



Consortios de hongos micorrízicos arbusculares de selva baja caducifolia y sistema silvopastoril: efectos sobre el crecimiento inicial de cuatro especies forrajeras tropicales †

[Consortia of arbuscular mycorrhizal fungi from deciduous forests and silvopastoral systems: effects on the initial growth of four tropical forage species]

E. Herrera-Parra¹, A.A. Luna-Mendicuti², L.E. Castillo-Sánchez², N.M. Ruz-Febles², M.J. Campos-Navarrete and J.R. Canul-Solis^{2*}

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícola y Pecuarias, Campo experimental Mocochoá Km. 25 Carretera Antigua a Mérida-Motul, Mocochoá, CP. 97450, Yucatán, México. Email: elian.herrera09@gmail.com

²Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tizimín. CP. 97700.

Avenida Cupul Km 2.5. Tizimín, Yucatán, México. Email:

armin.luna@ittizimin.edu.mx; luis.castillo@ittizimin.edu.mx;

nery.ruz@ittizimin.edu.mx; maria.campos@ittizimin.edu.mx;

jorge.canul@ittizimin.edu.mx*

*Corresponding author

SUMMARY

Background. Native arbuscular mycorrhizal fungal (AMF) consortia establish mutualistic symbiotic associations with forage species and promote their growth. **Objective.** To evaluate the effect of native arbuscular mycorrhizal fungal consortia on the initial growth of tropical forage species. **Methodology.** To assess the effect of native AMF consortia on the initial growth of four tropical forage species under controlled conditions, a completely randomized factorial (3 × 4) experiment was established with two native AMF consortia from tropical deciduous forest (TDF) and a silvopastoral system (SSP), evaluated on four forage species: *Mucuna pruriens*, *Guazuma ulmifolia*, *Enterolobium cyclocarpum* and *Moringa oleifera*, plus a control group without AMF. Morphological variables were evaluated for 90 days, and the percentage of mycorrhizal colonization was determined. **Main findings.** AMF consortia significantly affected ($p < 0.05$) leaf number and plant height, with the SSP consortium being superior in leaf production but inferior in height, compared to the control. *E. cyclocarpum* showed the best development in branch number (15.38), branch length (8.68 cm), and stem diameter (0.38 cm), while *M. pruriens* excelled in height (118.09 cm). Mycelial colonization was wide (33.00–100%), with *M. oleifera* and *E. cyclocarpum* being the most colonizable species. **Implications.** The consortium isolated from SSP showed greater compatibility and favored leaf production of tropical forage species. It is necessary to evaluate AMF consortia to understand their long-term effect on the productivity of tropical forage species. **Conclusion.** Native AMF consortia show potential to improve specific growth characteristics of tropical forage species, with differentiated responses depending on the host species and the origin of the consortium.

Key words: mycorrhization; tropical forages; symbiosis; root colonization; silvopastoral systems.

RESUMEN

Antecedentes. Los consorcios de hongos micorrízicos arbusculares nativos establecen asociaciones simbióticas mutualistas con especies forrajeras y promueven su crecimiento. **Objetivo.** Evaluar el efecto de consorcios nativos de hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento inicial de especies forrajeras tropicales. **Metodología.** Para evaluar el efecto de consorcios (HMA) nativos sobre el crecimiento inicial de cuatro especies forrajeras tropicales en condiciones controladas, se estableció un experimento factorial completamente aleatorizado (3×4) con dos consorcios de HMA nativos provenientes de Selva Baja Caducifolia (SBC) y un sistema silvopastoril (SSP), evaluados sobre cuatro especies forrajeras: *Mucuna pruriens*, *Guazuma ulmifolia*, *Enterolobium cyclocarpum* y

† Submitted July 1, 2025 – Accepted May 27, 2026. <http://doi.org/10.56369/tsaes.6437>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = E. Herrera-Parra: <https://orcid.org/0000-0003-4136-6693>; A.A. Luna-Mendicuti: <https://orcid.org/0000-0003-3745-3401>; L.E. Castillo-Sánchez: <https://orcid.org/0000-0002-9848-0801>; N.M. Ruz-Febles: <https://orcid.org/0000-0001-8044-7352>; M.J. Campos-Navarrete: <https://orcid.org/0000-0002-6142-2296>; J.R. Canul-Solis: <https://orcid.org/0000-0001-9934-4302>

Moringa oleifera, más un grupo control sin HMA. Se evaluaron variables morfológicas durante 90 días y se determinó el porcentaje de colonización micorrízica. **Hallazgos principales.** Los consorcios de HMA afectaron significativamente ($p < 0.05$) el número de hojas y la altura de la planta, siendo el consorcio SSP superior en producción foliar, pero inferior en altura, en comparación con el control. *E. cyclocarpum* mostró el mejor desarrollo en número de ramas (15.38), longitud de las ramas (8.68 cm) y diámetro del tallo (0.38 cm), mientras que *M. pruriens* sobresalió en altura (118.09 cm). La colonización micelial osciló entre 33.00 y 100%, siendo *M. oleifera* y *E. cyclocarpum* las especies más colonizables. **Implicaciones.** El consorcio aislado del SSP mostró mayor compatibilidad y favoreció la producción foliar de las especies forrajeras tropicales. Es necesario evaluar los consorcios de HMA para conocer el efecto de estos a largo plazo en la productividad de las especies forrajeras tropicales. **Conclusión.** Los consorcios nativos de HMA muestran potencial para mejorar las características de crecimiento específicas de las especies forrajeras tropicales, con respuestas diferenciadas según la especie hospedante y el origen del consorcio.

