

ARTÍCULOS

**Crecimiento y desarrollo fotosintético de *Swietenia mahagoni*
en sustratos inoculados con micorrizas arbusculares**

Growth and photosynthetic development of *Swietenia mahagoni*
in substrates inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi

**Emir Falcón Oconor ^{a*}, Milagros Cobas López ^b,
Marta Bonilla Vichot ^b, Orfelina Rodríguez Leyva ^a**

* Autor de correspondencia: ^a Universidad de Guantánamo, Facultad Agroforestal, Departamento de Ciencias Forestales, Guantánamo, Cuba, tel.: 21 326113, ext. 111. efalconoconor@gmail.com
^b Universidad de Pinar del Río “Hermanos Saiz Montes de Oca”, Facultad de Ciencias Forestales y Agropecuarias, Departamento Forestal, Pinar del Río, Cuba.

SUMMARY

Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) has allowed for controlled development and growth in different species. However, its effect on some tropical species such as *Swietenia mahagoni* has not been evaluated. This study evaluated the growth and photosynthetic development of *S. mahagoni* produced in substrates inoculated with AMF. Using a completely randomized design, the combinations of two factors were evaluated: substrate (cocoa husk + coconut fiber + composted pine sawdust in proportions 6:2:2 and 2:6:2, and a control composed of soil + cocoa husks in a 9:1 ratio) and mycorrhizal strains (*Glomus cubense*, *Rhizoglyphus irregularis* and *Funneliformis mosseae*). From 30 to 120 days after the seed's germination in the nursery, the leaf surface and the total dry mass were evaluated, and growth analysis was carried out using the relative growth rate and the net assimilation rate. At 120 days, the photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration and internal CO₂ concentration were evaluated. Significant interactions between the different factors were found for all the variables evaluated. The *Glomus cubense* and *Rhizophagus intraradices* strains, in the substrate made up of 20 % cocoa husk + 60 % coconut fiber + 20 % sawdust, produced significant increases in the growth and photosynthetic development of *S. mahagoni*. The importance of the mycorrhizal association is evident, as it provides *S. mahagoni* seedlings with more efficient photosynthetic mechanisms, improving their establishment in plantations.

Keywords: growth indices, gas exchange, mycorrhizal symbiosis, substrate, nursery.

RESUMEN

La inoculación con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) ha permitido un desarrollo y crecimiento controlado en diferentes especies; sin embargo, no se ha evaluado su efecto en algunas especies tropicales como *Swietenia mahagoni*. El estudio evaluó el crecimiento y desarrollo fotosintético de *S. mahagoni* producida en sustratos inoculados con HMA. Con un diseño completamente al azar, se evaluaron las combinaciones de dos factores: sustrato (cascarilla de cacao + fibra de coco + aserrín de pino compostado en proporciones 6:2:2 y 2:6:2, y un testigo compuesto por suelo + cascarilla de cacao en proporción 9:1) y cepas micorrízicas (*Glomus cubense*, *Rhizoglyphus irregularis* y *Funneliformis mosseae*). Desde los 30 hasta los 120 días después la germinación de la semilla en vivero, se evaluó la superficie foliar y la masa seca total, con las cuales se efectuó el análisis del crecimiento a través de la tasa relativa de crecimiento y la tasa de asimilación neta. A los 120 días se evaluó la tasa fotosintética, conductancia estomática, transpiración y concentración interna de CO₂. Se encontraron interacciones significativas entre los factores para todas las variables evaluadas. Las cepas *Glomus cubense* y *Rhizophagus intraradices*, en el sustrato conformado por 20 % de cascarilla de cacao + 60 % de fibra de coco + 20 % de aserrín, propiciaron incrementos significativos en el crecimiento y desarrollo fotosintético de *S. mahagoni*. Es evidente la importancia de la asociación micorrízica para que las plántulas de *S. mahagoni* mantengan un mecanismo fotosintético más eficiente que les permita mejor establecimiento en plantaciones.

Palabras clave: índices de crecimiento, intercambio gaseoso, simbiosis micorrízica, sustrato, vivero.

INTRODUCCIÓN

La implementación de viveros tecnificados, donde se emplean contenedores plásticos plantea la necesidad de caracterizar el crecimiento de las especies forestales en este tipo de envase y sustituir el suelo como sustrato, por combinaciones de compuestos orgánicos que, además de garantizar un buen desarrollo de las plántulas por su aporte de nutrientes y estructura física, permita un manejo adecuado en el vivero, sobre todo, en el momento del destubado (Cobas *et al.* 2020).

Lo anterior ha motivado la investigación sobre sustratos alternativos, como la cascarilla de cacao. Se ha encontrado que las características de sustratos compuestos por materiales disponibles localmente como cascarilla de cacao y fibra de coco cumplen con los estándares para producir plantas en contenedor (Díaz *et al.* 2013, Sandoval *et al.* 2013). En sustratos a base de cascarilla de cacao y fibra de coco se han obtenido plántulas de calidad de *Swietenia macrophylla* King., *Cedrela odorata* L. y *Caesalpineia violacea* (Mill.) Standl (Díaz *et al.* 2013 y Céspedes *et al.* 2020).

Además de la elección adecuada del sustrato, una alternativa para obtener cantidad, calidad y mayor crecimiento de las plántulas es el uso de hongos micorrízicos arbusculares (HMA), cuya inoculación es particularmente apropiada en condiciones de vivero (Falcón *et al.* 2020). Estos permiten a la planta ampliar la exploración del sustrato a través del micelio y transportar nutrientes a la raíz, así como incrementar la superficie de absorción de las plántulas, incluyendo los de baja movilidad en el suelo (Oliveira Júnior *et al.* 2019).

En el presente estudio se utilizó la combinación de sustratos orgánicos y HMA los cuales constituyen alternativas factibles para la nutrición de las plantas en vivero (Brundrett y Tedersoo 2018, Valenzuela 2019). En otros estudios en los que utilizan sustratos alternativos como son la cascarilla de cacao y la fibra de coco, aplicaron también HMA y han obtenido planta de calidad de *Tabebuia donnell-smithii* Rose y *Caesalpineia violacea* (Mill.) Standl (Aguirre *et al.* 2019, Céspedes *et al.* 2020).

