

Influencia de los Hongos Micorrízicos Arbusculares en el Crecimiento Inicial de Tres Especies Forestales de Importancia Económica en Ecuador Influence of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Initial Growth of Three Economically Important Forest Species in Ecuador

Oscar Oswaldo Prieto-Benavides^{1†}, Edwin Miguel Jiménez-Romero²,
Rommel Santiago Crespo-Gutiérrez² y Ketty Vanessa Arellano-Ibarra³

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, ² Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Vía Quevedo-El Empalme km 7, Campus "La María". 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador; (O.O.P.B.), (E.M.J.R.), (R.S.C.G.).

³ Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias Pecuarias y Biológicas, Laboratorio de Biología y Microbiología. Avenida Quito, km 1.5 vía a Santo Domingo de los Tsáchilas. 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador; (K.V.A.I.).

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

RESUMEN

En los últimos 30 años, el uso excesivo de insumos químicos en la agricultura ha generado consecuencias ambientales negativas, como la contaminación y la pérdida de biodiversidad del suelo, lo que ha incrementado el interés en la fertilización ecológica como alternativa sostenible. Este estudio evalúa los efectos de la biofertilización con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en el crecimiento inicial de tres especies forestales de importancia económica en Ecuador: guayacán blanco (*Cybistax donnell-smithii* Rose), pachaco (*Schizolobium parahybum*) y laurel (*Cordia alliodora*). Se evaluaron variables como la colonización micorrízica, la densidad de esporas en el suelo y el crecimiento de las plantas en términos de altura, diámetro y biomasa. Los resultados mostraron que los tratamientos con HMA incrementaron significativamente la colonización micorrízica y la densidad de esporas en comparación con el control. El inóculo líquido obtuvo los mejores resultados, con un 5.84% de colonización en pachaco, 3.72% en laurel y 3.12% en guayacán blanco. Además, la densidad de esporas fue mayor en el tratamiento con inóculo líquido, registrando 163 esporas en pachaco, 128 en guayacán blanco y 112 en laurel. Las plantas tratadas con HMA también exhibieron mayor altura, diámetro y biomasa. Pachaco tratadas con inóculo líquido alcanzaron una altura promedio de 156.6 cm, un diámetro de 7.24 mm y una biomasa aérea fresca de 1411 g. Sin embargo, se identificaron limitaciones relacionadas con la variabilidad de respuesta entre especies y la necesidad de condiciones controladas para maximizar los beneficios. Este estudio resalta la originalidad y el valor de utilizar HMA como biofertilizantes, demostrando su potencial para mejorar la sostenibilidad y eficiencia en la producción forestal. En conclusión, la biofertilización con HMA puede ser una estrategia efectiva para promover el crecimiento y la adaptación de especies forestales en vivero, contribuyendo así a prácticas agrícolas más sostenibles y beneficiosas para el medio ambiente.

Palabras claves: árboles, biofertilización, biodiversidad, esporas, inoculante.

SUMMARY

In recent years, the excessive use of chemical inputs in agriculture has generated negative environmental consequences, such as soil contamination and biodiversity loss, which has increased interest in ecological fertilization as a sustainable alternative. This study evaluates the effects of biofertilization with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the initial growth of three economically important forest species in Ecuador: white guayacan (*Cybistax donnell-smithii* Rose), pachaco (*Schizolobium parahybum*),



Cita recomendada:

Prieto-Benavides, O. O., Jiménez-Romero, E. E., Crespo-Gutiérrez, R. S., & Arellano-Ibarra, K. V. (2025). Influencia de los Hongos Micorrízicos Arbusculares en el Crecimiento Inicial de Tres Especies Forestales de Importancia Económica en Ecuador. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-14. e1980. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.1980>

Recibido: 11 de junio de 2024.
Aceptado: 8 de octubre de 2024.
Artículo. Volumen 43.
Mayo de 2025.

Editor de Sección:
Dr. Fernando Abasolo Pacheco



Copyright: © 2025 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

and laurel (*Cordia alliodora*). Variables such as mycorrhizal colonization, spore density in the soil, and plant growth in terms of height, diameter, and biomass were evaluated. The results showed that AMF treatments significantly increased mycorrhizal colonization and spore density compared to the control. The liquid inoculum obtained the best results, with 5.84% colonization in pachaco, 3.72% in laurel, and 3.12% in white guayacan. Additionally, spore density was higher in the liquid inoculum treatment, recording 163 spores in pachaco, 128 in white guayacan, and 112 in laurel. Plants treated with AMF also exhibited greater height, diameter, and biomass. Pachaco treated with liquid inoculum reached an average height of 156.6 cm, a diameter of 7.24 mm, and a fresh aerial biomass of 1411 g. However, limitations were identified related to the variability of response among species and the need for controlled conditions to maximize benefits. This study highlights the originality and value of using AMF as biofertilizers, demonstrating their potential to improve sustainability and efficiency in forest production. In conclusion, biofertilization with AMF can be an effective strategy to promote the growth and adaptation of forest species in nurseries, thus contributing to more sustainable and environmentally beneficial agricultural practices.

Index words: trees, biofertilization, biodiversity, spores, inoculant.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha observado un preocupante aumento en el uso excesivo de insumos químicos en la agricultura, incluidos fertilizantes y pesticidas. Este fenómeno ha suscitado una profunda reflexión sobre las prácticas agrícolas tradicionales. Los insumos químicos han tenido consecuencias devastadoras, tales como la contaminación ambiental, la disminución de la biodiversidad microbiológica del suelo y la degradación de ecosistemas frágiles (Cruz-Cardenas *et al.*, 2021). Estas razones, respaldadas por investigaciones y evidencia científica, han generado un creciente interés en la implementación de la fertilización ecológica como una alternativa sostenible en la agricultura. En este contexto, López-Morales, Leos, Alfaro y Morales (2022) destacan que actualmente se utilizan prácticas como el uso de abonos verdes, humus, compost y microorganismos benéficos, incluyendo los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), con el objetivo de movilizar y reciclar nutrientes en el suelo y aprovechar la fertilidad natural de este recurso fundamental.

El énfasis en la fertilización ecológica no es casualidad; representa una estrategia fundamental para abordar los problemas ambientales y de sostenibilidad que enfrenta la agricultura moderna. Estudios como el realizado por Zydlik, Zydlik y Wieczorek (2021) respaldan esta afirmación al demostrar que los resultados obtenidos mediante la fertilización ecológica superan en calidad y sostenibilidad a los logrados con fertilizantes convencionales. La aplicación de biofertilizantes que contienen HMA ha emergido como una alternativa sumamente atractiva para mitigar las pérdidas en todas las etapas del cultivo (Kuila y Ghosh, 2022). Este enfoque ha mostrado un impacto beneficioso en una amplia variedad de cultivos, con resultados notables que incluyen un aumento significativo en la supervivencia de las plantas en la fase de vivero (Ruiz-Sánchez *et al.*, 2021).

Además, el uso de biofertilizantes a base de HMA ha demostrado reducir el tiempo necesario en la fase de vivero, gracias a tasas de crecimiento más aceleradas y una mayor acumulación de biomasa (Sharma, Thokchom, Gupta y Kapoor, 2023). Esto no solo implica un ahorro económico, sino que también contribuye a una producción más eficiente y sostenible en el sector forestal (Berruti, Lumini, Balestrini y Bianciotto, 2015). Un aspecto crucial es la mejora en la adaptación de las plantas a condiciones adversas, como el estrés hídrico y nutricional, cuando se utilizan biofertilizantes con HMA. Esta mejor adaptación se traduce en un mayor éxito en la fase de plantación en el campo, lo que, a su vez, reduce las pérdidas y aumenta la productividad global del cultivo.

Por otro lado, Tapia *et al.* (2021) destacan que las especies forestales guayacán blanco (*Cybistax donnell-smithii* Rose), pachaco (*Schizolobium parahybum*) y laurel (*Cordia alliodora*) poseen una importancia multifacética que abarca desde la conservación ambiental hasta el bienestar humano, siendo de gran valor para el aprovechamiento forestal como madera. En términos de biodiversidad, estas especies desempeñan un papel fundamental al proporcionar hábitats esenciales para una amplia gama de flora y fauna. Sus densos sistemas de raíces contribuyen a prevenir la erosión del suelo, conservando así su calidad y manteniendo la retención de agua en los ecosistemas circundantes (Verhulst *et al.*, 2010).