Palabras clave: micorrización; forrajes tropicales; simbiosis; colonización de raíces; sistemas silvopastoriles.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción ganadera tropical enfrentan desafíos significativos relacionados con la degradación de pasturas y la pérdida de fertilidad del suelo, resultado de prácticas de manejo inadecuadas y el uso excesivo de fertilizantes químicos (Nie *et al.*, 2024). Los sistemas silvopastoriles representan una alternativa sostenible que integra árboles, arbustos, pasturas y animales, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad y mejoramiento de la productividad (De-Sousa *et al.*, 2023; Murray *et al.*, 2024).

En este contexto, los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), pertenecen al phylum Glomeromycota, establecen asociaciones simbióticas mutualistas con la mayoría de las plantas vasculares y forman estructuras especializadas como arbuscúlos, vesículas y micelio extraradical que incrementan significativamente la superficie de absorción de las raíces (Martin y van der Heijden, 2024) facilitando la absorción de nutrientes, especialmente fósforo, y mejorando la tolerancia al estrés abiótico (Nie *et al.*, 2024; Khoza *et al.*, 2025) siendo particularmente importantes bajo condiciones de cambio climático y degradación ambiental (Wu *et al.*, 2023). Los estudios recientes han reportado más de 8,500 especies de HMA a nivel mundial, superando estimaciones previas por un factor de cinco a quince (Lutz *et al.*, 2025). En suelos tropicales, donde la disponibilidad de fósforo es naturalmente baja, esta simbiosis resulta particularmente relevante para el establecimiento exitoso de especies forrajeras (dos Santos *et al.*, 2022).

A pesar de la importancia reconocida de los HMA en ecosistemas tropicales, existe limitada información del efecto de consorcios nativos en especies forrajeras de importancia económica para sistemas silvopastoriles. Estudios recientes han demostrado que los consorcios nativos pueden superar en efectividad a los inoculantes comerciales debido a su adaptación local a condiciones edafoclimáticas específicas (Battie-Laclau *et al.*, 2020; Teutschero

et al., 2019). La investigación en pastos tropicales del Cerrado brasileño ha confirmado la alta actividad micorrízica en gramíneas forrajeras, con densidades de esporas variables según el genotipo de pasto utilizado (dos Santos *et al.*, 2022). Ante estas evidencias el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de consorcios nativos de hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento inicial de especies forrajeras tropicales. Se probó la hipótesis; los consorcios nativos de HMA, especialmente aquellos provenientes de sistemas silvopastoriles, promoverán significativamente el crecimiento inicial de especies forrajeras tropicales debido a su adaptación local y mayor compatibilidad simbiótica con las especies hospedantes, como se ha documentado en estudios recientes en ecosistemas similares (de Pontes *et al.*, 2024).

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del experimento

El experimento se realizó en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Tizimín, Yucatán, México (21°09'29" N, 88°10' 21" W, 20 msnm). El área presenta clima cálido subhúmedo con lluvias en verano (AW₀ según Köppen), precipitación promedio anual de 1,167 mm, temperatura media de 27°C y humedad relativa de 68.5-86.3% (García, 1973).

Material biológico

El consorcio de hongos micorrízicos arbusculares SBC se aisló de la selva baja caducifolia (Reserva Cuxtal: 20° 52' 07.44" N, 89°36' 51.64" W), está compuesto por *Funneliformis geosporum* C. Walker & A., Schüssler *Claroideoglossum claroideum* C. Walker A., *Glomus pustulatum* Koske. & Fries., *G. ambisporum* C. Walker & A. Schüssler y *Ambispora gerdemaniai* C. Walker, Vestberg & A. Schüssler (Schüssler y Walker, 2010). Mientras que el consorcio de hongos micorrízicos arbusculares SSP se aisló del sistema silvopastoril (ITT: 21°09'29" N, 88°10' 21" W), integrado por *Gigaspora spp.* y *Glomus spp.* La

caracterización molecular del consorcio SSP queda pendiente para estudios futuros.

Especies Forrajeras Evaluadas

Se evaluaron cuatro especies vegetales con potencial forrajero y se seleccionaron por sus características nutricionales y adaptabilidad a las condiciones tropicales: *Mucuna pruriens* (L.) DC., *Guazuma ulmifolia* Lam., *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., y *Moringa oleifera* Lam. La diversidad taxonómica del grupo incluyó tanto especies herbáceas como arbóreas, abarcando leguminosas y no leguminosas con diferentes estrategias ecológicas. *Mucuna pruriens* (L.) DC., conocida comúnmente como frijol terciopelo, representa una leguminosa herbácea de hábito rastrero que ha despertado interés en sistemas agroforestales debido a sus propiedades alelopáticas naturales. *Guazuma ulmifolia* Lam., denominada regionalmente como pixoy, constituye un árbol forrajero nativo de las zonas tropicales de América que se distingue por su excepcional capacidad de rebrote tras la poda. Esta característica fisiológica permite un manejo sostenible de la biomasa foliar, facilitando la implementación de sistemas silvopastoriles intensivos donde la producción de forraje arbóreo complementa la oferta nutricional de las gramíneas. La tercera especie evaluada, *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., conocida como pich, representa una leguminosa arbórea de considerable importancia en la ganadería tropical debido a su valor nutricional en frutos y follaje durante la época de seca en las regiones tropicales. Finalmente, *Moringa oleifera* Lam., árbol multipropósito de elevado valor nutricional tanto para consumo humano como animal.