No obstante, existe falta de información sobre el uso combinado de sustratos y HMA en especies tropicales, específicamente en *Swietenia mahagoni* L. Jacq. (caoba

de Cuba), especie autóctona usada como modelo en la reforestación de zonas degradadas en Cuba por sus características tales como: heliófila facultativa, estabilizadora, colonizadora de diferentes etapas sucesionales, tolerante a la competencia y a pH relativamente alto (Ricardo *et al.* 2016), además aporta grandes beneficios económicos para la industria maderable, siendo muy apreciable para ebanistería y toda clase de obra que requiera madera de alta calidad (Betancourt 1999).

Con base a lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de diferentes sustratos inoculados con HMA sobre el crecimiento y desarrollo fotosintético de la especie *S. mahagoni*, para obtener plantas de calidad superior en viveros de contenedores que se adapten mejor a los sitios de plantación.

MÉTODOS

El experimento se estableció entre enero y abril de 2020, en el vivero experimental del Centro de Estudio de Tecnologías Agropecuarias y Forestales, Universidad de Guantánamo, ubicado en el municipio El Salvador, Cuba (20° 12' 21'' N, 75° 13' 37'' O). El clima presenta una marcada estacionalidad seca de noviembre a marzo; y lluvias desde abril hasta junio y septiembre hasta octubre. Este sitio posee una precipitación y temperatura media anual de 1.028 mm y 25,9 °C respectivamente, según información del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET 2020).

Según la Norma Cubana NC: 71-04/87, las semillas de *S. mahagoni* se obtuvieron de la nave semillera de la Empresa Agroforestal Guantánamo, Cuba (20° 11' 44'' N, 75° 08' 38'' O), certificadas en el Instituto de Investigaciones Agroforestales de Baracoa. La siembra se realizó en contenedores plásticos con un volumen de 200 cm³. Se utilizó como sustrato la mezcla de cascarilla de cacao, fibra de coco y aserrín de *Pinus cubensis* Griseb. en proporción 2:6:2 (S1) y 6:2:2 (S2), esterilizado a 120 °C durante 15 minutos en autoclave por tres ocasiones. Algunas de las propiedades químicas y físicas de los sustratos y sus intervalos óptimos sugeridos por Abad *et al.* (2005) se presentan en el cuadro 1, los que se encuentran entre los valores óptimos, no así para el sustrato dos en el que el fósforo se encuentra por debajo del intervalo recomendable.

Cuadro 1. Análisis químico-físico de los sustratos utilizado en el experimento.

Physio-chemical analysis of the substrate used in the experiment.

Sustrato	Propiedades químicas y físicas								
	pH	MO (%)	N (%)	P (%)	K ⁺ (%)	CE (dS m ⁻¹)	DA (g mL ⁻¹)	PT (%)	RH (%)
S1	6,20	77,20	1,86	1,43	1,79	3,13	0,38	82,02	65,49
S2	7,70	66,66	1,40	0,10	1,19	2,27	0,31	76,16	70,76
Valores óptimos	5,3 - 6,5	> 50	> 1,3	> 0,7	> 0,2	< 3,5	0,2 - 0,4	75 - 85	> 50

En el momento de la siembra, las semillas se inocularon por el método de recubrimiento (Aguirre-Medina, 2018) con las cepas de inóculos micorrízicos certificados: *Funneliformis mosseae* (Schüßler y Walker 2011); *Glomus cubense* (Rodríguez *et al.* 2011) y *Rhizogloium irregulare* (Schüßler y Walker 2011) con una calidad mínima garantizada de 30 esporas g⁻¹ de inoculante, procedentes del cepario del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Cuba. El riego fue manual, inicialmente dos veces al día hasta los 50 días, posteriormente se disminuyó la frecuencia de riego a uno diario y finalmente cada dos días.

Evaluación del crecimiento. Las evaluaciones fueron realizadas desde los 30 hasta los 120 días después la germinación de la semilla, con intervalos de diez días, para un total de diez evaluaciones durante el ciclo. Se evaluaron siete plantas por tratamiento. Las variables evaluadas fueron la masa seca total (g), determinada a partir de la masa seca de los diferentes órganos (raíz, tallo y hojas), los cuales fueron secados en una estufa de aire forzado (Binder) a 70 °C durante 72 h, y su pesaje en una balanza analítica (Sartorius CPA324); y la superficie foliar total (cm²), calculada a partir de la sumatoria del valor de superficie foliar correspondiente a todas las hojas de cada planta, mediante el medidor portátil de área foliar LI-3000A (Li-Cor®).

A partir de la masa seca total y la superficie foliar, se efectuó el análisis del crecimiento a través de la evaluación de la tasa de crecimiento relativo (TCR en g g⁻¹ día⁻¹) y la tasa de asimilación neta (TAN en mg cm⁻² día⁻¹) sugeridas por Hunt *et al.* (2017). Estas se estimaron mediante las ecuaciones 1 y 2:

$$TCR(gg^{-1}dia^{-1}) = \frac{\ln MST_2 - \ln MST_1}{T_2 - T_1} \quad [1]$$

$$TAN(gcm^{-2}dia^{-1}) = (MST|_2 - MST_1) \frac{(\ln SF|_2 - \ln SF_1)}{(SF|_2 - SF_1)(T|_2 - T_1)} \quad [2]$$

Dónde: MST = masa seca total; SF = superficie foliar de la planta; T = tiempo. En los casos 1 y 2 se refiere a la evaluación inicial y final con un lapso entre ellas de 90 días

Evaluación de variables de intercambio gaseoso. A los 120 días después de la siembra se midió tasa fotosintética (μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), conductancia estomática (μmol cm⁻² s⁻¹), transpiración (μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) y concentración interna de CO₂ (ppm) en una hoja madura completamente expandida de cada planta, con el medidor portátil de gases infrarrojo Q-Box CO650. Las evaluaciones se comenzaron a las 7:30 am. Durante las mediciones, se mantuvieron constantes los parámetros de radiación fotosintéticamente activa (1.200 μmol fotones m⁻² s⁻¹), temperatura (29 °C) y concentración de CO₂ (400 ppm). Cada medición tuvo un tiempo de duración entre tres y cinco min, dependiendo de la estabilidad de las variables evaluadas.

Diseño experimental y análisis estadístico. Se utilizó un diseño completamente al azar, con arreglo bifactorial. Los factores fueron: A) cepas de HMA y B) sustratos. Adicionalmente se empleó un testigo compuesto por 90 % de suelo agrícola + 10 % de cascarilla de cacao, para un total de nueve tratamientos. Cada tratamiento estuvo formado por cuatro repeticiones de 30 plantas cada una, obteniendo un total de 120 individuos por tratamiento y 1.080 plantas en todo el experimento (cuadro 2).

