian que la intensidad de la colonización micorrízica no solo responde a la disponibilidad edáfica, sino también a la estrategia ecológica de cada especie y a su capacidad para interactuar óptimamente con la biota del suelo. En este contexto, los resultados sugieren que la simbiosis micorrízica actúa como un eje modulador clave en la estructuración de comunidades vegetales en bosques secundarios tropicales, contribuyendo a las trayectorias sucesionales y al funcionamiento ecosistémico (Fiorilli *et al.*, 2024).

Tabla 1. Análisis químicos de las muestras de suelo recogidas en la estación lluviosa en presencia/ausencia *Guazuma ulmifolia*, *Albizia guachapele*, *Eugenia pustulescens* y *Cecropia peltata* en el bosque secundario “Noé Morán”.

Variables químicas	Especies				Media
	<i>Guazuma ulmifolia</i>	<i>Albizia guachapele</i>	<i>Eugenia pustulescens</i>	<i>Cecropia peltata</i>	
pH	6,26 ± 0,49 ^a	5,61 ± 0,42 ^a	6,14 ± 0,81 ^a	5,90 ± 0,86 a	5,98
Mo	23,60 ± 1,82 ^a	23,00 ± 1,14 ^a	24,40 ± 1,52 ^a	24,40 ± 2,97 ^a	23,95
P	5,60 ± 1,14 ^a	7,00 ± 1,00 ^a	6,40 ± 1,82 ^a	6,40 ± 1,14 ^a	6,35
K	57,20 ± 1,48ab	54,60 ± 12,72ab	40,60 ± 15,09b	61,80 ± 4,86a	53,55
Ca	1,40 ± 0,55 ^a	1,40 ± 0,55 ^a	2,00 ± 1,00 ^a	2,00 ± 0,70 ^a	1,70
Mg	1,20 ± 0,44 ^a	1,60 ± 0,55 ^a	1,40 ± 0,55 ^a	1,80 ± 0,45 ^a	1,50
Al	6,40 ± 1,14 ^a	6,20 ± 1,48 ^a	6,80 ± 0,45 ^a	6,60 ± 1,67 ^a	6,50
S	7,40 ± 1,52 ^a	7,60 ± 0,89 ^a	6,40 ± 0,55 ^a	7,40 ± 1,52 ^a	7,20
Cu	0,62 ± 0,11ab	0,5 ± 0,12ab	0,42 ± 0,13b	0,65 ± 0,11 ^a	0,55
Fe	8,80 ± 1,48b	8,20 ± 1,48b	11,40 ± 1,14 ^a	7,60 ± 1,52b	9,00
Zn	0,28 ± 0,05 ^a	0,37 ± 0,11 ^a	0,37 ± 0,09 ^a	0,42 ± 0,12 ^a	0,36
Mn	11,19 ± 0,81 ^a	8,65 ± 0,80ab	7,74 ± 1,91b	4,25 ± 2,22c	7,96
B	0,25 ± 0,06ab	0,18 ± 0,01b	0,28 ± 0,43 ^a	0,22 ± 0,06ab	0,23

Nota: Letras distintas entre especies forestales denotan diferencias significativas (prueba de Tukey, $p < 0,05$)

Análisis granulométrico del suelo

La textura del suelo mostró variaciones claras entre las zonas donde se establecen las especies forestales evaluadas, configurando gradientes edáficos con implicaciones directas para la simbiosis micorrízica. En términos generales, los suelos presentaron texturas francas a franco-arcillosas, con predominio de arena. Aunque esta fracción no mostró diferencias significativas, se observó una tendencia hacia valores más elevados en *Albizia guachapele* (281,20 g kg⁻¹) y *Eugenia pustulescens* (270,60 g kg⁻¹), en comparación con *Cecropia peltata* (232,20 g kg⁻¹). Estos valores sugieren microhábitats más aireados bajo las primeras especies, lo que puede favorecer una mayor actividad microbiana y el desarrollo de redes hifales. En contraste, los contenidos de limo fueron mayores en *Guazuma ulmifolia* (83,40 g kg⁻¹) y *A. guachapele* (65,40 g kg⁻¹), condición que mejora la retención de agua y la estabilidad de agregados, factores que suelen promover el establecimiento de comunidades microbianas más diversas y funcionales.