Preparación del inóculo

Las esporas de HMA se extrajeron mediante la técnica de tamizado, decantación húmeda por centrifugación (Gerdemann y Nicolson, 1963). El sustrato consistió en suelo estéril de sistema silvopastoril y agrolita (7:3 v/v), esterilizado por arrastre de vapor (90°C, 1 h/día durante 3 días).

Establecimiento del Experimento

El establecimiento de las plantas se realizó bajo condiciones controladas de invernadero, utilizando bolsas de polietileno negro de 10×30 cm que fueron llenados con sustrato previamente esterilizado para eliminar la microbiota nativa y asegurar condiciones iniciales homogéneas entre unidades experimentales.

Las semillas fueron desinfectadas superficialmente con hipoclorito de sodio al 1% durante tres minutos y posteriormente enjuagadas con agua destilada estéril antes de la siembra, con el fin de reducir la presencia

de microorganismos epifíticos que pudieran interferir con la inoculación.

La siembra se realizó depositando una semilla por contenedor a una profundidad de 1 cm para cada especie. El proceso de inoculación micorrízica se realizó de manera simultánea junto a la siembra, aplicando 1 mL de suspensión acuosa estandarizada con una concentración de 60 esporas por mililitro directamente en contacto con la semilla. El manejo del riego consistió en dos aplicaciones semanales, manteniendo el sustrato a capacidad de campo para asegurar disponibilidad hídrica.

Variables Evaluadas

Se estimó el desarrollo vegetal mediante el registro semanal de ocho variables morfológicas durante 90 días, permitiendo el análisis temporal de la respuesta de cada especie forrajera a los diferentes tratamientos de inoculación micorrízica. Variables de arquitectura aérea: número y largo de ramas (NRAM, LRAM) en cm. Parámetros foliares: número total de hojas (NH) por planta, así como el largo (LH) y ancho de hoja (AH) en cm. Las variables de desarrollo del tallo principal evaluados fueron: la altura de planta (AP) en cm, medida desde el cuello radicular hasta la yema apical terminal, el diámetro de tallo (DT) en cm, determinado a una distancia estandarizada de 2 cm del cuello radicular para asegurar repetibilidad; y el número de nudos (NN), que refleja la actividad meristemática apical y el potencial de desarrollo de estructuras laterales. La frecuencia semanal de medición permitió construir curvas de crecimiento detalladas para cada variable, facilitando el análisis de las tasas de crecimiento relativo y la identificación de períodos críticos de respuesta diferencial entre tratamientos. Es importante señalar que la interpretación morfológica del número de nudos difiere según el hábito de crecimiento de cada especie. En *Mucuna pruriens*, leguminosa herbácea de hábito estolonífero, los entrenudos son conspicuos y morfológicamente diferenciados desde las primeras semanas de crecimiento, lo que permitió su cuantificación precisa a lo largo de todo el período experimental. En contraste, las tres especies arbóreas evaluadas (*Enterolobium cyclocarpum*, *Moringa oleifera* y *Guazuma ulmifolia*) presentaron, durante los primeros 90 días posteriores a la siembra, un patrón de crecimiento dominado por el eje hipocótilo-epicótilo con escasa diferenciación visual entre nodos sucesivos, característica ontogenética propia de la fase de establecimiento de especies leñosas tropicales. Esta condición resultó en valores de NN cercanos a cero (0.015), que reflejan la presencia ocasional de un nodo apenas diferenciado en algunas plantas de estas especies. Por lo tanto, si bien la variable fue medida de forma homogénea en todas las unidades experimentales, su interpretación biológica debe

considerar la marcada diferencia en la arquitectura caulinar entre especies herbáceas y arbóreas durante la etapa de establecimiento evaluada.

Colonización micorrízica

En tres plantas por tratamiento se evaluó el porcentaje de colonización siguiendo el protocolo de Phillips y Hayman (1970): aclaramiento con KOH 10%, tratamiento con H₂O₂ 30% y HCl 30%, tinción con azul de tripano y cuantificación microscópica de estructuras fúngicas (micelio, esporas, vesículas, arbuscúlos) (McGonigle *et al.*, 1990).

Diseño y análisis estadístico

La evaluación de la respuesta de las especies forrajeras a los diferentes consorcios de HMA se realizó mediante un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3×4. El primer factor experimental (Factor A) estuvo constituido por tres tratamientos de inoculación micorrízica: el consorcio SBC (especies nativas de selva baja caducifolia), el consorcio SSP (especies adaptadas a sistemas silvopastoriles), y un tratamiento control sin inoculación de hongos micorrízicos arbusculares. El segundo factor (Factor B) comprendió las cuatro especies forrajeras previamente descritas. La combinación de ambos factores generó doce tratamientos, cada uno representando una combinación específica de especie forrajera y tipo de inoculación micorrízica. Para garantizar la robustez estadística del experimento y minimizar el error experimental, se establecieron veinte repeticiones por cada combinación de tratamientos (n= 240 unidades experimentales). Los datos se analizaron mediante ANOVA factorial utilizando InfoStat 2020 (Di Rienzo *et al.*, 2020). Los datos de colonización se transformaron mediante arcoseno [$y = \arcsin \sqrt{(x/100)}$] para homogeneizar varianzas. Las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los consorcios de HMA afectaron significativamente ($p < 0.05$) el número de hojas y altura de plantas; mientras que el largo de rama, ancho de hoja, diámetro de tallo y número de nudos no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre tratamientos.