Para comparar los efectos de los factores y sus interacciones en los indicadores morfológicos y fisiológicos de calidad, se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) considerando el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas según las pruebas Kolmogorov Smirnov y de Levene, respectivamente. Los efectos se consideraron estadísticamente significativos cuando el valor de *P* < 0,05. Cuando los efectos resultaron significativos, las diferencias estadísticas entre medias se identificaron mediante la prueba de diferencia significativa honesta (DSH)

Cuadro 2. Identificación de los tratamientos.

Identification of treatments.

Tratamiento	Cepas de HMA	Sustrato	Composición del sustrato (%)
T1	-	S1	60Cc + 20Fc + 20As
T2	-	S2	20Cc + 60Fc + 20As
T3	<i>Glomus cubense</i>	S1	60Cc + 20Fc + 20As
T4	<i>Glomus cubense</i>	S2	20Cc + 60Fc + 20As
T5	<i>Rhizogloium irregulare</i>	S1	60Cc + 20Fc + 20As
T6	<i>Rhizogloium irregulare</i>	S2	20Cc + 60Fc + 20As
T7	<i>Funneliformis mosseae</i>	S1	60Cc + 20Fc + 20As
T8	<i>Funneliformis mosseae</i>	S2	20Cc + 60Fc + 20As
T9	-	Testigo	90Sa + 10Cc

Sa: suelo agrícola, Cc: cascarilla de cacao, Fc: fibra de coco, As: aserrín.

de Tukey ($\alpha = 0,05$). El análisis estadístico de los datos se hizo con el software SPSS versión 23 para Windows.

RESULTADOS

El análisis de varianza mostró efectos significativos para todos los parámetros morfo-fisiológicos evaluados (cuadro 3), la interacción entre los factores sustratos y cepas de HMA utilizados fue altamente significativa ($P \leq 0,001$) en todos los parámetros evaluados.

Dinámica de crecimiento de la superficie foliar y masa seca total. Los resultados obtenidos muestran tanto para la superficie foliar como la masa seca total, una tendencia ascendente, mostrando hasta los 50 días un incremento no muy pronunciado, y a partir de esta fecha, el crecimiento fue de tendencia exponencial, para todos los tratamientos evaluados. Finalmente se observa una fase de estancamiento del crecimiento, caracterizada por una velocidad decreciente del crecimiento (> 100 días) (figura 1A y B).

Cuadro 3. Análisis de varianza para los parámetros morfo-fisiológicos de la planta *S. mahagoni* cultivada en vivero.
 Analysis of variance for the morphophysiological parameters of the *S. mahagoni* plant grown in a nursery

Factor de variación	Valor P ($\alpha = 0,05$)								
	GL	SF	MST	TAN	TCR	A	gs	E	Ci
Sustrato (S)	1	0,045*	0,031*	0,042*	0,043*	0,001**	0,001**	0,043*	0,033*
Micorriza (M)	3	0,001**	0,001**	0,001**	0,001**	0,001**	0,001**	0,001**	0,001**
S x M	3	< 0,001***	< 0,001***	< 0,001***	0,001**	< 0,001***	< 0,001***	< 0,001***	0,001**

GL = grado de libertad, SF = superficie foliar (cm^2), MST = masa seca total (g), TAN = tasa de asimilación neta ($\text{g cm}^{-2} \text{día}^{-1}$), TCR = tasa de crecimiento relativo ($\text{g g}^{-1} \text{día}^{-1}$), A = tasa fotosintética ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), gs = conductancia estomática ($\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$), E = transpiración ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), Ci = concentración interna de CO_2 (ppm). *, **, ***: significativos a los niveles de 0,05, 0,01 y 0,001.

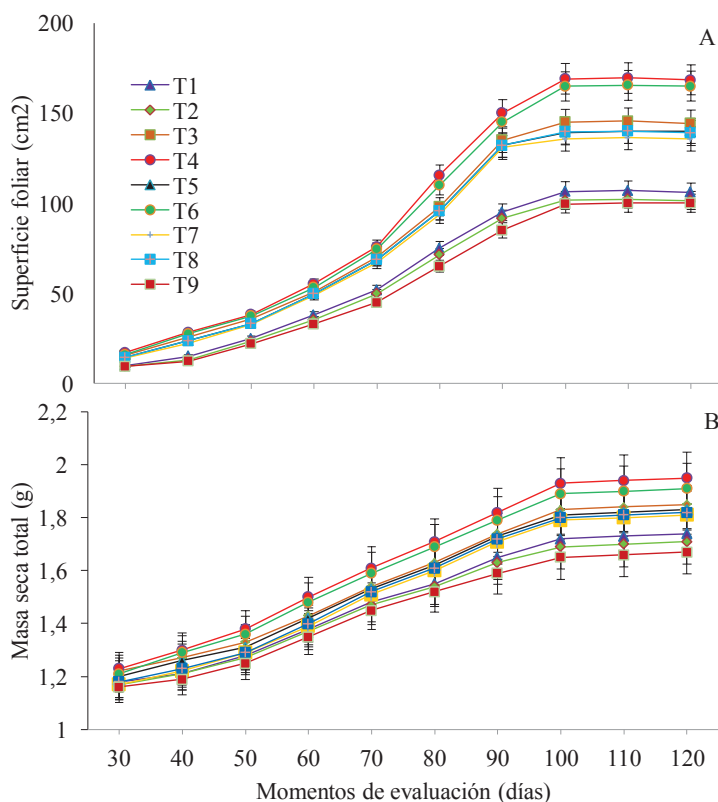


Figura 1. Dinámica de la superficie foliar (A) y la masa seca total (B) de *S. mahagoni* en diferentes tratamientos. Las barras encima de los valores medio significan el intervalo de confianza de las medias.

Dynamic of the leaf surface (A) and the total dry mass (B) of *S. mahagoni* in different treatments. The bars above the mean values represent the confidence interval of the means.