Desde una perspectiva económica, estas especies son valiosas para la industria de la madera y productos forestales, generando ingresos y empleo en comunidades locales. Además, desempeñan un papel crucial en la restauración ecológica de áreas degradadas o deforestadas. Su plantación y manejo adecuados pueden contribuir significativamente a la recuperación de ecosistemas dañados y la revitalización de paisajes degradados. Por estas razones, estas especies son objeto de investigación científica para comprender mejor su ecología, genética y comportamiento, contribuyendo al avance del conocimiento sobre los ecosistemas forestales y su manejo sostenible. Por tal motivo, esta investigación se enfocó en evaluar los efectos de la biofertilización con hongos formadores de micorriza arbuscular y su incidencia en el crecimiento inicial de tres especies forestales en vivero.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en los laboratorios de Microbiología y Biología Molecular, situados en el Campus "La María" de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo ubicado en el kilómetro 7.5 de la vía Quevedo - El Empalme, en el cantón Mocache provincia de Los Ríos con sus coordenadas geográficas 1° 20' 30" S y 79° 28' 30" O, ubicada a 75 m de altitud.

Tinción de Raíces

Para determinar el porcentaje de colonización micorrízica en las raíces, se empleó un método modificado basado en el enfoque de Aguilar-Ulloa, Arce, Galiano y Torres (2016). Las raíces fueron lavadas minuciosamente con agua corriente para eliminar residuos superficiales, luego se sumergieron en una solución de hidróxido de potasio (KOH) al 10% a temperatura ambiente durante 24 horas. Posteriormente, se eliminó el KOH mediante otro lavado, utilizando un tamiz para evitar la pérdida de material. Las raíces oscuras se blanquearon adicionalmente con KOH al 10% durante una hora a 90 °C. Seguidamente, se tiñeron con una solución de azul de tripano al 0.05% durante 30 minutos a temperatura ambiente, se enjuagaron y se conservaron en glicerol.

Para el análisis microscópico, se montaron en láminas portaobjetos cinco segmentos de raíces con glicerol al 50%, y se observaron con un microscopio a aumentos de 10× y 40×. La frecuencia de colonización se determinó calculando el porcentaje de segmentos colonizados entre el total de segmentos evaluados. Se evaluó la densidad de estructuras micorrízicas como arbusculos, vesículas, micelios, hifas y esporas.

Aislamiento de Esporas de HMA

Se empleó el método de aislamiento y conteo de esporas basado en el procedimiento descrito por Brundrett, Bougher, Dell, Grove y Malajczuk. (1996), con algunas modificaciones. Este método implica el tamizado, la decantación en húmedo y la centrifugación. Se tomó una muestra de 50 gramos de suelo, se homogenizó en un mortero y se transfirió a un vaso de precipitación con 500 mL de agua destilada, agitándola durante 4 a 5 minutos según el tipo de suelo. La suspensión se dejó reposar 2 minutos y luego se pasó a través de tamices con aberturas de 840, 420 y 75 µm, repitiendo este proceso tres veces. El material atrapado en el tamiz de 75 µm se recolectó en vasos de 100 ml con agua destilada. Se prepararon tres tubos de centrifugación de 10 mL, a los cuales se añadieron 3 mL de solución de sacarosa al 20% y luego 3 mL de solución de sacarosa al 60%, vertiéndola en el fondo para crear un gradiente de sacarosa. Se añadieron 4 mL de la solución con suelo de los tamices, asegurando que quedara por debajo del suelo suspendido en agua. Los tubos se sellaron con Parafilm, se equilibraron y centrifugaron durante 5 minutos a 3400 rpm. Tras la centrifugación, se retiraron cuidadosamente los tubos para no alterar la interfaz agua-sacarosa, se vertió el contenido en un tamiz de 75 µm y se lavó con agua destilada para eliminar la sacarosa. El material del tamiz se transfirió a cajas Petri cuadrículadas, manteniendo aproximadamente 1 cm de distancia entre líneas para facilitar el conteo de las esporas.

Colonización Micorrízica

La evaluación de esta variable se llevó a cabo 60 días después de la inoculación, utilizando el método de clarificación y tinción de raíces, basado en una versión modificada del método de Phillips y Hayman (1970). Para calcular la colonización de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), se siguió una escala de puntuación que variaba de 0 a 5, según lo propuesto por Ochoa-Meza, Esqueda, Fernández y Herrera (2009). El procedimiento consistió en cortar 10 pequeñas raíces de aproximadamente 1 cm de longitud, las cuales previamente habían sido descoloridas y teñidas. Estas raíces se dispusieron de manera ordenada en un portaobjetos. Posteriormente, se procedió a la observación bajo un microscopio estereoscópico, siguiendo un recorrido sistemático. La determinación de la frecuencia e intensidad de la micorrización se realizó asignando el valor correspondiente a la clase identificada en la escala de puntuación, de acuerdo con lo especificado en la Cuadro 1.

Cuadro 1. Escala para la evaluación de densidad de colonización micorrízica (visual) en raíces.
Table 1. Scale for the evaluation of mycorrhizal colonization density (visual) in roots.

Categorías micorrización	0	1	2	3	4	5
Densidad visual (%)	0	1.0	2.5	15.5	35.5	47.5
Categorías pelos radicales	0	1	2	3	4	5
Cantidad	Ausentes	Muy pocos	Pocos	Pocos	Muchos	Muchos

Altura y Diámetro de las Plantas

La altura de las plantas se midió desde la base de cada planta (cuello) hasta el punto más alto visible, utilizando una cinta métrica. Los valores se expresaron en centímetros (cm), mientras que el diámetro se midió con un calibrador de vernier y los valores se expresaron en (mm).

Producción de Materia Húmeda y Seca Foliar

Se determinó el peso fresco de las plantas después de 60 días desde la inoculación de los tratamientos, para lo cual se pesó las plantas en una balanza marca Ohaus. Posteriormente se sometieron a un proceso de secado en una estufa a 65 °C durante 48 horas. Los porcentajes se calcularon en relación con el peso fresco inicial y final.

Producción de Materia Húmeda y Seca Radicular

Se determinó el peso fresco de las raíces después de 60 días desde la inoculación de los tratamientos, para lo cual se pesó las plantas en una balanza marca Ohaus. Posteriormente se sometieron a un proceso de secado en una estufa a 65 °C durante 48 horas. Los porcentajes se calcularon en relación con el peso fresco inicial y final.

Para los conjuntos de datos que presentaron una distribución normal, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), mientras que, para aquellos con una distribución no paramétrica, se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Porcentaje de Densidad Visual de Colonización de HMA en Tres Especies Forestales

En cuanto a los porcentajes de colonización micorrízica en las raíces de tres especies forestales: guayacán blanco, pachaco y laurel. Los resultados revelan que el tratamiento con inóculo líquido alcanzó el mayor nivel de colonización en pachaco, con un valor promedio del 5.84%. En el caso de laurel, se registró un 3.72%, mientras que guayacán blanco exhibió la tasa de colonización más baja, con un valor de 3.12% en este tratamiento (Figura 1). Lo que sugiere que incluso para especies con menor afinidad micorrízica, los inóculos líquidos pueden proporcionar beneficios tangibles en términos de colonización y simbiosis (Bodenhausen *et al.*, 2021). Además, Senthilkumar, Amaresan y Sankaranarayanan (2021), mencionan que los inóculos líquidos permiten una mejor distribución de las esporas micorrízicas, lo que resulta en una mayor tasa de colonización y, por ende, en un mejor aprovechamiento de nutrientes y agua.

En contraste, el tratamiento con inóculo sólido mostró diferentes resultados. Pachaco mantuvo un nivel destacado de colonización, con un porcentaje del 2.99%, seguido por laurel con un valor de 2.05%. Guayacán blanco continuó exhibiendo la colonización más baja de todas las especies, con un valor de 1.24%. Estos resultados indican que, aunque los inóculos sólidos son efectivos, su capacidad de promover la colonización micorrízica es inferior a la de los inóculos líquidos (Chen, Arato, Borghi, Nouri y Reinhardt, 2018).