El número de hojas fue significativamente mayor ($p < 0.05$) en plantas inoculadas con el consorcio SSP (19.46) comparado con SBC (18.12) y similar al control (18.81; $p < 0.05$). Contrariamente, la altura fue significativamente menor ($p < 0.05$) en plantas inoculadas con ambos consorcios (SSP: 42.96 cm;

SBC: 41.21 cm) comparado con el control (48.34 cm) (Tabla 1).

Los resultados muestran diferentes respuestas de las especies forrajeras a la inoculación con consorcios nativos de HMA, lo que concuerda con investigaciones recientes que reportan efectividad variable de estos microorganismos según la compatibilidad hospedante-simbionte (Battie-Laclau *et al.*, 2020; Teutscheroova *et al.*, 2019). La variabilidad observada en la respuesta a la inoculación (-12% a +40%) es consistente con estudios a gran escala realizados en condiciones de campo, donde los indicadores del microbioma del suelo explicaron hasta 86% de la variación en la respuesta de crecimiento vegetal (Lutz *et al.*, 2023).

La menor altura observada en plantas inoculadas contrasta con algunos estudios que reportan incrementos en crecimiento vertical después de la micorrización (Cheng *et al.*, 2021; Guo *et al.*, 2024). Esta respuesta podría explicarse por el costo energético inicial de establecimiento de la simbiosis, donde la planta destina hasta 30% de sus fotosintatos al hongo antes de obtener beneficios nutricionales significativos (Martin y van der Heijden, 2024; Wu *et al.*, 2023). Sin embargo, esta inversión inicial se traduce en beneficios a largo plazo para la resistencia al estrés y la eficiencia nutricional.

Respuesta por especie forrajera tropicales a la inoculación de consorcios de HMA

Enterolobium cyclocarpum mostró superioridad significativa ($p < 0.05$) en número de ramas (15.38), largo de ramas (8.68 cm), número de hojas (29.13) y diámetro de tallo (0.38 cm). *Mucuna pruriens* presentó mayor ($p < 0.05$) longitud de hoja (7.71 cm), ancho de hoja (4.93 cm), número de nudos (10.61) y altura (118.09 cm), reflejando su hábito de crecimiento estolonífero. El número de nudos significativamente superior en *M. pruriens* (10.61) respecto a las especies arbóreas (0.015; $p < 0.05$) no representa una deficiencia de desarrollo en estas últimas, sino una diferencia estructural inherente al hábito de crecimiento: mientras los entrenudos de la leguminosa rastrera son anatómicamente diferenciados y funcionales para la ramificación horizontal desde etapas tempranas, las especies leñosas concentran su crecimiento inicial en la elongación del eje principal con lignificación incipiente, sin producir nodos visualmente discernibles durante los primeros 90 días de establecimiento. *Moringa oleifera* tuvo valores intermedios en la mayoría de variables, mientras que *Guazuma ulmifolia* mostró los menores valores, posiblemente debido a su lento establecimiento inicial como especie arbórea nativa (Tabla 2 y Figura 1).

Tabla 1. Efecto del origen del consorcio de HMA sobre el crecimiento inicial de especies forrajeras tropicales en los primeros 90 días posteriores a la siembra.

Variables	Origen del consorcio de HMA			EEM
	Control	SBC	SSP	
LRAM	5.226 ^a	5.141 ^a	5.3041 ^a	0.102
NH	18.8084 ^{ab}	18.1171 ^b	19.4597 ^a	0.487
LH	4.8416 ^a	4.6831 ^{ab}	4.6107 ^b	0.078
AH	2.956 ^a	2.8632 ^a	2.825 ^a	0.517
DT	0.268 ^a	0.2699 ^a	0.2712 ^a	0.003
NN	2.7308 ^a	2.5302 ^a	2.6939 ^a	0.121
AP	48.3407 ^a	41.207 ^b	42.958 ^b	1.560

LRAM: largo de la rama; NH: número de hojas; LH: largo de la hoja; AH: ancho de la hoja; DT: diámetro del tallo; NN: número de nudos; AP: altura de la planta; SBC: selva baja caducifolia; SSP: sistema silvopastoril. EEM= error estándar de la media. Medias dentro de misma fila con misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$)

Tabla 2. Crecimiento inicial de cuatro especies forrajeras a los 90 días posteriores a la siembra.

Variables	Especie				EEM
	<i>E. cyclocarpum</i>	<i>M. oleifera</i>	<i>M. pruriens</i>	<i>G. ulmifolia</i>	
NRAM	15.377 ^a	6.8966 ^b	5.3713 ^c	0.007 ^d	0.33
LRAM	8.679 ^a	7.0417 ^b	5.1665 ^c	0.008 ^d	0.11
NH	29.132 ^a	27.4487 ^a	14.652 ^b	3.947 ^c	0.54
LH	5.787 ^b	2.6825 ^c	7.7118 ^a	2.666 ^c	0.09
AH	2.709 ^b	1.9721 ^c	4.9334 ^a	1.911 ^c	0.06
DT	0.377 ^a	0.318 ^b	0.2747 ^c	0.109 ^d	0.010
NN	0.015 ^b	0.015 ^b	10.6065 ^a	0.015 ^b	0.98
AP	28.489 ^b	25.544 ^b	118.085 ^a	4.557 ^c	1.74

NRAM: número de ramas; LRAM: largo de la rama; NH: número de hojas; LH: largo de la hoja; AH: ancho de la hoja; DT: diámetro del tallo; NN: número de nudos; AP: altura de la planta. EEM: Error estándar de la media. Medias dentro de misma fila con misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$).