La dinámica de la superficie foliar mostró que desde los 30 días después de la siembra (dds), la inoculación con las cepas *G. cubense*, *R. irregulare* y *F. mosseae* ocasionaron valores superiores a los tratamientos no micorrizados y al testigo, lo que permite suponer que la simbiosis se estableció en los primeros días después de la germinación de las semillas. Con los valores más altos asociados a esta variable se encontraron los tratamientos representados por las cepas *G. cubense* y *R. irregulare* en el sustrato dos conformado por 20 % de cascarilla de cacao + 60 % de fibra de coco + 20 % de aserrín (T4 y T6), cuyos aumentos fueron del 56 y 53 %, respectivamente, con respecto al testigo (T9) (figura 1A).

La dinámica de la masa seca total mostró la misma tendencia que la superficie foliar. *G. cubense* y *R. irregulare* en el sustrato conformado por 20 % de cascarilla de cacao + 60 % de fibra de coco + 20 % de aserrín, generaron los mayores valores desde los 30 dds hasta los 100 días, fecha en que alcanzó su máximo valor (1,95 g). Las diferencias encontradas para los tratamientos superiores (T4 y T6) presentan aumentos en la biomasa del 14,35 y 12,56 %, respectivamente, con respecto al testigo (T9) (figura 1B).

Análisis del crecimiento. La inoculación favoreció significativamente la biomasa foliar a los 90 días, ya que las plántulas inoculadas con las cepas *G. cubense* y *R. irregulare*

en el sustrato dos conformado por 20 % de cascarilla de cacao + 60 % de fibra de coco + 20 % de aserrín (T4 y T6) incrementaron significativamente la tasa de crecimiento relativo y la tasa de asimilación neta (figura 2A y B).

Las plántulas obtenidas con las cepas *G. cubense* y *R. irregulare* en el sustrato dos (T4 y T6) presentaron los valores más altos de la tasa de crecimiento relativo, fundamentalmente entre los 40 y 90 días (figura 2A), esto significa que, en esta etapa de desarrollo las plantas de estos tratamientos fueron eficientes en la elaboración de nuevo material.

En relación a la tasa de asimilación neta (figura 2B), que se puede considerar un estimador de la actividad fotosintética, fue creciente en los primeros 90 días después de la siembra, fecha en que alcanzó el máximo valor con la cepa *G. cubense* en el sustrato conformado por 20 % de cascarilla de cacao + 60 % de fibra de coco + 20 % de aserrín (0,019 g cm⁻² día⁻¹). Después de 90 días, la tasa de asimilación neta decreció en todos los tratamientos atribuible a la senescencia foliar (cuadro 4).

Intercambio gaseoso. En relación a la fotosíntesis, la conductancia estomática y transpiración, estas fueron significativamente mayores en los tratamientos micorrizados, dependientemente del sustrato utilizado (figura 3A, B y C).

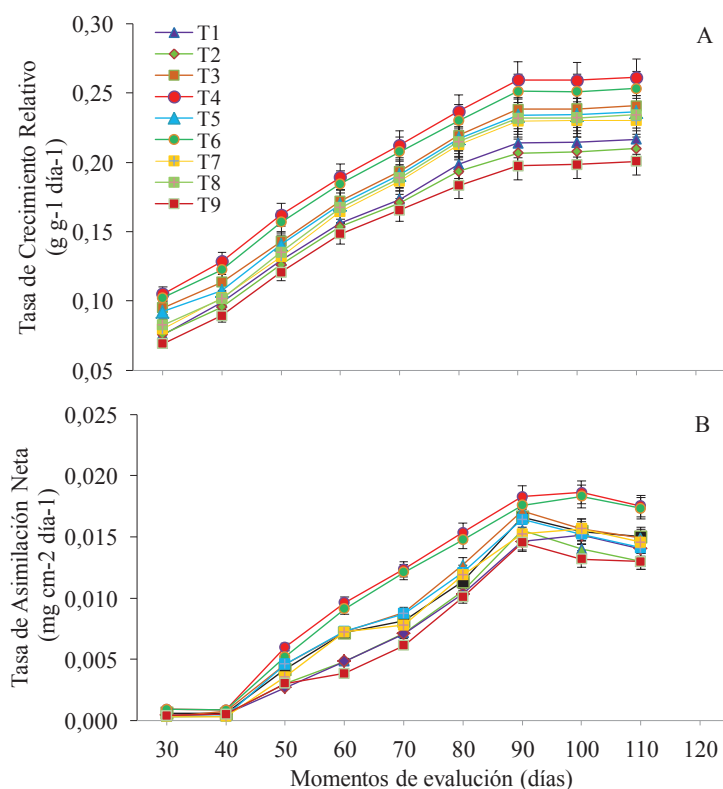


Figura 2. Dinámica de la Tasa de Crecimiento Relativo (A) y la Tasa de Asimilación Neta (B) de *S. mahagoni* en diferentes tratamientos. Las barras encima de los valores medio significan el intervalo de confianza de las medias.

Dynamic of the Relative Growth Rate (A) and Net Assimilation Rate (B) of *S. mahagoni* in different treatments. The bars above the mean values represent the confidence interval of the means.

Cuadro 4. Tasa de Crecimiento Relativo y Tasa de Asimilación Neta (B) de *S. mahagoni* en diferentes tratamientos.

Relative Growth Rate (A) and Net Assimilation Rate (B) of *S. mahagoni* in different treatments.

Tratamiento	Tasa de Crecimiento Relativo (g g ⁻¹ día ⁻¹)			Tasa de Asimilación Neta (mg cm ⁻² día ⁻¹)			
	Momentos de evaluación (días)						
	60	90	120	60	90	120	
T1	S1	0,15 ^c	0,21 ^d	0,23 ^c	0,005 ^c	0,015 ^c	0,013 ^c
T2	S2	0,14 ^c	0,21 ^d	0,22 ^c	0,005 ^c	0,015 ^c	0,012 ^c
T3	S1 + <i>G. cubense</i>	0,17 ^b	0,24 ^{bc}	0,25 ^b	0,007 ^b	0,017 ^b	0,015 ^b
T4	S2 + <i>G. cubense</i>	0,19 ^a	0,26 ^a	0,27 ^a	0,010 ^a	0,018 ^a	0,018 ^a
T5	S1 + <i>R. irregulare</i>	0,17 ^b	0,23 ^c	0,25 ^b	0,007 ^b	0,017 ^b	0,015 ^b
T6	S2 + <i>R. irregulare</i>	0,18 ^{ab}	0,25 ^{ab}	0,26 ^{ab}	0,009 ^a	0,018 ^a	0,017 ^a
T7	S1 + <i>F. mosseae</i>	0,16 ^b	0,23 ^c	0,24 ^b	0,007 ^b	0,017 ^b	0,014 ^b
T8	S2 + <i>F. mosseae</i>	0,17 ^b	0,23 ^c	0,24 ^b	0,007 ^b	0,016 ^b	0,015 ^b
T9	Testigo	0,14 ^c	0,20 ^d	0,21 ^c	0,004 ^c	0,015 ^c	0,013 ^c
ES (±) X		0,10	0,12	0,11	0,020	0,040	0,030

S1 = Cascarilla de cacao + Fibra de coco + Aserrín de pino en proporción 6:2:2; S2 = Cascarilla de cacao + Fibra de coco + Aserrín de pino compostados en proporción 2:6:2. ES = Error estándar. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0.05$).