La fracción arcilla mostró las diferencias más marcadas entre especies ($p < 0,05$), con valores significativamente superiores en *A. guachapele* (164,00 g kg⁻¹) y *G. ulmifolia* (158,40 g kg⁻¹), frente a los contenidos más bajos registrados en *E. pustulescens* (91,22 g kg⁻¹) y *C. peltata* (92,60 g kg⁻¹). Esta heterogeneidad textural sugiere la existencia de nichos edáficos contrastantes que modulan la disponibilidad de nutrientes y la estabilidad hídrica del sustrato, aspectos que influyen directamente en la eficiencia simbiótica de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) (de Souza *et al.*, 2024).

Los suelos de mayor proporción arcillosa ofrecen mayor capacidad de intercambio catiónico y retención de agua, creando condiciones más favorables para la persistencia del micelio y para una colonización más estable. Por el contrario, las texturas más arenosas pueden generar una colonización más dinámica pero menos persistente, dependiente de la renovación constante de estructuras fúngicas (Pauwels *et al.*, 2023). Estos patrones indican que la textura del suelo funciona como un filtro ecológico que condiciona la intensidad y efectividad de la simbiosis HMA-planta en este bosque secundario tropical (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis granulométrico de suelo recogidas en la época lluviosa de las especies forestales: *Guazuma ulmifolia*, *Albizia guachapele*, *Eugenia pustulescens* y *Cecropia peltata* en el bosque secundario “Noé Morán” del humedal abras de mantequilla.

Análisis granulométrico	Especies				Media
	<i>Guazuma ulmifolia</i>	<i>Albizia guachapele</i>	<i>Eugenia pustulescens</i>	<i>Cecropia peltata</i>	
Arena	269,60 ± 44,34 a	281,20 ± 52,75 a	270,60 ± 55,67 a	232,20 ± 57,01 a	263,4
Limo	64,80 ± 9,31 a	65,4 ± 13,05 a	83,40 ± 18,12 a	59,00 ± 14,78 a	68,15
Arcilla	158,40 ± 8,76 a	164,00 ± 28,53 a	91,220 ± 5,26 b	92,60 ± 5,12 b	126,5

Nota: Significancia obtenida con el nivel de probabilidad del 5% según la prueba de Tukey.

Porcentaje de colonización micorrízica en raíces de cuatro especies forestales del bosque secundario “Noé Morán”

Los resultados de la Tabla 3 revelan diferencias sustanciales en los niveles de colonización micorrízica entre las especies arbóreas evaluadas, lo que pone en evidencia la variabilidad funcional de la simbiosis HMA-planta dentro del bosque secundario del humedal Abras de Mantequilla. El mayor porcentaje de colonización registrado en *Cecropia peltata* (43,7%) sugiere una marcada dependencia de la simbiosis como estrategia

adaptativa para optimizar la adquisición de nutrientes en ambientes húmedo-tropicales con fluctuaciones estacionales en disponibilidad edáfica (Shi *et al.*, 2023). En este sentido, de acuerdo con Ahmed *et al.* (2025) este comportamiento coincide con el rol pionero de la especie, caracterizado por una demanda elevada de nutrientes para sostener altas tasas de crecimiento en estadios tempranos de sucesión.

El segundo valor más alto, observado en *Albizia guachapele* (31,2%), también refleja una relación simbiótica relevante, posiblemente vinculada a su estrategia de crecimiento rápido y a la capacidad de complementar la fijación biológica de nitrógeno con la mejora en la adquisición de fósforo, potasio y micronutrientes mediada por los HMA. En contraste, *Guazuma ulmifolia* presenta una colonización intermedia (18,8%), lo cual, según Liu y Chen (2024) podría obedecer a una menor dependencia funcional de los hongos micorrízicos o a una mayor eficiencia fisiológica intrínseca para explorar el suelo mediante su propio sistema radical.

Por su parte, *Eugenia pustulescens* exhibe el porcentaje más bajo (6,3%), lo que sugiere que esta especie podría estar asociada a mecanismos alternativos de adquisición de nutrientes o que su compatibilidad con la comunidad local de HMA es limitada. Este comportamiento también podría reflejar un patrón ecológico asociado a especies más tolerantes a suelos moderadamente ácidos o con mayores contenidos de aluminio, donde algunas plantas tienden a reducir la inversión en estructuras micorrízicas.