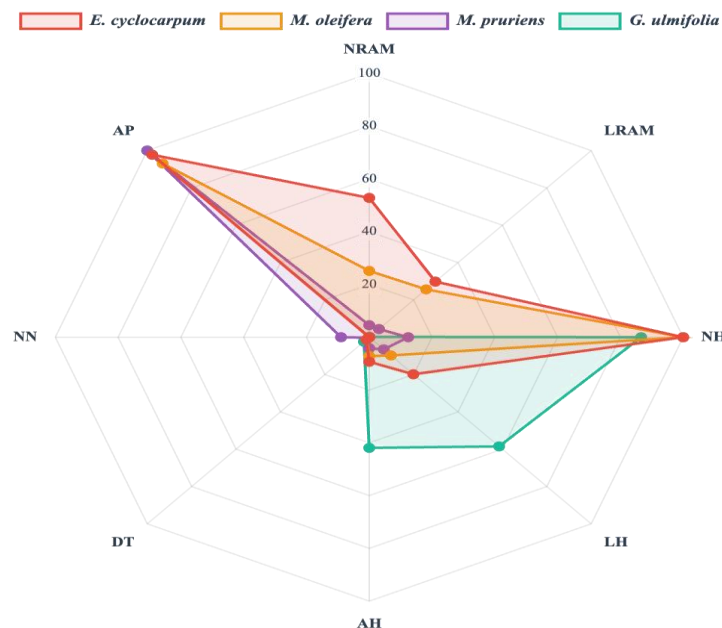


Figura 1. Crecimiento inicial de cuatro especies forrajeras tropicales a los 90 días posteriores a la siembra. Comparación del desempeño morfológico entre especies forrajeras. *E. cyclocarpum*: *Enterolobium cyclocarpum*; *M. oleifera*: *Moringa oleifera*; *M. pruriens*: *Mucuna pruriens*; *G. ulmifolia*: *Guazuma ulmifolia*. Se observan patrones diferenciales de crecimiento entre especies, destacando el comportamiento único de cada una. NRAM: número de ramas; LRAM: largo de la rama; NH: número de hojas; LH: largo de la hoja; AH: ancho de la hoja; DT: diámetro del tallo; NN: número de nudos; AP: altura de la planta.

El superior desarrollo de *E. cyclocarpum* en las variables morfológicas coincide con su adaptación natural a condiciones locales como especie nativa de la región, característica que favorece el establecimiento de asociaciones micorrízicas eficientes (de Pontes *et al.*, 2024). Su capacidad para formar micorrizas efectivas con ambos consorcios sugiere una alta dependencia micorrízica, lo cual se ha reportado en leguminosas arbóreas tropicales (dos Santos *et al.*, 2022). El crecimiento en altura de *M. pruriens* refleja su estrategia de crecimiento estolonífero, que le permite una rápida colonización horizontal del espacio disponible. Esta característica, combinada con su capacidad alelopática puede ser una especie promisoría para sistemas de cobertura en silvopastoreo (De-Sousa *et al.*, 2023). Por su parte, el desempeño de *M. oleifera* bajo inoculación micorrízica es consistente con estudios recientes que reportan incrementos del 23% en diámetro de tallo y 63% en biomasa aérea cuando se observa la micorrización, así como mejoras significativas en el contenido de nutrientes foliares (Rubio-Sanz y Jaizme-Vega, 2022; Khoza *et al.*, 2025).

Interacciones consorcio de HMA × especie forrajera tropical

Se observaron interacciones significativas ($p<0.05$) entre consorcios y especies para todas las variables evaluadas. *M. pruriens* inoculada con SSP mostró el mayor número de ramas (17.48), mientras que el control sin HMA presentó la mayor altura en esta especie (135.12 cm). En *E. cyclocarpum*, tanto el consorcio SSP como SBC promovieron incrementos similares en largo de ramas (8.30 y 8.80 cm, respectivamente) y número de hojas (28.70 y 27.74,

respectivamente) comparado con el control (Tabla 3). En cuanto al número de nudos, la interacción especie × consorcio confirmó el patrón descrito para el efecto principal de especie: los valores en *M. pruriens* oscilaron entre 10.12 y 10.92 independientemente del consorcio inoculado, mientras que las tres especies arbóreas mantuvieron valores próximos a cero (0.015) en todas las combinaciones de tratamiento, reflejando la diferencia ontogenética en la arquitectura caulinar entre formas de vida herbácea y leñosa durante la etapa de establecimiento evaluada.

Colonización micorrízica

Los porcentajes de colonización entre 33.00 y 100% señalan la receptividad de las especies forrajeras evaluadas hacia los HMA nativos, siendo consistentes con la distribución global de estos hongos que se encuentran prácticamente en todos los ecosistemas terrestres (Martin y van der Heijden, 2024). La colonización por micelio en *M. oleifera* alcanzó porcentajes superiores al 98% con ambos consorcios, corroborando su alta dependencia micorrízica reportada en estudios de diversas regiones semiáridas (Yamato *et al.*, 2009; Muthukumar *et al.*, 2003). Con *E. cyclocarpum* se obtuvo una colonización por micelio de 89.79% independientemente del consorcio de SSP o SBC inoculado. Con *M. pruriens* y *G. ulmifolia* se obtuvo los menores porcentajes de colonización por micelio (33.00 y 48.71%) con el consorcio de SBC (Figura 2). Asimismo, *M. oleifera* presentó los mayores porcentajes de colonización por esporas, especialmente con el consorcio SSP (51.28%). Los controles sin HMA mostraron colonización mínima (<10%), confirmando la efectividad de la inoculación (Figura 2).