Por el contrario, en la concentración interna de CO₂ las plantas no micorrizadas al igual que el testigo superaron a los tratamientos no inoculados (figura 3D). En plantas inoculadas la concentración fue menor debido a que presentaron mayor actividad fotosintética, lo que supone un mayor consumo de CO₂.

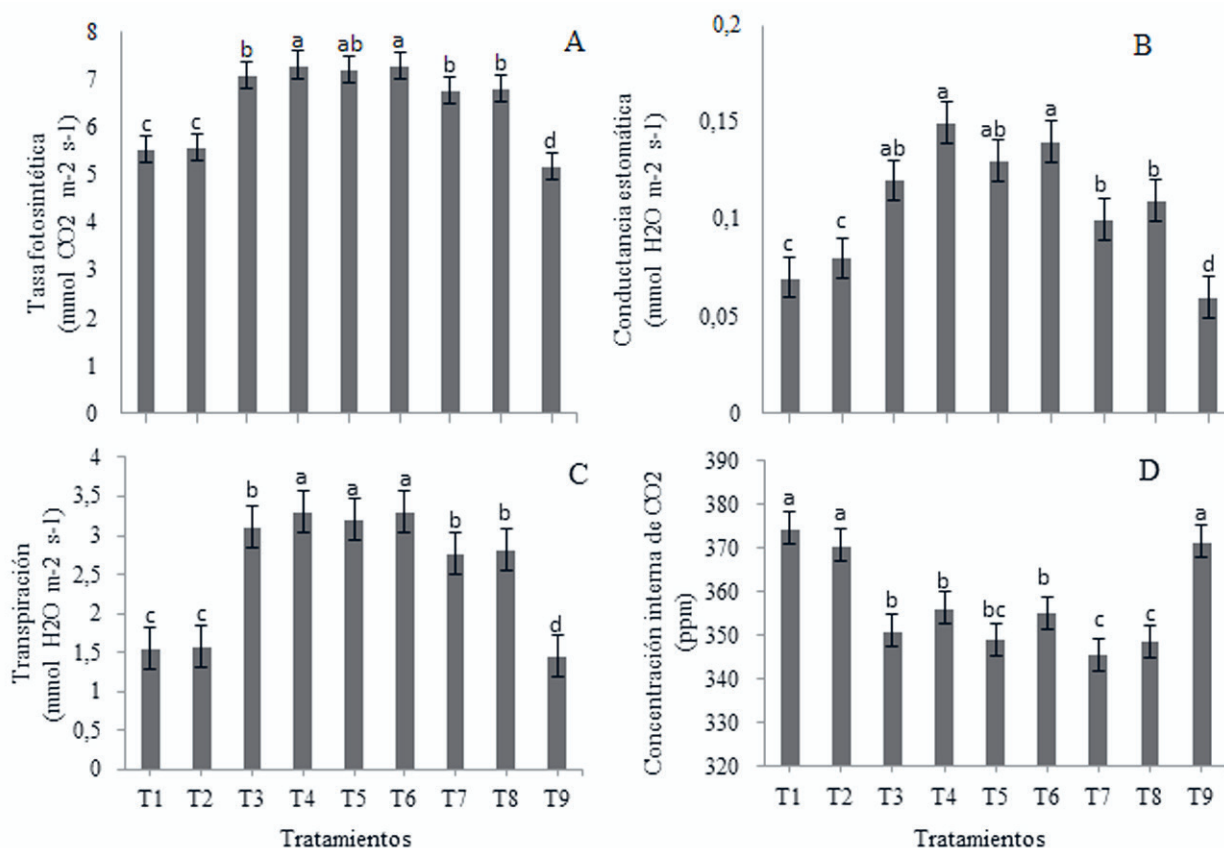
DISCUSIÓN

La presente investigación mostró que la inoculación con HMA favoreció el crecimiento de las plántulas de *S. mahagoni* desarrolladas en diferentes sustratos orgánicos. Este resultado concuerda con estudios previos sobre la inoculación de hongos micorrizógenos en especies forestales como *Tabebuia donnell-smithii*, *Acacia mangium*, *Gmelina arborea*, *Eucalyptus* sp. y *Pachira quinata* (Ramírez *et al.* 2018, Aguirre *et al.* 2019). De hecho, con *S. mahagoni* se ha demostrado el efecto de los HMA en el crecimiento, en términos de altura, diámetro, biomasa seca y área foliar, cultivada en el vivero del Centro de Estudio de Tecnología Agroforestal, Universidad de Guantánamo, Cuba (Falcón *et al.* 2021a). Los resultados indicaron que las cepas de hongos micorrizógenos utilizadas en el presente estudio tienen la capacidad de establecer relaciones simbióticas con *S. mahagoni* y son consistentes con estudios recientes sobre la micorrización de esta especie en etapa de vivero (Falcón *et al.* 2020, Falcón *et al.* 2021b). Además, muestran que la especie arbórea y su simbionte son capaces de desarrollarse en sustratos contrastantes, uno de los cuales, el sustrato S2, se aleja del valor óptimo en términos de parámetros quí-

micos como el contenido de fósforo (0,10 %), fundamental para que la relación simbiótica sea efectiva (Brito *et al.* 2017). Ramírez *et al.* (2018) señalan que la actividad y el beneficio de la simbiosis son más visibles cuando estos se encuentran en suelos deficientes en fósforo. En esta condición, plantas de *Swietenia macrophylla* inoculadas con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) presentaron mayores tasas de crecimiento, obtenidas en una casa de cultivo en la Universidad Agrícola de Kerala, India (Rajan *et al.* 2020).