Estos resultados confirman lo mencionado por Fernández *et al.* (2022), que la interacción HMA-planta no es homogénea entre especies coexistentes y que las diferencias en colonización responden tanto a la identidad vegetal como a las condiciones edáficas locales. El gradiente observado sugiere una estructura funcional en la cual las especies pioneras o de rápido crecimiento dependen más intensamente de la simbiosis, mientras que especies más conservadoras muestran valores reducidos, posiblemente reflejando estrategias de uso de recursos más eficientes o adaptadas al sustrato del bosque. Este patrón es consistente con la dinámica ecológica de bosques secundarios, donde los HMA desempeñan un papel clave en la regeneración, la resiliencia del ecosistema y el mantenimiento de la productividad bajo condiciones de variación climática y edáfica.

Tabla 3. Colonización micorrízica en raíces de *Guazuma ulmifolia*, *Albizia guachapele*, *Eugenia pustulescens* y *Cecropia peltata* en el bosque secundario “Noé Morán”

Especies	Colonización	
	%	$\arcsen\sqrt{x}$
<i>Guazuma ulmifolia</i>	18,8%	0,025b
<i>Albizia guachapele</i>	31,2%	0,027b
<i>Eugenia pustulescens</i>	6,3%	0,022c
<i>Cecropia peltata</i>	43,7%	0,029ab

Nota: Significancia obtenida con el nivel de probabilidad del 5% según la prueba de Tukey.

Porcentaje de colonización micorrízica entre individuos de la misma especie: *Cecropia peltata*, *Eugenia pustulescens*, *Albizia guachapele* y *Guazuma ulmifolia* en el bosque secundario “Noé Morán.”

La Figura 2 muestra el comportamiento comparativo del porcentaje de colonización micorrízica entre las cuatro especies evaluadas, evidenciando un patrón claramente diferenciado en la intensidad de la interacción planta-HMA. *Cecropia peltata* presentó el valor más alto (1,40%), superando de manera significativa a las otras especies, lo que confirma su alta dependencia funcional de la simbiosis micorrízica. Este patrón es coherente con su estrategia pionera, caracterizada por un crecimiento acelerado, elevada demanda nutrimental y la necesidad de mecanismos eficientes para la adquisición de recursos en suelos con variabilidad edáfica. La mayor colonización en *C. peltata* sugiere, además, una mayor compatibilidad con el consorcio de hongos micorrízicos presentes en el bosque secundario, posiblemente favorecida por su sistema radical más fino y mayor tasa de renovación de raíces (del Rosario *et al.*, 2025).

Las especies *Albizia guachapele* (1,09%), *Eugenia pustulescens* (0,96%) y *Guazuma ulmifolia* (0,75%) mostraron niveles de colonización significativamente menores, lo que apunta a estrategias adaptativas más conservadoras o a una menor afinidad con los hongos presentes. En el caso de *A. guachapele*, la fijación biológica de nitrógeno propia de las Fabaceae puede reducir la necesidad de una alta dependencia micorrízica, explicando sus valores intermedios. *E. pustulescens*, con un valor ligeramente inferior, podría estar asociada a una mayor selectividad por condiciones edáficas específicas o a un sistema radical con menor propensión a la colonización. *G. ulmifolia*, con el porcentaje más bajo, sugiere una menor dependencia simbiótica y posiblemente una mayor tolerancia a variaciones en la fertilidad del suelo, actuando como una especie menos dependiente de la simbiosis en ambientes secundarios.

En la Figura 2 se evidencia que la colonización micorrízica no se distribuye de forma homogénea entre especies co-ocurrentes, sino que responde a diferencias en estrategias ecológicas, afinidad micorrízica y adaptación a los microambientes dentro del bosque. Estos patrones refuerzan la idea de Carraro *et al.* (2024) que la simbiosis micorrízica constituye un eje funcional clave en la estructuración de comunidades vegetales en bosques secundarios tropicales, modulando tanto el establecimiento como el desempeño fisiológico de cada especie bajo condiciones de variación edáfica.