Tabla 3. Efecto de la interacción de los consorcios de HMA sobre el crecimiento inicial de especies forrajeras.

Variables	Especie												EEM
	<i>Mucuna pruriens</i>			<i>Moringa oleifera</i>			<i>Enterolobium cyclocarpum</i>			<i>Guazuma ulmifolia</i>			
	SSP	SBC	SHMA	SSP	SBC	SHMA	SSP	SBC	SHMA	SSP	SBC	SHMA	
NRAM	17.48a	15.46ab	13.03b	6.85c	6.80c	6.74c	5.35c	5.24c	5.57c	0.01d	0.007d	0.01d	0.570
LRAM	5.77c	4.80c	4.93c	7.01b	6.89b	6.92b	8.30a	8.80a	8.93a	0.01d	0.007d	0.01d	0.190
NH	15.79c	14.05c	13.97c	29.48ab	25.86b	25.82b	28.70ab	27.74ab	31.10a	3.17d	4.60d	4.04d	0.940
LH	7.67ab	7.31b	8.15a	2.85d	2.57d	2.57d	5.60c	5.84c	5.92c	2.30d	2.96d	2.68d	0.160
AH	4.93a	4.74a	5.13a	2.04c	1.85c	1.98c	2.58b	2.77b	2.78b	1.72c	2.09c	1.91c	0.100
DT	0.28cd	0.28cd	0.26d	0.32b	0.31bc	0.31bc	0.38a	0.38a	0.38a	0.10e	0.11e	0.11e	0.017
NN	10.67a	10.12a	10.92a	0.015b	0.015b	0.015b	0.015b	0.015b	0.015b	0.015b	0.015b	0.015b	1.700
AP	111.59b	106.52b	135.12a	27.45c	23.55c	24.59c	27.29c	29.50c	28.76c	4.02d	4.96d	4.49d	3.010

NRAM: número de ramas; LRAM: largo de la rama; NH: número de hojas; LH: largo de la hoja; AH: ancho de la hoja; DT: diámetro del tallo; NN: número de nudos; AP: altura de la planta. SSP: Sistema silvopastoril; SBC: Selva baja caducifolia; SHMA: Sin consorcios de hongos micorrízicos arbusculares. EEM= Error estándar de la media. Medias dentro de misma fila con misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $P\leq0.05$)

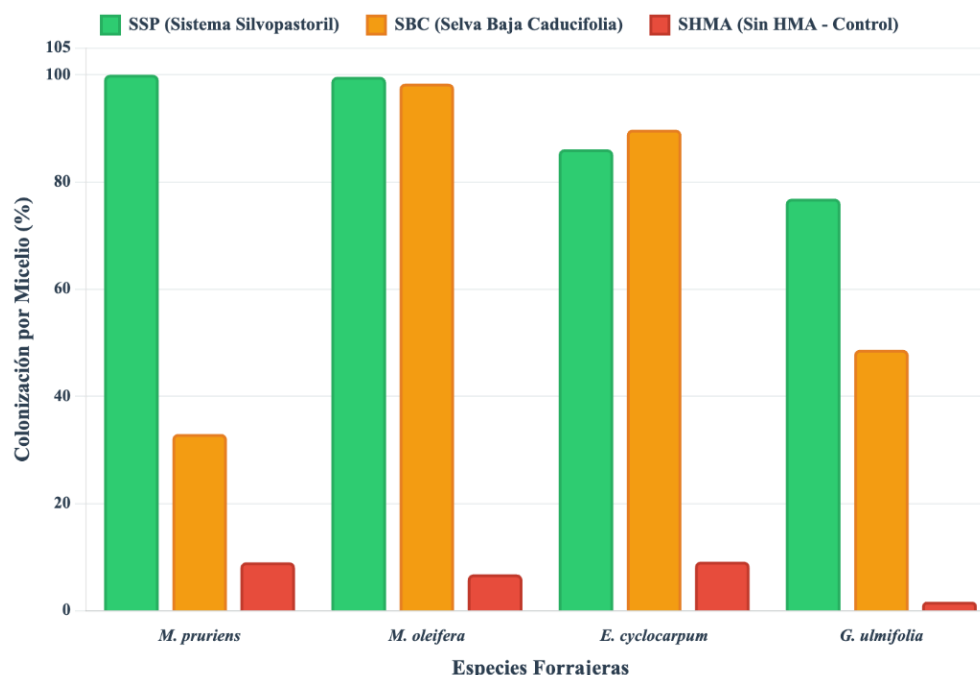


Figura 2. Colonización micorrízica por micelio en especies forrajeras tropicales. Descripción: Porcentaje de colonización por micelio de hongos micorrízicos arbusculares en cuatro especies forrajeras. SSP: sistema silvopastoril; SBC: selva baja caducifolia; SHMA: sin hongos micorrízicos arbusculares (control).

La ausencia de arbuscúlos y vesículas a los 90 días sugiere que la evaluación se realizó durante las fases tempranas de colonización, donde predomina el crecimiento de micelio extraradical. Reportes recientes han demostrado que el desarrollo completo de estructuras fúngicas especializadas requiere períodos más prolongados, especialmente en condiciones tropicales donde los procesos de colonización pueden estar influenciados por factores climáticos estacionales (de Pontes *et al.*, 2024).