De manera general, los sustratos evaluados (S1 y S2) resultaron superiores al testigo de producción, donde el suelo es utilizado en mayor proporción, el cual resultó la de menor respuesta entre los sustratos evaluados para esta etapa o fase de desarrollo del cultivo, por lo que se recomienda su utilización solo en el caso de no contar con otros materiales complementarios, ya que Valenzuela (2019) explica que el uso de tierra en la producción de plántulas en contenedores con volúmenes pequeños, puede presentar problemas fitosanitarios y mal desarrollo radical.

Al evaluar el efecto de la inoculación en la dinámica de crecimiento de la superficie foliar (figura 1A) y la masa seca total (figura 1B) se aprecia una clara variación entre los diferentes tratamientos. Estas curvas demuestran que para el tipo de envase (tubetes de 200 cm³) en los que crecieron las plantas, pudieran permanecer en vivero hasta un máximo de 120 días, ya que para los 100 días comienzan a estabilizarse los incrementos, lo que pudiera estar indicando menos disponibilidad de nutrientes y espacio para continuar su desarrollo. Resultados similares obtuvieron Arteaga *et al.* (2014), quienes encontraron el mismo pa-



Figuras 3. Parámetros fisiológicos evaluados en *S. mahagoni* a los 120 días después de la siembra. A) Tasa fotosintética; B) Conductancia estomática; C) Transpiración y D) Concentración interna de CO₂. Columnas con la misma letra son estadísticamente iguales entre sí (Tukey, $P \leq 0,05$).

Physiological parameters evaluated in *S. mahagoni* up to 120 days after the sowing. A) Photosynthetic rate; B) Stomata conductance; C) Transpiration and D) Internal concentration of CO₂. Columns with the same letter are statistically equal to each other (Tukey, $P \leq 0.05$).

trón de crecimiento para la especie *Talipariti elatum* (Sw.) Fryxell cultivada en vivero, con mayores incrementos a partir de los 50 días y para los 77 días comienzan a estabilizarse los incrementos, como consecuencia de la menor disponibilidad de nutrientes en el sustrato.

Se observó que con las cepas *G. cubense* y *R. irregularis* en el sustrato dos conformado por 20 % de cascarilla de cacao + 60 % de fibra de coco + 20 % de aserrín (T4 y T6), la dinámica de crecimiento de las plantas es mejor (figura 1A y B). Lo que permite afirmar que el comportamiento de la especie *S. mahagoni* responde positivamente a la aplicación de HMA. Estos resultados están en correspondencia con lo reportado por Andrade *et al.* (2019), quienes obtuvieron mayor comportamiento del área foliar e incremento de la biomasa de las plantas de *Schizolobium amazonicum* (Huber ex Ducke) cuando fueron inoculadas con HMA, además sugieren que independientemente de las concentraciones del sustrato, los hongos micorrízicos son capaces de facilitar el crecimiento vegetal.

El comportamiento de la dinámica de crecimiento de la especie resultó similar a lo informado por Falcón *et al.*

(2018), en relación a la utilización del inóculo micorrízico *G. cubense* en condiciones de vivero. Lo anterior puede deberse a que las plántulas de *S. mahagoni* tienden a asociarse más con la cepa *G. cubense* que con el resto de las cepas empleadas en el trabajo. No obstante, Salgado *et al.* (2019) encontraron respuesta positiva es esta misma especie cuando fue asociada con el hongo *Rhizophagus intraradices* (Schenck & Sm.) Walker & Schüßler en un suelo pardo sialítico carbonatado de la provincia de Guanátamo, Cuba.

Estos resultados están en correspondencia con lo citado por Aguirre *et al.* (2019), quienes destacaron los beneficios que proporcionan hongos endomicorrízicos, al promover el crecimiento vegetal de *Tabebuia donnell-smithii* con aumento en la asignación de materia seca, crecimiento vegetal de tallo y área foliar. También Ramírez *et al.* (2018) obtuvieron muy buenas repuestas al inocular plantas de *Acacia mangium* Willd, con cuatro hongos micorrízicos: *Entrophospora* sp., *Acaulospora* sp., *Gigaspora* sp. y *Glomus* sp. en etapa de vivero, donde a los 120 días, existió un efecto altamente significativo sobre la altura y el grosor del tallo.

Con respecto a la tasa de crecimiento relativo y la tasa de asimilación neta, estos fueron significativamente mayores en los tratamientos micorrizados, independientemente del sustrato utilizado (figura 2A y B). Se destaca que el máximo valor de la tasa de crecimiento relativo alcanzado por el testigo ($0,20 \text{ g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$) nunca supera el valor mínimo de los tratamientos micorrizados ($0,23 \text{ g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$) en el período evaluado. Esta variable corrobora que al aplicar inóculos micorrízicos se pueden obtener plántulas que se desarrollen en menor tiempo, con una ganancia de más de $0,24 \text{ g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$ de biomasa seca total superior a la del testigo que solo alcanzó, a los 120 días, $0,18 \text{ g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$.

La estimulación de la tasa de crecimiento relativa y la tasa de asimilación neta por los HMA estuvo directamente relacionada con la tasa fotosintética, la cual fue significativamente mayor en plantas micorrizadas (cuadro 4). La inoculación con HMA propició un incremento de 33,33 % en la fijación de CO_2 , con respecto al testigo a los 120 días, donde se obtuvieron los máximos valores. He *et al.* (2017) indicaron que la inoculación de HMA mejora la tasa de crecimiento relativo, y en consecuencia, mayor desarrollo de las plantas, lo que representa mayor producción de biomasa vegetal en peso por unidad de tiempo, como resultado de la elongación celular y asimilación del carbono por fotosíntesis.

En relación a la tasa fotosintética, conductancia estomática y transpiración, estas fueron significativamente mayores en los tratamientos micorrizados, dependientemente del sustrato utilizado (figura 3A, B y C). Con respecto a la concentración interna de CO_2 , las plantas no micorrizadas superaron a los tratamientos inoculados (figura 3D), al respecto, Madhana *et al.* (2014) mencionan que el CO_2 que se localiza en los espacios sub-estomáticos se halla en espera de ser asimilado, es decir, el carbono se encuentra acumulado, ya que no ha sido utilizado en la fotosíntesis. Por lo tanto, una tasa de asimilación elevada junto con una baja concentración del carbono intercelular indica que las plantas inoculadas en interacción con sustratos orgánicos mantienen un mecanismo fotosintético saludable y más eficiente que las plantas sometidas al resto de los tratamientos.