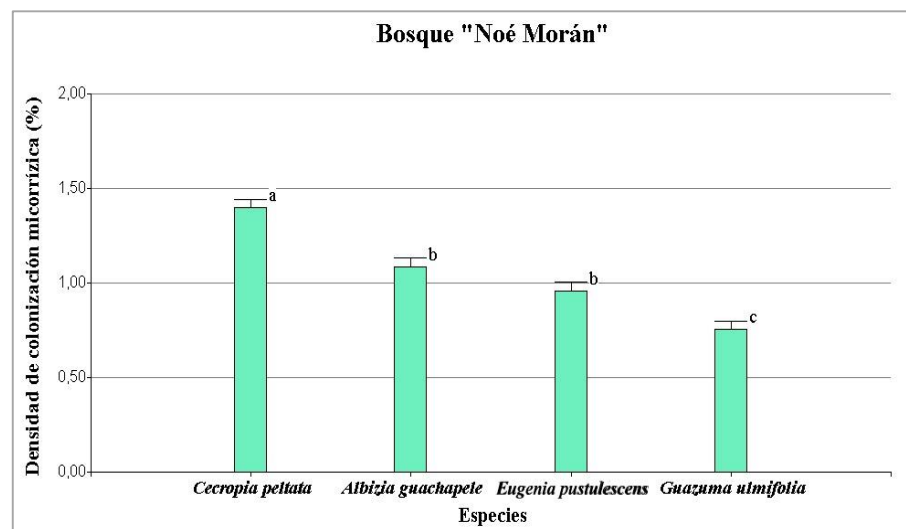


Figura 2. Porcentaje de densidad de colonización micorrízica en raíces *Cecropia peltata*, *Eugenia pustulescens*, *Albizia guachapele* y *Guazuma ulmifolia* en el bosque secundario “Noé Morán”.

Correlación entre la colonización micorrízica y los atributos químicos del suelo

En la Tabla 4 se muestra los resultados de la colonización micorrízica con correlaciones significativas en diversos atributos químicos del suelo, lo que confirma que los gradientes edáficos juegan un papel determinante en la dinámica simbiótica entre hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y las especies forestales evaluadas. En *Guazuma ulmifolia*, las correlaciones más elevadas se registraron con pH (0,72), Al (0,83), K (0,63) y Mn (0,53), lo que sugiere que esta especie responde de manera marcada a ambientes donde la acidez y la presencia de aluminio intercambiable constituyen factores limitantes.

La fuerte correlación con Al indica que la colonización micorrízica podría actuar como un mecanismo compensatorio para mitigar el estrés por toxicidad de aluminio, un fenómeno reportado frecuentemente en suelos ácidos tropicales (Bolou-Bi *et al.*, 2023). Asimismo, Wen *et al.* (2023) indican que las asociaciones con macronutrientes reflejan la capacidad de los HMA para mejorar la disponibilidad o absorción de estos elementos bajo condiciones de baja movilidad o competencia interradicular.

En *Albizia guachapele*, las correlaciones más altas se presentaron con Fe (0,849), Mo (0,69), Zn (0,59) y Ca (0,57), lo que evidencia la influencia de micronutrientes esenciales para la actividad enzimática y el metabolismo vegetal. La elevada correlación con Fe sugiere que la colonización micorrízica podría desempeñar un rol clave en la solubilización o transporte de este elemento en suelos con variabilidad redox, frecuente en ambientes de humedal. Igualmente, la relación positiva con Mo y Zn indica un posible incremento en la eficiencia nutrimental asociada a procesos fisiológicos dependientes de estos micronutrientes. En el caso de *Eugenia pustulescens*, la colonización se correlacionó con pH (0,63), Mg (0,58) y Cu (0,61), lo que apunta a una respuesta micorrízica más vinculada a la estabilización química del suelo y a la disponibilidad de nutrientes relacionados con el metabolismo energético y la actividad antioxidante (Lin *et al.*, 2022).

Cecropia peltata mostró el patrón de correlación más amplio, con asociaciones fuertes respecto a Ca (0,89), P (0,68), Mn (0,68), pH (0,56), Al (0,56) y Mo (0,42). Este comportamiento refuerza su carácter de especie pionera con elevada demanda nutrimental y confirma que la simbiosis micorrízica constituye un eje central en su estrategia ecológica (Madejón *et al.*, 2021). La fuerte correlación con Ca y P indica que los HMA desempeñan un papel crucial en la adquisición de nutrientes esenciales para el crecimiento acelerado y la formación de nuevos tejidos. Asimismo, la asociación positiva con Mn y Al sugiere tolerancia a condiciones químicas restrictivas, donde los HMA podrían mejorar la movilización o detoxificación de elementos potencialmente limitantes.