Densidad de Esporas de HMA en Tres Especies Forestales

Tras un período de 60 días, se evaluó la densidad de esporas en 50 gramos de suelo húmedo por planta. Los resultados revelaron patrones interesantes en cuanto a la colonización micorrízica en estas especies (Figura 2). En cuanto a la especie guayacán blanco, el inóculo líquido demostró ser el más efectivo en términos de densidad de esporas, con un total de 128 esporas por planta, mientras que el inóculo sólido presentó una cantidad ligeramente menor, con 126 esporas por planta. Estos resultados son consistentes con estudios previos que indican que los inóculos líquidos pueden mejorar la distribución y la eficacia de las esporas micorrízicas en el suelo, facilitando una colonización más eficiente (Senthilkumar *et al.*, 2021).

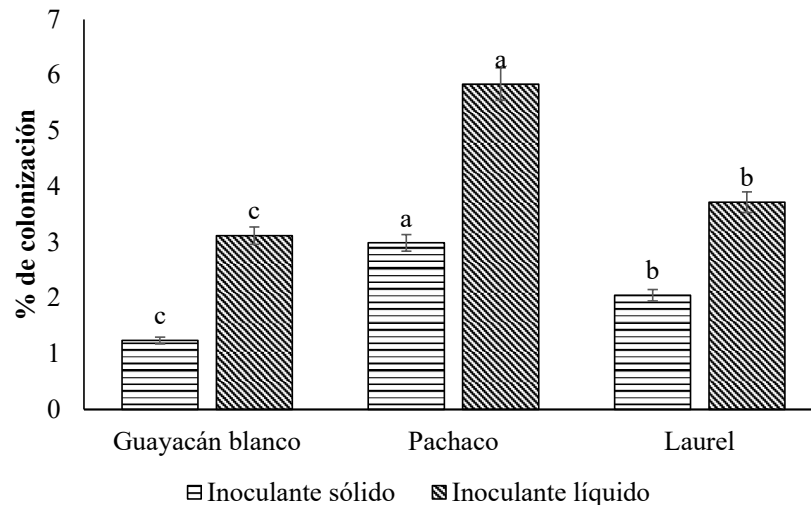


Figura 1. Porcentaje de colonización de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en tres especies forestales. Las barras indican el DE individual para tratamiento ($\pm$). Medias con letras iguales en la columna no difieren significativamente según Tukey ($P \leq 0.05$).

Figure 1. Percentage of colonization of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in three forest species. Bars indicate individual SD for treatment ($\pm$). Means with equal letters in the column do not differ significantly according to Tukey ($P \leq 0.05$).

Para la especie forestal pachaco, se observó que el tratamiento con mayor número de esporas fue el inóculo líquido, con un total de 163 esporas por planta, seguido por el inóculo sólido, que registró 135 esporas por planta. Esto coincide con la investigación de Xu *et al.* (2024), que mostró que los inóculos líquidos pueden aumentar significativamente la colonización micorrízica y la densidad de esporas, lo que favorece una mejor absorción de nutrientes y agua por las plantas.

Por último, en las plántulas de laurel, los tratamientos arrojaron resultados distintos, registrando el inóculo líquido 112 esporas y el inóculo sólido 97 esporas por planta. Este hallazgo refuerza la idea de que los inóculos líquidos ofrecen una mayor eficacia en la colonización micorrízica en diversas especies, lo cual es crucial para la salud y el crecimiento óptimo de las plantas (Zhu, Nong, Fang, Qin y Zhang, 2024).

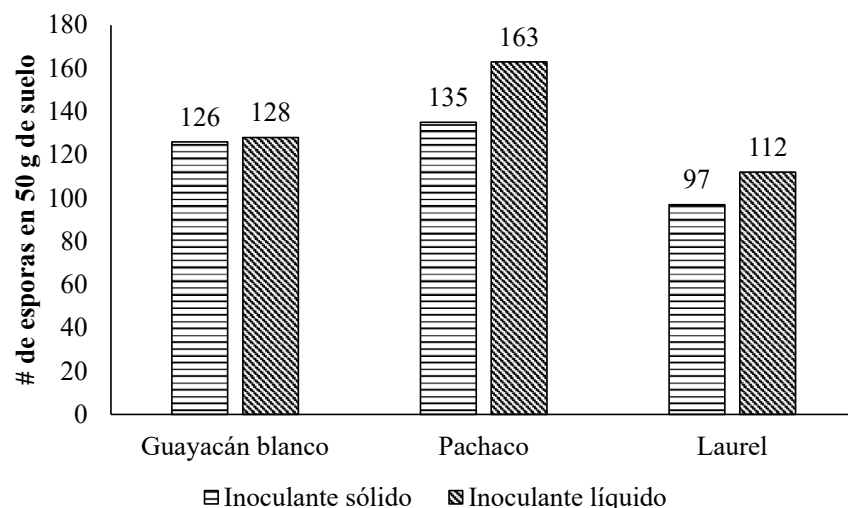


Figura 2. Numero de esporas de hongos micorrízicos arbusculares HMA en tres especies forestales.

Figure 2. Number of spores of AMF arbuscular mycorrhizal fungi in three forest species.

Altura de Plantas

En el contexto de nuestro estudio, una de las variables dasométricas evaluadas en las plantas de las tres especies forestales fue la altura (Figura 3). Para la especie guayacán blanco, se observó que los tratamientos más efectivos en términos de altura fueron aquellos que se utilizó el inóculo líquido, alcanzando valores promedio de 15.40 cm, seguidos por los tratamientos con inóculo sólido, que alcanzaron una altura promedio de 12.1 cm. El testigo, en cambio, mostró la menor altura promedio, con 9.20 cm. Estos hallazgos coinciden con estudios previos que demuestran la capacidad de los inóculos líquidos de HMA para mejorar la absorción de nutrientes y agua, lo que se traduce en un mayor crecimiento vegetal (Luo, Ma y Xue, 2020).

En el caso de la especie pachaco, los tratamientos que contenían inóculos de HMA mostraron un desempeño superior en términos de altura en comparación con el grupo de control, que registró la altura más baja, con un promedio de 12.18 cm. Esto sugiere que los HMA son efectivos en mejorar el crecimiento en altura, alineándose con los resultados de otros estudios que han encontrado mejoras significativas en la altura de las plantas debido a la simbiosis con HMA (Begum *et al.*, 2019).

Por último, en la especie laurel, la tendencia general se mantuvo, con los tratamientos de inóculo líquido y sólido superando al grupo de control en términos de altura. Específicamente, el inóculo líquido mostró la mayor altura promedio, con 15.66 cm, seguido por el inóculo sólido, con 13.98 cm. Mientras que, el grupo de control tuvo la menor altura promedio, con 10.9 cm. Este patrón sugiere que los inóculos de HMA, especialmente en forma líquida, son efectivos en promover el crecimiento en altura en diferentes especies de plantas forestales (Formenti y Rasmann, 2019).

Diámetro de Plantas

En relación con la variable de diámetro de las plantas en las tres especies forestales evaluadas (Figura 4), se observaron diferencias significativas en el crecimiento de guayacán blanco entre los tratamientos que contenían hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Específicamente, el tratamiento con inóculo líquido mostró un incremento notable en el diámetro del tallo, alcanzando un promedio de 5.7 mm. Este valor es considerablemente mayor en comparación con el tratamiento con inóculo sólido, que presentó un diámetro promedio de 4.2 mm, y el grupo de control, que tuvo un diámetro promedio de 2.9 mm. Estos resultados sugieren que el inóculo líquido de HMA podría ser más eficaz en la promoción del crecimiento de guayacán blanco. La superioridad del inóculo líquido puede estar asociada con su capacidad para distribuirse de manera más uniforme en el suelo, lo que facilita un mejor establecimiento de la simbiosis micorrízica (Crespo-Flores, Ramírez, Vallejo, Méndez y González, 2022). Esta característica podría optimizar la absorción de nutrientes y el intercambio de señales entre las plantas y los hongos, favoreciendo el crecimiento vegetal.