La inoculación de HMA puede mejorar la tasa fotosintética, el crecimiento y el desarrollo de las plantas (Ruscitti *et al.* 2019). Estudios previos en especies forestales tropicales han demostrado que la actividad fotosintética aumentada de las plantas con HMA podría deberse a factores no estomáticos como un mayor contenido de clorofila y de actividad de rubisco (Uc-Ku *et al.* 2019). Por su parte, Rajan *et al.* (2020) señalaron que los HMA inoculados en *S. macrophylla* no solo incrementaron la tasa fotosintética, sino que también originaron una mayor transpiración y conductancia estomática, lo que es benéfico para el crecimiento de los cultivos y posterior desarrollo en el campo.

Según Augé *et al.* (2016), los HMA modifican a menudo el intercambio gaseoso de la planta. La fotosíntesis, conductancia estomática y transpiración son a menudo

más altas en las plantas con HMA respecto a la no micorrizadas. En este estudio se encontró que a los 120 días, la tasa fotosintética en los tratamientos micorrizados fue significativamente mayor que en los no micorrizados. Un comportamiento similar observó Rajan *et al.* (2020) en plantas de *S. macrophylla*, cultivadas en el vivero forestal de la Universidad Agrícola de Kerala, India, donde se inoculó la especie con hongos micorrízicos, el cual mejora la supervivencia y crecimiento de las plantaciones, al proveer de buenas condiciones iniciales a las plántulas.

Los HMA son capaces de modificar el intercambio gaseoso e inducir mayor tasa fotosintética en sus hospederos, haciendo más eficiente la actividad de la enzima rubisco para captar CO_2 , como lo mencionaron Madhana *et al.* (2014) y Ruscitti *et al.* (2019). Este efecto permite a la planta sintetizar compuestos de carbono altamente energéticos que influyen no solo en el crecimiento de las plantas, sino también en satisfacer los requerimientos de los hongos. Por su parte, Uc-Ku *et al.* (2019) señalaron el beneficio de los HMA en la fotosíntesis y su relación con el aumento del contenido de clorofila en hojas.

CONCLUSIONES

El sustrato S2 conformado por 20 % cascarilla de cacao + 60 % de fibra de coco + 20 % de aserrín de pino inoculado con las cepas *Glomus cubense* y *Rhizophagus irregularis* mejoró el crecimiento y la calidad fisiológica de *S. mahagoni* cultivada en vivero, lo cual puede favorecer el establecimiento y el desempeño de las plantas en campo. La inoculación de sustratos orgánicos con HMA, demuestran ser alternativas viables de implementar en la producción de plantas forestales como *S. mahagoni*, una de las especies autóctonas utilizadas en los programas de reforestación y restauración de suelos en Cuba.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al personal del Centro de Estudios de Tecnologías Agropecuarias y Forestales de la Universidad de Guantánamo por su apoyo en las diversas etapas de esta investigación. Además, a las personas revisoras anónimas y la revista por sus valiosos aportes para mejorar el presente artículo.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

EFO y MCL diseñaron el estudio y el análisis experimental, EFO y ORL realizaron la toma de datos en terreno y análisis de los resultados, EFO y MBV contribuyeron con la discusión e interpretación de los resultados.

FINANCIAMIENTO

El estudio no contó con financiamiento interno/externo.