En este sentido, los patrones observados en la Tabla 4 demuestran que cada especie presenta firmas edáficas distintivas que modulan la intensidad y funcionalidad de la colonización micorrízica. Estas correlaciones evidencian que la interacción HMA-planta no depende únicamente de la disponibilidad general de nutrientes, sino de la combinación específica de factores químicos que caracterizan el nicho edáfico ocupado por cada especie (Medeiros *et al.*, 2021). Así, la simbiosis micorrízica emerge como un mecanismo de ajuste ecológico frente a la heterogeneidad del suelo, reforzando la coexistencia y el desempeño diferencial de las especies en el bosque secundario del humedal Abras de Mantequilla.

Tabla 4. Correlación (r) entre colonización micorrízica de esporas de HMA y los atributos químicos del suelo en las especies *Guazuma ulmifolia*, *Albizia guachapele*, *Eugenia pustulescens*, y *Cecropia peltata* en el bosque secundario “Noé Morán”.

Atributos químicos	Especies							
	<i>Guazuma ulmifolia</i>		<i>Albizia guachapele</i>		<i>Eugenia pustulescens</i>		<i>Cecropia peltata</i>	
	Correlación de Pearson	Nivel de significación (Sig)	Correlación de Pearson	Nivel de significación (Sig)	Correlación de Pearson	Nivel de significación (Sig)	Correlación de Pearson	Nivel de significación (Sig)
pH	0,727**	0,164**	0,267ns	0,664ns	0,633*	0,251*	0,567*	0,319*
Mo	0,172ns	0,782ns	0,691*	0,196*	-0,326ns	0,593ns	0,426*	0,474*
P	-0,551ns	0,336ns	-0,475ns	0,419ns	-0,620ns	0,264ns	0,688**	0,199**
K	0,636*	0,249*	-0,294ns	0,631ns	0,223ns	0,718ns	-0,580ns	0,305ns
Ca	0,288ns	0,639ns	0,572*	0,313*	0,149ns	0,811ns	0,892**	0,042**
Mg	-0,705ns	0,184ns	-0,572ns	0,313ns	0,587*	0,298*	-0,004ns	0,995ns
Al	0,83**	0,82**	0,424ns	0,477ns	-0,015ns	0,981ns	0,566*	0,320*
S	-0,389ns	0,162ns	0,355ns	0,558ns	-0,006ns	0,992ns	0,207ns	0,738ns
Cu	-0,389ns	0,517ns	-0,382ns	0,526ns	0,618*	0,267*	-0,609ns	0,276ns
Fe	-0,639ns	0,246ns	0,849**	0,690**	0,837	0,077	0,724	0,167
Zn	-0,099ns	0,874ns	0,597*	0,288*	-0,040ns	0,950ns	-0,252ns	0,683ns
Mn	0,534*	0,354*	-0,812ns	0,950ns	-0,320ns	0,600ns	0,688*	0,199*
B	0,024ns	0,970ns	0,272ns	0,658ns	-0,543ns	0,345ns	-0,230ns	0,710ns

Nota: *. La correlación es significativa en el nivel 0,05. **. La correlación es significativa en el nivel 0,01

Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian que los patrones de colonización micorrízica en el bosque secundario del humedal Abras de Mantequilla están fuertemente modulados por la identidad de la especie y por la heterogeneidad fisicoquímica del suelo, lo que confirma el papel determinante de los gradientes edáficos en la dinámica planta-HMA. *Cecropia peltata* destacó por su elevada colonización, reflejando su estrategia pionera y su alta dependencia simbiótica en ambientes restrictivos, mientras que *Guazuma ulmifolia*, *Albizia guachapele* y *Eugenia pustulescens* mostraron respuestas diferenciadas asociadas a sus propios nichos edáficos y estrategias ecofisiológicas.