Implicaciones para sistemas silvopastoriles

Los resultados del presente estudio sugieren que los consorcios nativos de HMA pueden contribuir al crecimiento exitoso de especies forrajeras para establecer en sistemas silvopastoriles, especialmente mediante el incremento en producción foliar observado con el consorcio SSP. Esta respuesta es particularmente relevante considerando que la biomasa foliar representa el principal recurso forrajero en estos sistemas, y estudios recientes han confirmado que los HMA pueden incrementar la tolerancia a sequía y mejorar la eficiencia fotosintética hasta en 36% bajo condiciones de estrés (Guo *et al.*, 2024; Abdalla *et al.*, 2023).

La efectividad entre consorcios SSP vs. SBC apoya la hipótesis de adaptación local, donde los HMA aislados de sistemas silvopastoriles muestran mayor compatibilidad con especies forrajeras utilizadas en

estos agroecosistemas. Esta observación es consistente con estudios recientes que demuestran que la diversidad y composición de las comunidades de HMA están fuertemente influenciadas por el tipo de suelo y la intensidad de uso de la tierra, con especies fúngicas específicas adaptadas a nichos particulares (Murray *et al.*, 2024; Battie-Laclau *et al.*, 2020).

CONCLUSIONES

Las cuatro especies evaluadas presentan amplia receptividad a la colonización micorrízica (33.00-100%), confirmando su potencial para establecer simbiosis efectivas con HMA nativos. Los consorcios nativos de HMA muestran efectos variables en el crecimiento inicial de especies forrajeras tropicales, promoviendo la producción foliar pero reduciendo temporalmente el crecimiento en altura. Específicamente, el consorcio proveniente de sistema silvopastoril presenta ventajas en producción foliar, sugiriendo adaptación local que favorece la compatibilidad con especies forrajeras. *E. cyclocarpum* es la especie más promisoría debido a su superior desarrollo morfológico y alta colonización micorrízica, seguida por *M. pruriens* en crecimiento vertical. Los HMA nativos representan una herramienta biotecnológica prometedora para la promoción de crecimiento de especies forrajeras en sistemas silvopastoriles sostenibles.

Recomendaciones

Se recomienda extender las evaluaciones más allá de los 90 días para caracterizar completamente el desarrollo de estructuras fúngicas especializadas (arbusculos, vesículas) y evaluar efectos a largo plazo en productividad. Adicionalmente, sería valioso evaluar el efecto de estos consorcios bajo condiciones de estrés hídrico y nutricional típicas de sistemas productivos tropicales. Asimismo, se recomienda la caracterización morfológica y molecular completa del consorcio SSP para comparar su diversidad fúngica con el consorcio SBC en condiciones equivalentes.

Agradecimientos

Al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto “Efecto de los hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento inicial de especies arbóreas forrajeras tropicales” en la Convocatoria 2019 para el apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica en los Programas Educativos de los Institutos Tecnológicos Federales, Descentralizados y Centros. Al Instituto Tecnológico de Tizimín por las facilidades otorgadas para la realización de este estudio.

Funding. This work was funded by the Tecnológico Nacional de México through the project "Efecto de los hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento inicial de especies arbóreas forrajeras tropicales", 2019 Call for support for Scientific and Technological Research.

Conflict of interest statement. The authors declare that they have no conflict of interest with respect to this manuscript.

Compliance with ethical standards. This study did not involve human subjects, vertebrate animals, or endangered plant species. The forage species evaluated (*Mucuna pruriens*, *Guazuma ulmifolia*, *Enterolobium cyclocarpum* and *Moringa oleifera*) are commercially available. No specific collection or ethics permits were required for the plant material used.

Data availability. Data are available from the corresponding author upon reasonable request.

Author contribution statement (CrediT). E. Herrera-Parra — Conceptualization, Investigation. A. A. Luna-Mendicuti — Data curation, Validation. L. E. Castillo-Sánchez — Writing — review & editing, Visualization. N. M. Ruz-Febles — Methodology, Supervision. M. J. Campos-Navarrete — Methodology, Formal Analysis. J. Canul-Solis — Writing — original draft, Formal analysis, Data curation.

REFERENCES

- Abdalla, M., Bitterlich, M., Jansa, J., Püschel, D. and Ahmed, M.A., 2023. The role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in improving plant water status under drought. *Journal of Experimental Botany*, 74(16), pp. 4808-4824. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad249>
- Battie-Laclau, P., Taschen, E., Plassard, C., Dezette, D., Abadie, J., Arnal, D., Benezech, P., Duthoit, M., Pablo, A.L., Jourdan, C., Laclau, J.P., Bertrand, I., Taudière, A. and Hinsinger, P., 2020. Role of trees and herbaceous vegetation beneath trees in maintaining arbuscular mycorrhizal communities in temperate alley cropping systems. *Plant and Soil*, 453(1-2), pp. 153-174. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04181-z>
- Cheng, H.Q., Zou, Y.N., Wu, Q.S., and Kuča, K., 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate drought stress in trifoliate orange by regulating H⁺-ATPase activity and gene expression. *Frontiers in Plant Science*, 12, p. 659694. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.659694>
- de Pontes, J.S., Oehl, F., Pereira, C.D., de Toledo, C.T., Coyne, D., da Silva, D. K. and Costa Maia, L., 2024. Heterogeneity in arbuscular mycorrhizal fungi and plant communities of the Brazilian Cerrado, transitional areas toward the Caatinga, and the Atlantic Forest. *Microbial Ecology*, 87(1), p. 1-15. <https://doi.org/10.1007/s00248-023-02337-0>
- De-Sousa, K.T., Deniz, M., Dittrich, J.R. and Hötzel, M.J., 2023. Effects of tree arrangements of silvopasture system on behaviour and performance of cattle – a systematic review. *Annals of Animal Science*, 23(3), p. 629-639. <https://doi.org/10.2478/aoas-2023-0002>
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M. and Robledo, C.W., 2020. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- dos Santos, L., Rubio, N.A., de Moura, J.B., Fernandes de Souza, R., Fernandes S.M.E., Fernandes de Moura, L., Gomes X.E. dos Santos, J.M., Nehring, R. and Dutra e Silva, S., 2022. Mycorrhizal fungi arbuscular in forage grasses cultivated in Cerrado soil.