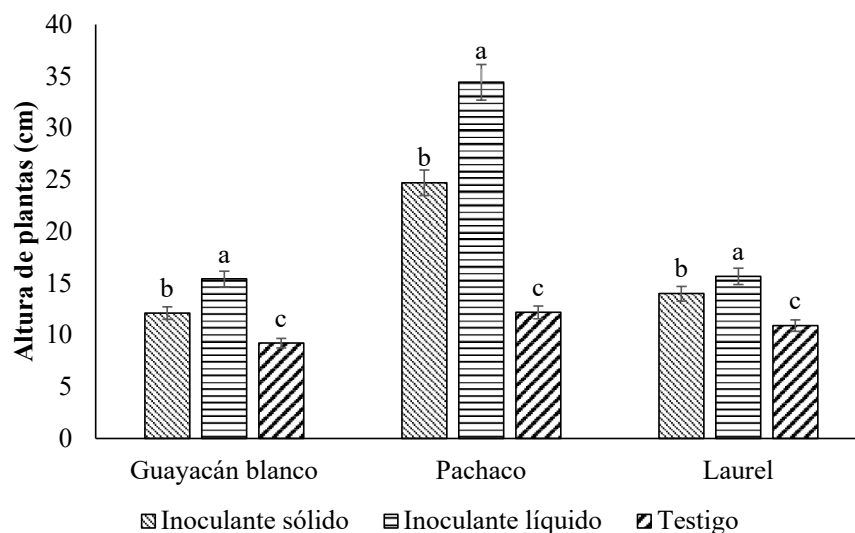


Figura 3. Altura de plantas colonizadas con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en tres especies forestales. Las barras de error indican $\pm$ DE; diferentes letras indican diferencias significativas entre los promedios a $P < 0.05$ (Test de Tukey).

Figure 3. Height of plants colonized with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in three forest species. Error bars indicate $\pm$ SD; different letters indicate significant differences between means at $P < 0.05$ (Tukey test).

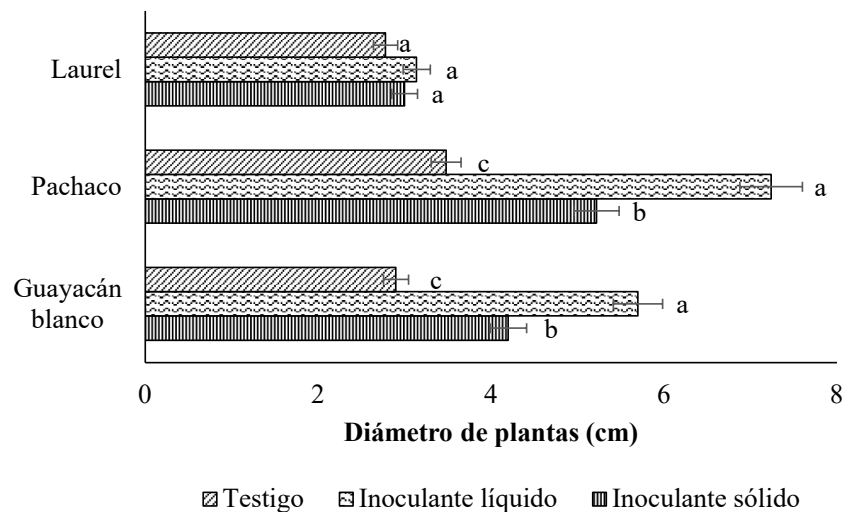


Figura 4. Diámetro de plantas colonizadas con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en tres especies forestales. Las barras de error indican $\pm$ DE; diferentes letras indican diferencias significativas entre los promedios a $P < 0.05$ (Test de Tukey).

Figure 4. Diameter of plants colonized with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in three forest species. Error bars indicate $\pm$ SD; different letters indicate significant differences between means at $P < 0.05$ (Tukey test).

En este sentido, Pan *et al.* (2020) encontraron que el uso de inóculos líquidos mejora la dispersión de los hongos micorrízicos en el suelo, resultando en un aumento significativo del crecimiento vegetal. Además, la mejora en la simbiosis micorrízica podría estar relacionada con una mayor disponibilidad de agua y nutrientes esenciales, como fósforo y nitrógeno, que son cruciales en las primeras etapas del desarrollo de las plantas. Este hallazgo resalta la importancia de la forma de aplicación de los HMA y su impacto en la eficiencia de la inoculación, sugiriendo que el inóculo líquido podría ser una estrategia más efectiva en programas de reforestación y restauración ecológica, especialmente en suelos con limitaciones físicas o químicas.

Para la especie pachaco, los tratamientos con HMA mostraron los mejores resultados en la variable de diámetro siendo el inóculo líquido, con un promedio de 7.24 mm, y el inóculo sólido, con 5.22 mm, en comparación con el grupo de control, que tuvo el valor más bajo de 2.48 mm. Esto concuerda con la investigación de Miceli, Vetrano, Torta, Esposito y Moncada (2023), que demostró que los inóculos de HMA pueden mejorar significativamente el crecimiento de las plantas al aumentar la absorción de nutrientes y agua.

En contraste, en la especie laurel, no se encontraron diferencias significativas en la variable de diámetro entre los tratamientos. Esto podría deberse a la variabilidad en la respuesta de las especies a los HMA, como se observó en estudios previos donde la respuesta a la inoculación micorrízica depende del contexto ambiental y de las características específicas de cada especie (Wang, Wang, Guo, Qu y Biere, 2023).

Peso Fresco Aéreo

En lo que respecta al peso fresco aéreo, se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las especies evaluadas, lo que evidencia el impacto notable de los tratamientos de inoculación con micorriza arbuscular (Figura 5). En particular, para la especie guayacán blanco, el tratamiento con inóculo líquido mostró un incremento sustancial en el peso fresco aéreo, alcanzando un promedio de 5.7 gramos, en comparación con el inóculo sólido, que registró 1.95 g, y el grupo de control, con 1.0 g. Estos resultados sugieren una efectividad superior del inóculo líquido para promover el crecimiento de la parte aérea de las plantas, probablemente debido a una mejor absorción de agua y nutrientes facilitada por una distribución más uniforme de las micorizas en el suelo. Investigaciones anteriores, como las de Silva-Laya, Silva, Pérez y Álvarez. (2021), corroboran estos hallazgos al demostrar que la inoculación con micorizas líquidas incrementa la eficiencia en la absorción de nutrientes y la disponibilidad de agua, resultando en un mayor peso fresco aéreo. Este efecto positivo de las micorizas arbusculares en el crecimiento vegetal subraya la importancia de seleccionar el tipo de inóculo adecuado para maximizar los beneficios de la simbiosis micorrízica en distintos contextos agrícolas y ecológicos (Crespo-Flores *et al.*, 2022).

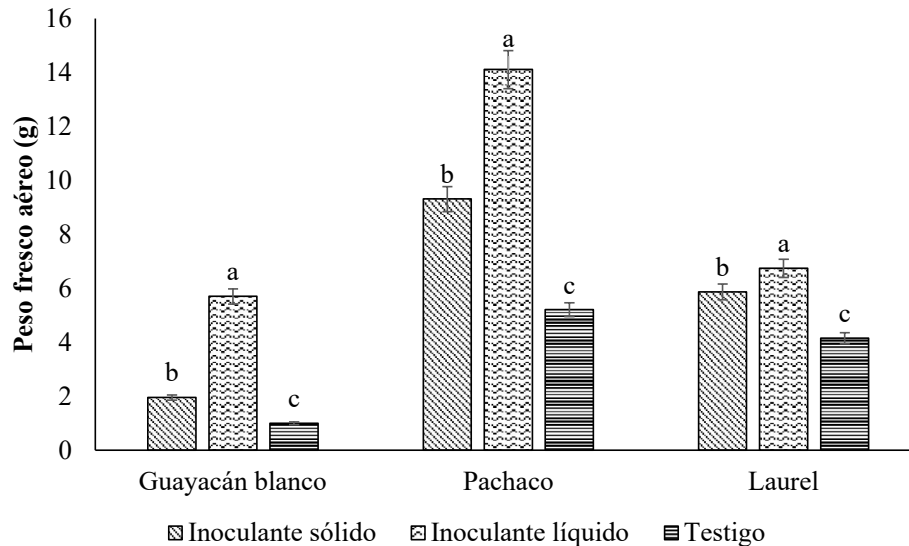


Figura 5. Peso fresco aéreo de plantas colonizadas con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en tres especies forestales. Las barras de error indican $\pm$ DE; diferentes letras indican diferencias significativas entre los promedios a $P < 0.05$ (Test de Tukey).