Las correlaciones significativas entre la colonización y atributos como pH, Al, Ca, P, Fe y Mn demuestran que los HMA actúan como un mecanismo adaptativo clave frente a condiciones químicas contrastantes, facilitando la adquisición de nutrientes y contribuyendo a la tolerancia frente a factores edáficos limitantes. Estos hallazgos revelan que la simbiosis micorrízica constituye un componente funcional esencial para la estructuración, resiliencia y productividad de los bosques secundarios tropicales, y resaltan la importancia de considerar la variabilidad del suelo y la identidad de las especies como elementos centrales para comprender y manejar la regeneración ecológica en sistemas de humedal.

Referencias

- Ahmed, N., Li, J., Li, Y., Deng, L., Deng, L., Chachar, M., ... & Tu, P. (2025). Symbiotic synergy: How Arbuscular Mycorrhizal Fungi enhance nutrient uptake, stress tolerance, and soil health through molecular mechanisms and hormonal regulation. *IMA fungus*, 16, e144989.
- Almaguer, Y., Mujica-Pérez, Y., & Terry-Alfonso, E. (2023). Respuesta de la especie *Stevia rebaudiana* Bertoni a la inoculación con cepas de hongos micorrízicos arbusculares. *Cultivos Tropicales*, 44(4), 1-7.
- Bolou-Bi, E. B., N'Guetta, A. K., Gnimassoun, E. G. K., & Ettien, J. B. D. (2023). Plantain mycorrhization with native consortium of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) induce solubilisation of metals (Fe²⁺ and Al³⁺) in soil from Azaguié (south-east of Côte d'Ivoire). *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics (JARTS)*, 124(1), 47-56.
- Carrara, J. E., Beelman, R. B., Duiker, S. W., & Heller, W. P. (2024). Reduced tillage agriculture may improve plant nutritional quality through increased mycorrhizal colonization and uptake of the antioxidant ergothioneine. *Soil and Tillage Research*, 244, 106283.
- Carrillo, D. G., Hernández Ortega, H. A., Franco Ramírez, A., Vallejo Jiménez, B., Guzmán González, S., Manzo Sánchez, G., & Sánchez Rangel, J. C. (2021). Influencia de las propiedades edáficas en la abundancia de esporas y colonización de hongos micorrízicos arbusculares en banano en dos temporadas del año. *Scientia fungorum*, 51.
- Carrillo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S., & Cruz-Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta botánica mexicana*, (129).
- Ccahuana, S. L. G. (2025). El papel de los humedales en la conservación de la biodiversidad y en la regulación del ciclo hidrológico. *Scienceevolution*, 1(13), 18-28.
- da Silva, D. K. V., de Faria, R. A. P. G., Nascimento, E., & de Oliveira, A. P. (2024). Avaliação do reuso de cromo de resíduos químicos provenientes de análises de carbono orgânico total (COT) pelo método de Walkley-Black em solos de Rondônia, Brasil. *Revista Brasileira Multidisciplinar*, 27(1), 240-250.
- De Bedout, M., Solis-Ramos, L. Y., Valverde-Barrantes, O., & Rojas-Jiménez, K. (2022). Capacidad de nodulación en especies forestales leguminosas (Fabaceae) según su filogenia y características morfológicas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 19(45), 1-8.
- de Souza, A. P., Corrêa, G. R., Arruda, D. M., Fonseca, R. S., Candido, H. G., Rosa, G. P., ... & Xavier, M. V. B. (2024). Edaphic gradient shapes the structure and composition of vegetation in the forest-cerrado ecotone in north of minas gerais, Brazil. *Brazilian Journal of Botany*, 47(4), 1147-1161.
- del Rosario, M. H. M., Abel, L. B. J., Karen, S. F. M., Adriana, C. O., & Jabin, B. B. J. (2025). Arbuscular mycorrhizal fungi improve the growth, nutrient uptake and survival of micropropagated agave (*Agave marmorata* Roez) plantlets during acclimatization. *Journal of Arid Environments*, 228, 105330.