- Scientific Reports*, 12, p. 3103.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-07088-5>
- García, E., 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Gerdemann, J.W. and Nicolson, T.H., 1963. Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving & decanting. *Transactions of the British Mycological Society*, 46, p. 235-244.
- Guo, S., Xia, L., Xia, D., Li, M., Xu, W. and Liu, L., 2024. Enhancing plant resilience: arbuscular mycorrhizal fungi's role in alleviating drought stress in vegetation concrete. *Frontiers in Plant Science*, 15, p. 1401050.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1401050>
- Khoza, T., Masenya, A., Khanyile, N. and Thosago, S., 2025. Alleviating plant density and salinity stress in *Moringa oleifera* using arbuscular mycorrhizal fungi: A review. *Journal of Fungi*, 11, p. 328.
<https://doi.org/10.3390/jof11040328>
- Lutz, S., Bodenhausen, N., Hess, J., Valzano-Held, A., Waelchli, J., Deslandes-Hérolde, G., Schlaeppli, K. and van der Heijden, M.G., 2023. Soil microbiome indicators can predict crop growth response to large-scale inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature Microbiology*, 8, p. 2277-2289.
<https://doi.org/10.1038/s41564-023-01520-w>
- Lutz, S., Mikryukov, V., Labouyrie, M., Bahram, M., Jones, A., Panagos, P., Delgado-Baquerizo, M., Maestre, F.T., Orgiazzi, A., Tedersoo, L. and van der Heijden, M.G., 2025. Global richness of arbuscular mycorrhizal fungi. *Fungal Ecology*, 74, p. 101347.
<https://doi.org/10.1016/j.funeco.2024.101347>
- Murray, S., Avezaat, B., Guilmont, R., Hogenboom, A.A., Lareau, D.H., Wear, B. and Moinet, G.Y.K., 2024. The effect of trees on arbuscular mycorrhizal fungi and grassland root biomass: Case study of two temperate silvopastoral systems. *Applied Soil Ecology*, 202, p. 105539.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105539>
- Martin, F. and van der Heijden, M.G., 2024. The mycorrhizal symbiosis: research frontiers in genomics, ecology, and agricultural application. *New Phytologist*, 242, p. 1486-1506.
<https://doi.org/10.1111/nph.19541>
- McGonigle, T.P., Miller, M.H., Evans, D.G., Fairchild, G.L. and Swan, J.A., 1990. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 115, p. 495-501.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00476.x>
- Muthukumar, T., Cha, L., Yang, X., Cao, M., Tang, J. and Zheng, Z., 2003. Distribution of roots and arbuscular mycorrhizal associations in tropical forest types of Xishuangbanna, southwest China. *Applied Soil Ecology*, 22(3), p. 241-253.
- Nie, W., He, Q., Guo, H., Zhang, W., Ma, L., Li, J. and Wen, D., 2024. Arbuscular mycorrhizal fungi: boosting crop resilience to environmental stresses. *Microorganisms*, 12(12), p. 2448.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms12122448>
- Phillips, J.M. and Hayman, D.S., 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions British Mycological Society*, 55, p. 158-161.
- Rubio-Sanz, L. and Jaizme-Vega, M.C., 2022. Mycorrhization of *Moringa oleifera* improves growth and nutrient accumulation in leaves. *Journal of Plant Nutrition*, 12, 1765-1773.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2027969>
- Schüßler, A. and Walker, C., 2010. The Glomeromycota. A species list with new families and new genera. Gloucester, England. The Royal Botanic Garden Edinburgh.
- Teutschero, N., Vázquez, E., Arevalo, A., Pulleman, M., Rao, I. and Arango, J., 2019. Differences in arbuscular mycorrhizal colonization and P acquisition between genotypes of the tropical *Brachiaria* grasses: Is there a relation with BNI activity? *Biology and Fertility of Soils*, 55, p. 325-337.
<https://doi.org/10.1007/s00374-019-01353-y>
- Wu, S., Fu, W., Rillig, M.C., Chen, B., Zhu, Y.G. and Huang, L., 2023. Soil organic matter dynamics mediated by arbuscular mycorrhizal fungi—an updated conceptual framework. *New Phytologist*, 242(4), p. 1417-1425.
<https://doi.org/10.1111/nph.19178>

Yamato, M., Ikeda, S. and Iwase, K., 2009. Community of arbuscular mycorrhizal fungi in drought-resistant plants, *Moringa* spp., in semiarid regions in Madagascar and Uganda.

Mycoscience, 50, p. 100-105.
<https://doi.org/10.1007/s10267-008-0459-8>