Figure 5. Fresh aerial weight of plants colonized with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in three forest species. Error bars indicate $\pm$ SD; different letters indicate significant differences between means at $P < 0.05$ (Tukey test).

En la especie pachaco, el tratamiento con inóculo líquido presentó el mayor peso fresco aéreo, alcanzando un promedio de 14.11 g, mientras que el tratamiento con inóculo sólido obtuvo 9.31 g. Ambos tratamientos demostraron ser significativamente más efectivos que el grupo de control, que registró el valor más bajo con 5.21 g. Estos resultados indican que tanto los inóculos líquidos como los sólidos son beneficiosos para esta especie, aunque el inóculo líquido ofrece una ventaja adicional. La investigación de Koskey, Avio, Turrini, Sbrana y Bàrberi (2023) respalda estos hallazgos, sugiriendo que los inóculos líquidos pueden facilitar una distribución más homogénea de los hongos micorrízicos en el suelo, lo que mejora la interacción entre la planta y la micorriza, favoreciendo así un mayor crecimiento de la parte aérea.

Por último, en la especie laurel, los tratamientos con inóculo líquido y sólido resultaron en valores más altos de peso fresco aéreo, alcanzando 6.74 g y 5.87 g respectivamente, sin diferencias estadísticas significativas entre ellos. Estos valores contrastan significativamente con el grupo de control, que mostró el valor más bajo de 4.15 g. Esto sugiere que, para el laurel, tanto los inóculos líquidos como los sólidos son igualmente efectivos en la promoción del crecimiento aéreo. La ausencia de diferencias significativas entre los tratamientos de inóculo puede indicar que ambos métodos de aplicación son igualmente eficaces en facilitar la simbiosis micorrízica, lo cual es consistente con los resultados de Fernández y Martínez (2022). Estos autores encontraron que la inoculación con micorrizas, independientemente del estado físico del inóculo, mejora notablemente el crecimiento aéreo de las plantas. Este efecto se atribuye a una mejor absorción de nutrientes y agua, factores críticos para el desarrollo de la biomasa aérea.

Es importante destacar que la elección del tipo de inóculo puede depender de factores prácticos, como la disponibilidad de recursos y las condiciones del suelo (Medina, 2022). La similitud en la efectividad de ambos tipos de inóculo en el laurel sugiere que se pueden considerar factores adicionales, como la facilidad de aplicación y el costo, al seleccionar el método de inoculación más adecuado. Además, estos hallazgos subrayan la importancia de considerar la especie vegetal específica al evaluar la efectividad de los tratamientos micorrízicos, ya que diferentes especies pueden responder de manera distinta a los mismos tratamientos.

Peso Seco Aéreo

La variable de peso seco aéreo mostró diferencias significativas entre las tres especies evaluadas (Figura 6). En particular, para el guayacán blanco, el tratamiento con inóculo líquido resultó en el mayor peso seco aéreo, con un promedio de 1.74 g, superando notablemente al inóculo sólido, que registró 0.82 g, y al grupo de control, con 0.35 g. Estos resultados destacan la superioridad de los inóculos líquidos en la promoción del crecimiento

aéreo, posiblemente debido a su capacidad para mejorar la absorción de nutrientes esenciales. Estudios previos, como los realizados por Zydlik *et al.* (2021), han demostrado que los inóculos líquidos facilitan una dispersión más uniforme de los microorganismos beneficiosos en el suelo, lo que incrementa la eficiencia en la absorción de nutrientes y, en consecuencia, potencia el crecimiento vegetativo. Esta evidencia sugiere que el uso de inóculos líquidos puede ser una estrategia efectiva para maximizar el rendimiento de las especies forestales, especialmente en condiciones de suelo que limitan la disponibilidad de nutrientes. Además, el análisis de estas diferencias en el peso seco aéreo subraya la importancia de considerar el tipo de inóculo en función de las características específicas del suelo y de las especies vegetales, lo cual es crucial para el desarrollo de prácticas agrícolas sostenibles y programas de reforestación efectivos.

Para la especie pachaco, el tratamiento de inóculo líquido también demostró ser el más efectivo en esta variable, con un peso seco aéreo promedio de 4.19 g, seguido por el inóculo sólido, con 2.88 g. Ambos tratamientos mostraron diferencias significativas entre sí y difieren notablemente del grupo de control, que obtuvo el valor más bajo de 0.48 g. Esto sugiere que los inóculos líquidos pueden ofrecer ventajas adicionales en la promoción del crecimiento aéreo en comparación con los sólidos. La investigación de Koskey *et al.* (2023) respalda esta observación, indicando que los inóculos líquidos pueden mejorar la disponibilidad de nutrientes y optimizar las condiciones del suelo para un crecimiento más vigoroso de las partes aéreas de las plantas. La mejor dispersión de los microorganismos beneficiosos y la mayor eficiencia en la absorción de nutrientes esenciales, como fósforo y nitrógeno, proporcionada por los inóculos líquidos, contribuyen a un desarrollo más robusto de la biomasa aérea. Estos hallazgos subrayan la importancia de seleccionar adecuadamente el tipo de inóculo en función de las características del suelo y los requerimientos específicos de cada especie vegetal, con el objetivo de maximizar el rendimiento y la salud de las plantas en distintos contextos agroforestales. Además, de acuerdo con Alori, Dare y Babalola (2017) el uso de inóculos líquidos puede ser especialmente beneficioso en suelos con problemas de compactación o baja fertilidad, donde la mejor distribución de los hongos micorrízicos puede compensar estas limitaciones y promover un crecimiento más uniforme y sostenido.

En cuanto a la especie laurel, los mejores resultados en el peso seco aéreo se obtuvieron con el tratamiento de inóculo líquido, que promedió 4.90 g, seguido por el inóculo sólido, con 2.88 g. Ambos tratamientos fueron estadísticamente diferentes y también difirieron significativamente del grupo testigo, que registró el valor más bajo de 1.3 g respectivamente. Estos hallazgos son consistentes con los estudios de Fernández y Martínez (2022), quienes encontraron que los inóculos líquidos pueden mejorar significativamente el crecimiento aéreo de las plantas debido a una mejor disponibilidad de nutrientes y una mayor actividad microbiana en la rizosfera.

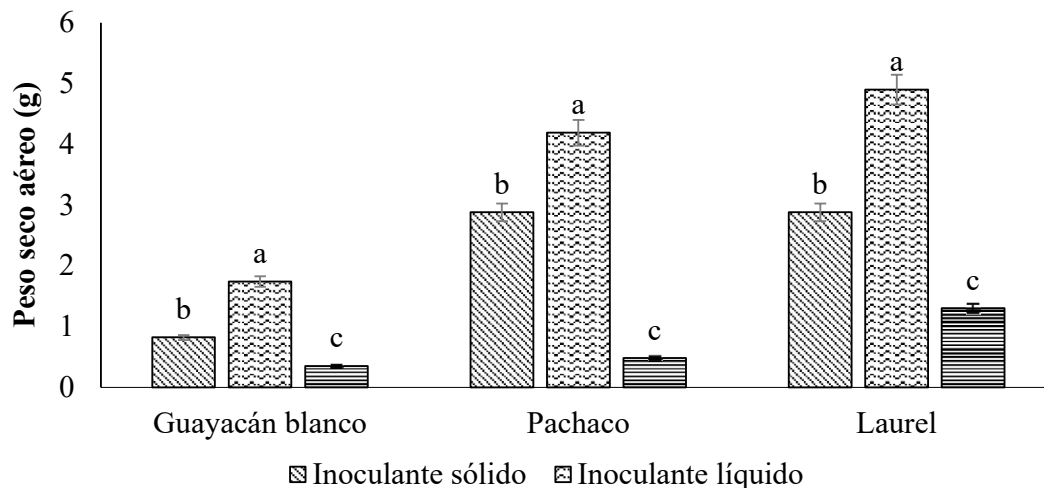


Figura 6. Peso seco aéreo de plantas colonizadas con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en tres especies forestales. Las barras de error indican $\pm$ DE; diferentes letras indican diferencias significativas entre los promedios a $P < 0.05$ (Test de Tukey).