- Fernández, N., Knoblochová, T., Kohout, P., Janoušková, M., Cajthaml, T., Frouz, J., & Rydlová, J. (2022). Asymmetric interaction between two mycorrhizal fungal guilds and consequences for the establishment of their host plants. *Frontiers in Plant Science*, 13, 873204.
- Fiorilli, V., Martínez-Medina, A., Pozo, M. J., & Lanfranco, L. (2024). Plant immunity modulation in arbuscular mycorrhizal symbiosis and its impact on pathogens and pests. *Annual Review of Phytopathology*, 62(1), 127-156.
- Gannini, F., Balzarini, M., Koritschoner, J., Rampoldi, A., & Hang, S. (2021). Modelos para la conversión de las concentraciones de FE, MN, CU Y ZN entre los métodos MEHLICH-3 y DTPA-TEA en suelos de Córdoba. *Ciencia del suelo*, 39(2), 1-15.
- González, W. G., Arias, C. Á., & Mora, O. C. (2021). Muestreo de suelo y rizosfera para la identificación de hongos micorrízicos arbusculares asociados naturalmente a la especie caoba. *Ambientico*, (278), 30-35.
- Ipinza, R., Barros, S., De la Maza, C. L., Jofré, P., & González, J. (2021). Bosques y biodiversidad. *Ciencia & Investigación Forestal*, 101-132.
- Lin, G., Craig, M. E., Jo, I., Wang, X., Zeng, D. H., & Phillips, R. P. (2022). Mycorrhizal associations of tree species influence soil nitrogen dynamics via effects on soil acid–base chemistry. *Global Ecology and Biogeography*, 31(1), 168-182.
- Liu, R., & Chen, Y. (2024). Mycorrhizal symbiosis: evolution, opportunities, challenges, and prospects. *Arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable agriculture: inoculum production and application*, 1-35.
- Madejón, P., Navarro-Fernández, C. M., Madejón, E., López-García, Á., & Marañón, T. (2021). Plant response to mycorrhizal inoculation and amendments on a contaminated soil. *Science of the Total Environment*, 789, 147943.
- Maldonado, J. H., & Moreno-Sánchez, R. D. P. (2023). Servicios ecosistémicos y biodiversidad en América Latina y el Caribe.
- Medeiros, A. S., Goto, B. T., & Ganade, G. (2021). Ecological restoration methods influence the structure of arbuscular mycorrhizal fungal communities in degraded drylands. *Pedobiologia*, 84, 150690.
- Medina, L. R. (2022). Los hongos micorrízicos arbusculares y su rol en los agroecosistemas. *Cultivos Tropicales*, 43(1), e14-e14.
- Pauwels, R., Graefe, J., & Bitterlich, M. (2023). An arbuscular mycorrhizal fungus alters soil water retention and hydraulic conductivity in a soil texture specific way. *Mycorrhiza*, 33(3), 165-179.
- Phillips, J y Hayman, D. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vasicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158-161.

- Romero, E. M. J., Gutiérrez, R. S. C., Vera, A. N. M., Fonseca, C. L. S., & Enriquez, E. A. E. (2024). Estudio etnobotánico de plantas medicinales del Humedal Abras de Mantequilla y su área de influencia cantón Vinces. *Ciencia y Tecnología*, 17(2), 9-17.
- Sagadin, M. B., Salto, C. S., Cabello, M. N., & Luna, C. M. (2023). Respuesta micorrícica a la aplicación de inóculos de hongos micorrícicos arbusculares nativos en simbiosis con *Neltuma alba*. *Revista de Ciencias Forestales*, 31, 1-2.
- Shi, J., Wang, X., & Wang, E. (2023). Mycorrhizal symbiosis in plant growth and stress adaptation: from genes to ecosystems. *Annual Review of Plant Biology*, 74(1), 569-607.
- Silva, H. D. D., & Montoya, L. V. G. (2022). Hongos micorrizas arbusculares: la simbiosis de los múltiples beneficios. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, 12(2), 2-14.
- Ube, J. L. V., Benavides, O. O. P., Zambrano, J. P. U., & Ávila, F. A. S. (2024). Diversidad y función de las Micorrizas Arbusculares en un agroecosistema sostenible del humedal Abras de Mantequilla. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 6(4), 1-14.
- Watson, W., & Rivera, W. (2025). Comunicación en las asociaciones simbióticas: mecanismos entre hongos micorrícicos arbusculares, plantas y organismos edáficos. *Agronomía Mesoamericana*, 36(1).
- Wen, Z., Yang, M., Han, H., Fazal, A., Liao, Y., Ren, R., ... & Yang, Y. (2023). Mycorrhizae enhance soybean plant growth and aluminum stress tolerance by shaping the microbiome assembly in an acidic soil. *Microbiology spectrum*, 11(2), e03310-22.