REFERENCIAS

- Abad M, F Fornes, C Garrión, V Noguera. 2005. Physical properties of various coconut coir dusts compared to peat. *Horticultural Science* 40(7): 2138-2144. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.40.7.2138>
- Aguirre JF, L Yeekón, S Espinosa. 2019. Influencia de hongos endomicorrízicos en el crecimiento de (*Tabebuia donnell-smithii* Rose). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 6(16): 11-21. DOI: <https://doi.org/10.19136/era.a6n16.1538>
- Aguirre-Medina J. 2018. Biofertilizantes a base de micorriza arbuscular y su aplicación en la agricultura. *Agro Productividad* 4(1). Consultado 4 jul. 2023. Disponible en <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/571>
- Andrade AVN, J Santos, JP Silva, TF Rodrigues, YM Wolfart, WA Silva. 2019. Growth of *Schizolobium amazonicum* (Huber ex Ducke) seedlings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi. *Revista Floresta* 49(4): 651-660. DOI: <http://doi.org/10.5380/RF.v49i4.57186>
- Arteaga Y, G Geada, M Alonso, Y García, IC Castillo, R Carballo. 2014. Evaluación del aporte nutricional de diferentes sustratos a plantas de *Talipariti elatum* cultivada en tubetes. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 10(1): 1-8. Consultado 12 jun. 2022. Disponible en <https://revista.itsn.edu.mx/index.php/rln/article/view/226>
- Augé RM, HD Toler, AM Saxton. 2016. Mycorrhizal stimulation of leaf gas exchange in relation to root colonization, shoot size, leaf phosphorus and nitrogen: a quantitative analysis of the literature using meta-regression. *Frontiers in Plant Science* 7: 1084. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01084>
- Betancourt A. 1999. Silvicultura especial de árboles maderables tropicales. La Habana, Cuba. Científico-Técnica. 264 p.
- Brundrett MC, L Tedersoo. 2018. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*, 220(4): 1108-1115. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.14976>
- Brito VN, FRF Tellechea, LC Heitor, MSM Freitas, MA Martins. 2017. Fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada na produção de mudas de paricá. *Ciência Florestal* 27(2): 485-497. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509827730>
- Cobas M, R Sotolongo, Y Almora. 2020. Comportamiento de los parámetros morfológicos de calidad de la planta de *Lysiloma sabicú* Benth. in vivero sobre sustratos orgánicos. *Revista Cubana de Ciencias Forestales* 8(3): 550-561. Consultado 11 may. 2022. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2310-34692020000300550&script=sci_abstract&tlng=pt
- Céspedes G, M Cobas, E Falcón. 2020. Efectos de diferentes sustratos orgánicos en la producción de plántulas de *Caesalpinia violacea* en tubetes. *Revista Hombre, Ciencia y Tecnología* 24:1-9. Consultado 7 abr. 2021. Disponible en <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/441/4411976003/index.html>
- Díaz P, D Torres, Z Sanchez, L Arevalo. 2013. Comportamiento morfológico de cedro (*Cedrela odorata*) y caoba (*Swietenia macrophylla*) en respuesta al tipo de sustrato en vivero. *Revista Folia Amazónica*, 22(1-2): 25-33. DOI: <https://doi.org/10.24841/fa.v22i1-2.45>
- Falcón E, M Cobas, M Bonilla, O Rodríguez, CV Romero. 2018. Aplicación combinada de EcoMic® y Fitomas-E® en la calidad de la planta *Swietenia mahagoni* L. Jacq. *Revista Forestal Baracoa* 37(Número especial): 1-10. Consultado 12 may. 2021. Disponible en <http://www.inaf.co.cu/revistas/revista-forestal-baracoa>
- Falcón E, M Cobas, M Bonilla. 2020. Influencia de hongos micorrizógenos arbusculares en el crecimiento y nutrición de *Swietenia mahagoni* L. Jacq. *Revista Hombre, Ciencia y Tecnología* 24(Número especial): 25-32. Consultado 20 abr. 2021. Disponible en <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/441/4411976004/html/>
- Falcón E, M Cobas, M Bonilla, O Rodríguez, CV Romero, E Rodríguez. 2021a. Calidad de plántulas de *Swietenia mahagoni* L. Jacq. producida en sustratos inoculados con hongo micorrizico arbuscular. *Revista de Ciencias Ambientales* 55(2): 311-225. DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.15>
- Falcón E, M Cobas, M Bonilla, O Rodríguez. 2021b. Efecto del sustrato y la micorriza arbuscular en el sistema radical y estado nutricional de *Swietenia mahagoni* L. Jacq. *Revista Cubana de Ciencias Forestales* 9(3): 395-411. Consultado 15 mar. 2022. Disponible en <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/705>
- He L, C Li, R Liu. 2017. Indirect interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and *Spodoptera exigua* alter photosynthesis and plant endogenous hormones. *Mycorrhiza* 27(6): 525-535. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00572-017-0771-2>
- Hunt R. 2017. Growth analysis, individual plants. In: Thomas B, BG Murray, DJ Murphy eds. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*. Oxford, United Kingdom. Academic Press. p. 421-429. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00226-4>
- INSMET (Instituto de Meteorología de Cuba, CU). 2020. Centro Meteorológico Provincial de Guantánamo: Temperatura del aire y precipitación durante 2008-2020. Consultado 17 may. 2020. Disponible en <http://www.guantanamo.gob.cu/es/centro-meteorologico-provincial-guantanamo>
- Madhana SK, RV Sreeharsha, SA Mudalkar, R Ramachandra. 2014. Persistent stimulation of photosynthesis in short rotation coppice mulberry under elevated CO₂ atmosphere. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 137: 21-30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.05.001>
- Oliveira Júnior JQ, AC Rodrigues da Silva, PV Moreira da Silveira, EJ Conceição, MG Pereira. 2019. Effect of mycorrhizal inoculation and substrate composition on seedling growth of two Atlantic Forest Tree Species. *Floresta, Curitiba* 49(4): 623-632. DOI: <https://doi.org/10.5380/RF.v49i4.54525>
- Rajan LJ, AV Santhoshkumar, K Surendra, TK Kunhamu. 2020. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Inoculation as a Climate Adaptation Strategy for Establishment of *Swietenia macrophylla* King. seedlings. *Forests* 11(5):488. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11050488>
- Ramírez MM, AM Peñaranda, UA Pérez, DP Serralde. 2018. Biofertilización con hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) en especies forestales en vivero. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 16(2): 15-25. Consultado 5 jul. 2022. Disponible en <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotechnologia/article/view/1162>
- Ricardo NE, A Puentes, Y Torres. 2016. Relaciones entre las características morfológico-funcionales y ecológicas de especies autóctonas de meliáceas cubanas: estrategia para su empleo forestal. *Acta Botánica Cubana*, 215(1): 2-23.

- Consultado 18 feb. 2021. Disponible en <http://repositorio.geotech.cu/jspui/handle/1234/622>
- Rodríguez Y, Y Dalpé, S Séguin, K Fernández, F Fernández, RA Rivera. 2011. «*Glomus cubense* sp. nov., an arbuscular mycorrhizal fungus from Cuba». *Mycotaxon* 118(1): 337-347. DOI: <https://doi.org/10.5248/118.337>
- Ruscitti M, C Arango, S Garita, V Bernardo. 2019. Parámetros morfológicos y fisiológicos de plantas de pimiento inoculadas con *Funneliformis mosseae* en condiciones de hidroponía y con altas concentraciones de cobre. *Revista de la Facultad de Agronomía* 118(1): 85-95. DOI: <https://doi.org/10.24215/16699513e009>
- Salgado EJ, Y Rodríguez, E Falcón. 2019. Efecto de tres cepas de micorrizas en los parámetros morfológicos de *Swietenia mahagoni* (L.) Jacq en vivero permanente, Guantánamo, Cuba. *Revista Foresta Veracruzana* 21(2): 11-16. Consultado 15 may. 2020. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49762539007>
- Sandoval M, M Zapata, J Celis, C Quezada, J Capulín, A Solís. 2013. Efecto de la aplicación de fibra de coco (*Cocos nucifera* L.) en el almacenamiento y eficiencia del uso del agua en un Alfisol, sembrado con ballica (*Lolium multiflorum* L.) y en la toxicidad en lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Agro Sur*, 41(3): 1-11. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2013.v41n3-01>
- Schüßler A, C Walker. 2011. Evolution of the “Plant-Symbiotic” Fungal Phylum, Glomeromycota. In Pöggeler S y J Wöstemeyer eds. *Evolution of Fungi and Fungal-Like Organisms*. The Mycota, vol 14. Heidelberg, Berlin. Ed. Springer. p. 163-185. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-19974-5_7
- Uc-Ku AG, J Arreola, E Carrillo, MM Osnaya, A Alarcón, R Ferrera, C Landeros. 2019. Inoculación de hongos micorrizicos arbusculares en el cultivo de *Heliconia stricta*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10(5): 1057-1069. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i5.1608>
- Valenzuela O. 2019. El cultivo sin suelo y la sustentabilidad de las producciones intensivas. 1ra ed. San Pedro, Buenos Aires. Ediciones INTA. 16 p. (Boletín de divulgación técnica; no. 24). Consultado 18 jun. 2020. Disponible en <http://hdl.handle.net/20.500.12123/4853>

Recibido: 12.04.22

Aceptado: 13.12.22