Figure 6. Aboveground dry weight of plants colonized with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in three forest species. Error bars indicate $\pm$ SD; different letters indicate significant differences between means at $P < 0.05$ (Tukey test).

Peso Fresco Radicular

La variable de peso fresco radicular exhibió diferencias estadísticamente significativas en las tres especies objeto de estudio (Figura 7). En el caso de guayacán blanco, el tratamiento de inóculo líquido se destacó al registrar el peso fresco radicular más alto, con un valor de 1.89 g, claramente diferenciándose de los tratamientos de inóculo sólido (1.14 g) y el testigo (0.84 g), los cuales presentaron valores significativamente más bajos. Este hallazgo coincide con estudios anteriores, donde se ha demostrado que los inóculos líquidos pueden mejorar significativamente la absorción de agua y nutrientes, favoreciendo un mayor crecimiento radicular fresco. Por ejemplo, en el estudio de Silva-Laya *et al.* (2021), se reportó que los inóculos líquidos aumentan la capacidad de retención de humedad en el sustrato, lo que contribuye a un mayor peso fresco de las raíces. En este sentido, Saberi Riseh, Ebrahimi, Gholizadeh y Skorik (2021) mencionan que esta capacidad de los inóculos líquidos para mejorar la retención de humedad es especialmente beneficiosa en condiciones de estrés hídrico, donde la disponibilidad de agua es limitada. Además, la mayor eficiencia en la absorción de nutrientes, como fósforo y nitrógeno, por parte de las plantas inoculadas con inóculos líquidos, no solo promueve un desarrollo radicular más vigoroso, sino que también fortalece la estructura y funcionalidad de la planta en general. Estos resultados destacan la importancia de considerar el estado físico del inóculo como un factor crítico en la gestión de la fertilización micorrízica y su aplicación en diversos sistemas de cultivo, para optimizar el crecimiento y la productividad de las plantas.

En el caso de pachaco, los tratamientos de inóculo sólido y líquido obtuvieron valores similares y significativamente superiores al testigo en términos de peso fresco radicular. Específicamente, el tratamiento de inóculo sólido registró un valor de 4.08 g, mientras que el tratamiento de inóculo líquido alcanzó 3.94 g, en contraste con el testigo, que obtuvo 1.14 g, el valor más bajo. Estos resultados sugieren que tanto los inóculos líquidos como los sólidos son efectivos en promover el crecimiento radicular fresco en esta especie. La investigación de Ghorui, Chowdhury, Das, Sunar y Prakash (2023) respalda estos hallazgos, demostrando que ambos tipos de inóculos pueden mejorar la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes, factores cruciales para el desarrollo radicular. La efectividad de ambos tipos de inóculos en la mejora de la estructura del suelo puede atribuirse a la capacidad de los hongos micorrízicos para modificar las propiedades físicas del suelo, como la agregación y porosidad, lo que facilita una mejor retención de agua y un acceso más eficiente a los nutrientes. Además, Yang, Imran y Ortas (2023) mencionan que la simbiosis micorrízica, independiente del tipo de inóculo utilizado, contribuye a la movilización y absorción de nutrientes esenciales, mejorando así el crecimiento y la salud general de las raíces. Estos hallazgos subrayan la importancia de utilizar inóculos micorrízicos como una herramienta clave en la gestión de suelos y en la promoción de prácticas agrícolas sostenibles, al optimizar el uso de recursos naturales y mejorar la resiliencia de las plantas frente a condiciones adversas.

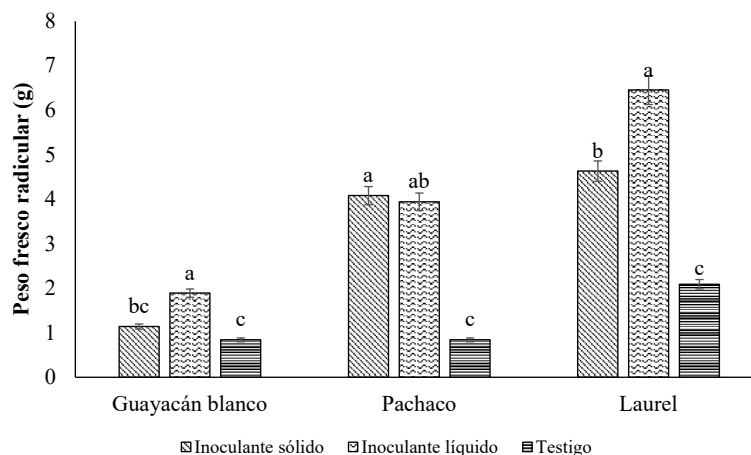


Figura 7. Peso fresco radicular de plantas colonizadas con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en tres especies forestales. Las barras de error indican $\pm$ DE; diferentes letras indican diferencias significativas entre los promedios a $P < 0.05$ (Test de Tukey).

Figure 7. Fresh root weight of plants colonized with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in three forest species. Error bars indicate $\pm$ SD; different letters indicate significant differences between means at $P < 0.05$ (Tukey test).

Para la especie forestal laurel, el tratamiento de inóculo líquido lideró en términos de peso fresco radicular, con 6.45 g, seguido del inóculo sólido, con 4.63 g, mientras que el testigo registró el valor más bajo, con 2.09 g. Este resultado destaca la efectividad superior del inóculo líquido en esta especie particular. Según el estudio de Fernández y Martínez (2022), los inóculos líquidos facilitan una mejor dispersión de los microorganismos beneficiosos en el suelo, mejorando así la absorción de nutrientes y el crecimiento radicular fresco.

Peso Seco Radicular

En relación con la variable dasométrica, se identificaron diferencias significativas en las tres especies evaluadas (Figura 8). En el caso de guayacán blanco, el tratamiento que presentó el valor más alto fue el inóculo líquido, con 0.98 g, marcando una clara diferencia con el inóculo sólido, que registró 0.62 g, y el testigo, con 0.24 g respectivamente. Estos resultados son consistentes con estudios previos que han señalado la efectividad de los inóculos líquidos en mejorar la absorción de nutrientes y el crecimiento radicular. Por ejemplo, Nakatani *et al.* (2024) encontraron que los inóculos líquidos mejoran significativamente la disponibilidad de nutrientes y promueven un crecimiento radicular más robusto en diversas especies arbóreas. La aplicación de inóculos líquidos facilita una distribución más uniforme de los hongos micorrízicos en el suelo, lo que no solo mejora la absorción de nutrientes como el fósforo, sino que también aumenta la capacidad de la planta para acceder a micronutrientes esenciales (Sun y Shahrajabian, 2023). Además, los inóculos líquidos pueden ayudar a mantener una mayor humedad en el sustrato, lo que es particularmente beneficioso en ambientes con limitaciones hídricas. Esta mejora en la absorción de nutrientes y agua se traduce en un sistema radicular más desarrollado, que es fundamental para el anclaje y la estabilidad de las plantas, así como para su capacidad de resistir condiciones de estrés. Jiménez-Martínez, Montaña, Montaña-Arias y Chimal-Sánchez (2025) evaluaron la efectividad de tres inóculos de hongos micorrízicos arbusculares de HMA procedentes de tres condiciones de uso del suelo, islas de vegetación y áreas abiertas del sistema agroforestal “milpa-chichipera” y matorral xerófilo sobre el crecimiento y la nutrición de la lechuga (*Lactuca sativa* L.), cuyo resultado mostró que, los tres inóculos de HMA favorecieron el crecimiento y nutrición de la lechuga comparado con el control, pues aumentaron el contenido de clorofila y de P y N y concluyen que, los tres inóculos podrían ser potenciales biofertilizantes micorrízicos en un ecosistema semiárido.

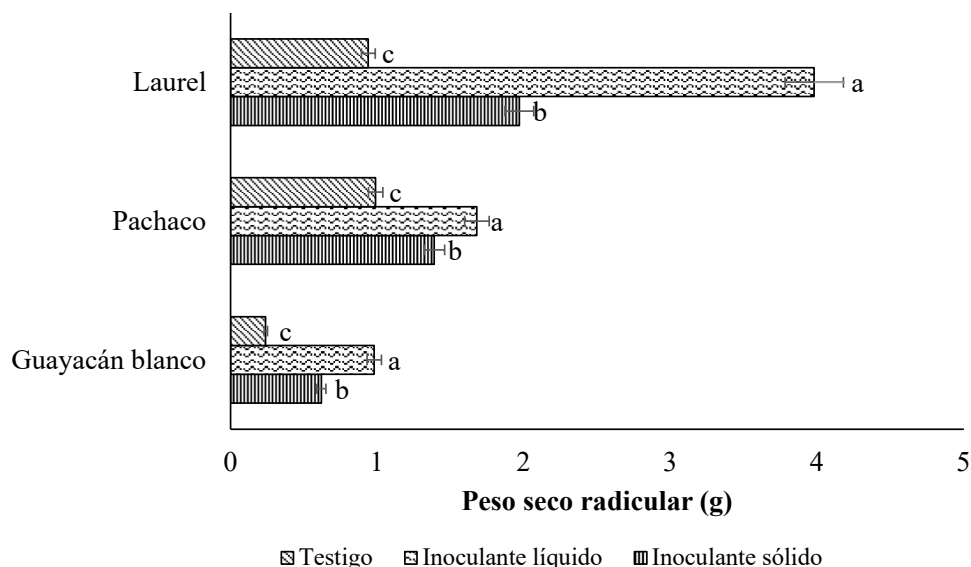


Figura 8. Peso seco radicular de plantas colonizadas con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en tres especies forestales. Las barras de error indican $\pm$ DE; diferentes letras indican diferencias significativas entre los promedios a $P < 0.05$ (Test de Tukey).

Figure 8. Root dry weight of plants colonized with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in three forest species. Error bars indicate $\pm$ SD; different letters indicate significant differences between means at $P < 0.05$ (Tukey test).

Para la especie pachaco, los tratamientos de inóculo líquido y sólido mostraron resultados destacados en el peso seco radicular, con valores de 1.68 g y 1.39 g respectivamente, y hubo diferencias significativas entre ellos. Ambos tratamientos difirieron significativamente del testigo, que obtuvo el valor más bajo de 0.99 g. Estos resultados sugieren que tanto los inóculos líquidos como los sólidos son efectivos en promover el crecimiento radicular, aunque los líquidos parecen tener una ligera ventaja. Esto concuerda con la investigación de Manokari y Shekhawat (2024) quienes reportaron que los inóculos líquidos pueden proporcionar un entorno más uniforme y accesible para las raíces, facilitando una mayor absorción de nutrientes en comparación con los inóculos sólidos. La capacidad de los inóculos líquidos para mejorar la uniformidad de la distribución de los hongos micorrízicos en el suelo puede resultar en una colonización más eficaz de las raíces, lo que a su vez optimiza la simbiosis micorrízica y mejora la eficiencia en la absorción de nutrientes clave como el fósforo, nitrógeno y potasio (Naseer *et al.*, 2024). Además, los inóculos líquidos pueden contribuir a la retención de humedad en el suelo, lo que es particularmente beneficioso en condiciones de sequía o en suelos con baja capacidad de retención de agua (Augé, 2001). Estos factores combinados no solo favorecen un crecimiento radicular más robusto y extenso, sino que también potencian la resistencia de las plantas a condiciones de estrés ambiental. Por lo tanto, la elección del tipo de inóculo puede influir significativamente en la salud y productividad de las plantas, subrayando la necesidad de una selección cuidadosa basada en las condiciones específicas del cultivo y el entorno (Berg, Kusstatscher, Abdelfattah, Cernava y Smalla, 2021).

Por último, en la especie laurel, el tratamiento de inóculo líquido obtuvo el mejor resultado en el peso seco radicular, con 3.98 g, diferenciándose significativamente del inóculo sólido, que registró 1.97 g, y del testigo, con 0.94 g. Este resultado sugiere una mayor eficiencia del inóculo líquido para esta especie específica, lo que podría estar relacionado con la capacidad del líquido para distribuirse más homogéneamente en el sustrato y mejorar la disponibilidad de nutrientes. Este hallazgo es respaldado por el trabajo de López-Morales, *et al.* (2022), quienes observaron que los inóculos líquidos pueden mejorar significativamente la biomasa radicular en comparación con los sólidos debido a su mejor dispersión y contacto con las raíces.

CONCLUSIONES

La aplicación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) ha demostrado ser notablemente efectiva en promover el crecimiento y desarrollo inicial de *Cybistax donnell-smithii* (guayacán blanco), *Schizolobium parahybum* (pachaco) y *Cordia alliodora* (laurel). Los tratamientos con HMA incrementaron significativamente la colonización micorrízica, la densidad de esporas y el crecimiento en altura, diámetro y biomasa de las plantas. En particular, el inoculante líquido mostró los mejores resultados, destacando su superior eficacia en el desarrollo vegetal. A pesar de la variabilidad observada entre las especies, este estudio confirma el enorme potencial de los HMA como biofertilizantes en la producción forestal. La implementación de estos hongos no solo mejora la sostenibilidad y eficiencia en viveros forestales, sino que también ofrece una alternativa viable a los insumos químicos, promoviendo prácticas agrícolas más respetuosas con el medio ambiente.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el presente estudio están disponibles a través del autor correspondiente, previa solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia en esta sección.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, Metodología e Investigación: O.O.P.B, E.M.J.R. Análisis de datos: O.O.P.B, E.M.J.R. Escritura, revisión y edición: R.S.C.G y K.V.A.I.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo por proveernos de las instalaciones e insumos indispensables para la ejecución de la presente investigación.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Ulloa, W., Arce-Acuña, P., Galiano-Murillo, F., & Torres-Cruz, T. J. (2016). Aislamiento de esporas y evaluación de métodos de inoculación en la producción de micorrizas en cultivos trampa. *Revista Tecnología en Marcha*, 29, 5-14. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i7.2700>
- Alori, E. T., Dare, M. O., & Babalola, O. O. (2017). Microbial inoculants for soil quality and plant health. In E. Lichtfouse (Ed.). *Sustainable Agriculture Reviews* (pp. 281-307). Cham, Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48006-0_9
- Augé, R. M. (2001). Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11(1), 3-42. <https://doi.org/10.1007/s005720100097>
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., & Ahmed, N. (2020). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Growth Regulation: Implications in Abiotic Stress Tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1101932. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>
- Berg, G., Kusstatscher, P., Abdelfattah, A., Cernava, T., & Smalla, K. (2021). Microbiome modulation-toward a better understanding of plant microbiome response to microbial inoculants. *Frontiers in Microbiology*, 12, 650610. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.650610>
- Berruti, A., Lumini, E., Balestrini, R., & Bianciotto, V. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi as natural biofertilizers: let's benefit from past successes. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01559>
- Bodenhausen, N., Deslandes-Hérolde, G., Waelchli, J., Held, A., van Der Heijden, M. G., & Schlaeppi, K. (2021). Relative qPCR to quantify colonization of plant roots by arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*, 31(2), 137-148.
- Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T., & Malajczuk, N. (1996). *Working with mycorrhizas in forestry and agriculture*. Canberra, Australia: Australian Centre for International Agricultural Research.
- Chen, M., Arato, M., Borghi, L., Nouri, E., & Reinhardt, D. (2018). Beneficial services of arbuscular mycorrhizal fungi-from ecology to application. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1270.
- Crespo-Flores, G., Ramírez-Tobias, H. M., Vallejo-Pérez, M. R., Méndez-Cortés, H., & González-Cañizares, P. J. (2022). Inoculación con rizobios y hongos micorrízicos arbusculares en plantas de *Leucaena leucocephala* en etapa de vivero y en sustrato con pH neutro. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 10(2), 98-108. [http://doi.org/10.17138/TGFT\(10\)98-108](http://doi.org/10.17138/TGFT(10)98-108)
- Cruz-Cárdenas, C. I., Zelaya-Molina, L. X., Sandoval-Cancino, G., Santos-Villalobos, S. D. L., Rojas-Anaya, E., Chávez-Díaz, I. F., & Ruiz-Ramírez, S. (2021). Utilización de microorganismos para una agricultura sostenible en México: consideraciones y retos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(5), 899-913. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2905>
- Fernández, J., & Martínez, L. (2022). Eficacia de inóculos líquidos en la promoción del crecimiento radicular fresco en especies forestales. *Forest Ecology and Management*, 49(3), 145-156.
- Formenti, L., & Rasmann, S. (2019). Mycorrhizal fungi enhance resistance to herbivores in tomato plants with reduced jasmonic acid production. *Agronomy*, 9(3), 131. <https://doi.org/10.3390/agronomy9030131>
- Ghorui, M., Chowdhury, S., Das, K., Sunar, K., & Prakash, B. (2023). Optimizing factors for large-scale production of Arbuscular Mycorrhizal Fungi consortia using root organ cultures. *Journal of Biological Methods*, 10, 1-21. <https://doi.org/10.14440/jbm.2023.410>
- Jiménez-Martínez, A., Montaña, N. M., Montaña-Arias, S.A., & Chimal-Sánchez, E. (2025). Hongos Micorrízicos Arbusculares de un Sistema Agroforestal Semiárido Promueven el Crecimiento y Nutrición de la Lechuga. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-12. e2088. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2088>
- Koskey, G., Avio, L., Turrini, A., Sbrana, C., & Bärberi, P. (2023). Biostimulatory effect of vermicompost extract enhances soil mycorrhizal activity and selectively improves crop productivity. *Plant and Soil*, 484(1), 183-199.
- Kuila, D., & Ghosh, S. (2022). Aspects, problems and utilization of Arbuscular Mycorrhizal (AM) application as bio-fertilizer in sustainable agriculture. *Current Research in Microbial Sciences*, 3, 100107. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2022.100107>
- López-Morales, M. L., Leos-Escobedo, L., Alfaro-Hernández, L., & Morales-Morales, A. E. (2022). Impacto de abonos orgánicos asociados con micorrizas sobre rendimiento y calidad nutracéutica del pepino. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(5), 785-798. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i5.2868>
- Luo, J., Ma, S., & Xue, X. (2020). Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPR) Inoculations on *Elaeagnus angustifolia* L. in Saline Soil. *Applied Sciences*, 10(3), 945. <https://doi.org/10.3390/app10030945>
- Medina, L. R. (2022). Los hongos micorrízicos arbusculares y su rol en los agroecosistemas. *Cultivos Tropicales*, 43(1), e14.
- Manokari, M., & Shekhawat, M. S. (2024). Synseeds of in vitro roots as inoculum for storage and mass production of adventitious roots in *Hemidesmus indicus* (L.) R. Br. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 159(2), 51.
- Miceli, A., Vetrano, F., Torta, L., Esposito, A., & Moncada, A. (2023). Effect of mycorrhizal inoculation on melon plants under deficit irrigation regimes. *Agronomy*, 13(2), 440.
- Nakatani, A. S., Machineski, G. S., Scaramal, A. S., & Colozzi-Filho, A. (2024). The inoculum potential of arbuscular mycorrhizal fungi in soil amended with swine slurry. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 13(1), 1-9.

- Naseer, M., Yang, Y. M., Zhu, Y., Ling, Z., Cao, J., Wang, S., ... & Xiong, Y. C. (2024). Nano-iron and AM fungi inoculation in dryland wheat field: A sustainable alternative to plastic film mulching. *Field Crops Research*, 306, 109208.
- Ochoa-Meza, A., Esqueda, M., Fernández-Valle, R., & Herrera-Peraza, R. (2009). Variación estacional de hongos micorrízicos arbusculares asociados con *Agave angustifolia* Haw. en la Sierra Sonorense, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(3), 189-199. <https://doi.org/10.35196/rfm.2009.3.189-199>
- Pan, J., Huang, C., Peng, F., Zhang, W., Luo, J., & Ma, S. (2020). Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPR) Inoculations on *Elaeagnus angustifolia* L. in Saline Soil. *Applied Sciences*, 10(3), 945. <https://doi.org/10.3390/app10030945>
- Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British mycological Society*, 55(1), 1-7.
- Ruiz-Sánchez, M., Domínguez-Pérez, A., Muñoz-Hernández, Y., Rodríguez-Pérez, R., Díaz-López, G. S., Valle-Sánchez, M., & Rivera-Espinosa, R. (2021). Aplicación del biofertilizante EcoMic[®] en semillero tecnificado para el trasplante mecanizado de arroz semilla. *Cultivos Tropicales*, 42(4), 1-11.
- Saber-Riseh, R., Ebrahimi-Zarandi, M., Gholizadeh Vazvani, M., & Skorik, Y. A. (2021). Reducing drought stress in plants by encapsulating plant growth-promoting bacteria with polysaccharides. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(23), 12979. <https://doi.org/10.3390/ijms222312979>
- Senthilkumar, M., Amaresan, N., & Sankaranarayanan, A. (2021). Isolation, Enumeration of Spores, and Inoculum Production of Arbuscular Mycorrhizal (AM) Fungi. In *Plant-Microbe Interactions* (pp. 61-63) New York, NY, USA: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1080-0_11
- Sharma, K., Thokchom, S. D., Gupta, S., & Kapoor, R. (2023). Arbuscular Mycorrhizal Fungi: Role as Biofertilizers, Technology Development, and Economics. In *Fungi and Fungal Products in Human Welfare and Biotechnology* (pp. 3-30). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8853-0_1
- Silva-Laya, S. J., Silva-Laya, Y. M., Pérez-Martínez, S., & Álvarez-del Castillo, J. (2021). Modernidad, crisis de insostenibilidad, agroecología, pedagogía e investigación. *Revista Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina*, 9(2), 1-20.
- Sun, W., & Shahrajabian, M. H. (2023). The application of arbuscular mycorrhizal fungi as microbial biostimulant, sustainable approaches in modern agriculture. *Plants*, 12(17), 3101.
- Tapia, C. A., Sanchez-Mora, F. D., Vásconez-Montúfar, G. H., Barrera-Álvarez, A. E., Mora-Yela, R. V., Díaz-Coronel, G. T., & Garcés-Fiallos, F. R. (2021). Evaluación temporal de sistemas agroforestales de cacao en el trópico húmedo ecuatoriano. *Revista Bionatura*, 6(4), 2295-2300.
- Verhulst, N., Govaerts, B., Verachtert, E., Castellanos-Navarrete, A., Mezzalama, M., Wall, P., ... & Sayre, K. D. (2010). Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems. In *Advances in soil science: food security and soil quality* (pp. 137-208). Boca Ratón, USA: CRC Press. ISBN: 9780429130533
- Wang, M., Wang, Z., Guo, M., Qu, L., & Biere, A. (2023). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and herbivore infestation depend on availability of soil water and nutrients. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1101932. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1101932>
- Xu, H., Shi, Y., Chen, C., Pang, Z., Zhang, G., Zhang, W., & Kan, H. (2024). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Selectively Promoted the Growth of Three Ecological Restoration Plants. *Plants*, 13(12), 1678. <https://doi.org/10.3390/plants13121678>
- Yang, S., Imran, I., & Ortas, I. (2023). Impact of mycorrhiza on plant nutrition and food security. *Journal of Plant Nutrition*, 46(13), 3247-3272. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2192780>
- Zhu, G., Nong, H., Fang, S., Qin, S., & Zhang, Y. (2024). Arbuscular mycorrhizal symbiosis reshapes the drought adaptation strategies of a dominant sand-fixation shrub species in northern China. *Science of The Total Environment*, 955, 177135. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177135>
- Zydlik, Z., Zydlik, P., & Wiczorek, R. (2021). The effects of bioinoculants based on mycorrhizal and *Trichoderma* spp. fungi in an apple tree nursery under replantation conditions. *Agronomy*, 11(11), 2355. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112355>