



CRECIMIENTO DE *Coffea arabica* L. CV CATIMOR BIOFERTILIZADO CON DIVERSOS AISLAMIENTOS DE HONGOS ENDOMICORRÍZICOS EN VIVERO

GROWTH OF *Coffea arabica* L. CV CATIMOR BIOFERTILIZED WITH VARIOUS ENDOMICORRHIZAL FUNGI ISOLATES IN NURSERY

Juan F. Aguirre-Medina¹, Juan F. Aguirre-Cadena^{1*},
José C. Escobar-España¹ y José L. López-González²

¹Universidad Autónoma de Chiapas, Campus IV, Facultad de Ciencias Agrícolas, Huehuetán, Chiapas, México. ²Universidad Politécnica de Puebla, Cuanalá, Puebla, México.

*Autor de correspondencia (juan.cadena@unach.mx)

RESUMEN

El café (*Coffea arabica* L.) es una especie de importancia económica mundial y su producción se basa en la aplicación de insumos químicos de origen sintético. El aumento en la preferencia del consumo de café orgánico ha utilizado varias alternativas para la nutrición del cultivo, como los hongos endomicorrízicos. El café presenta alto grado de micotrofia; sin embargo, su efectividad es diferencial al inducir el crecimiento. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de hongos endomicorrízicos de diferente origen geográfico en el crecimiento de *Coffea arabica* L. cv Catimor y en el contenido de fósforo en tejido vegetal. Las semillas fueron germinadas en charolas y a las dos semanas fueron biofertilizadas y trasplantadas a suelo andosol mólico en bolsas de plástico con los aislamientos denominados Limón, Vainilla, Izapa, Caracoles y San Rafael, además de *Rhizophagus intraradices* como referencia, y un testigo. Se utilizó un diseño completamente al azar con cinco repeticiones. Se registraron variables morfológicas (altura de planta y número de hojas) y fisiológicas (biomasa seca de raíz, tallo, lámina foliar y área foliar) a los 28, 56, 84 y 112 días después del trasplante; además de colonización radical y contenido de P en tejido vegetal al final de la evaluación. Se encontraron diferencias en inducción de materia seca con los aislamientos, y todos superaron al testigo. La altura de planta presentó aumento más uniforme con los aislamientos. La biomasa seca se incrementó desde el primer muestreo en las variables tallo y lámina foliar y a partir del segundo en raíz. Los valores de las variables morfológicas y fisiológicas se expresaron diferencialmente en relación con el tiempo, y la inducción del crecimiento fue influenciada por los aislamientos. El contenido de fósforo se incrementó en todas las plantas colonizadas en comparación al testigo.

Palabras clave: Café, contenido de P, micorrizas, variables morfológicas y fisiológicas.

SUMMARY

Coffee (*Coffea arabica* L.) is a species of global economic importance and its production is based on the application of chemical inputs of synthetic origin. The increased preference for the consumption of organic coffee has used various alternatives for crop nutrition, such as endomycorrhizal fungi. The coffee tree has a high degree of mycotrophy; however, its effectiveness is differential when inducing growth. The aim of the present study was to evaluate the effect of endomycorrhizal fungi of different geographical origin on the growth of *Coffea arabica* L. cv Catimor and on the phosphorus content in plant tissue. Seeds were germinated in trays and after two weeks they

were biofertilized and transplanted to mollic Andosol soil in plastic bags with the isolates called Limón, Vainilla, Izapa, Caracoles and San Rafael, in addition to *Rhizophagus intraradices* as reference, and a control. A completely randomized design with five replications was used. Morphological (plant height and number of leaves) and physiological (dry biomass of root, stem, leaf blade and leaf area) traits were recorded at 28, 56, 84 and 112 days after transplantation, in addition to root colonization and P content in plant tissue at the end of the evaluation. Difference in dry matter induction were found, and all exceeded the control. Plant height increased more evenly with the isolates. Dry biomass increased from the first sampling in the stem and leaf blade variables and from the second one in the root. Values of morphological and physiological variables expressed differentially in relation to time, and growth induction was influenced by the isolates. Phosphorus content increased in all colonized plants compared to the control.

Index words: Coffee, morphological and physiological variables, mycorrhizae, P content.

INTRODUCTION

Coffea arabica L. se cultiva en Chiapas, México desde mediados del siglo XIX y se ha adaptado a la región del Soconusco (Montoya y Toledo, 2020); se ha convertido en un cultivo estratégico por su importancia social y económica y ha contribuido a la preservación de la biodiversidad mediante su asociación con árboles de sombra en sistemas agroforestales (Reyes *et al.*, 2022). En la actualidad se ha incrementado el número de agricultores que producen café orgánico (Reyes *et al.*, 2020) y este enfoque agroecológico favorece el mantenimiento, equilibrio e interacción de los microorganismos de la rizósfera con las plantas hospedantes (Baldi, 2021). Además de inducir protección en las raíces frente a diversos patógenos (Bhale *et al.*, 2018), las interacciones entre plantas y hongos contribuyen a la sostenibilidad agrícola (Devi *et al.*, 2021) y al funcionamiento de los ecosistemas (Bar-On *et al.*, 2018). Dichas interacciones benefician la supervivencia de las plantas, especialmente en condiciones agroclimáticas desfavorables (Agnolucci *et*

al., 2019), tal como en plantaciones con diferentes grados de erosión del suelo (Lara-Capistran *et al.*, 2021).

Los hongos endomicorrízicos son simbioses obligados de aproximadamente el 80 % de las raíces de las plantas terrestres (Zou *et al.*, 2021), y esta relación extensa ha generado mutualismo esencial en la distribución e interacción de plantas y hongos (Janowski y Leski, 2022; Tedersoo *et al.*, 2020); sin embargo, los hongos endófitos no presentan especificidad hospedera (Suryanarayanan *et al.*, 2018); no obstante, se demuestra preferencia por ciertas plantas hospedantes (U'Ren *et al.*, 2019) para la adquisición de nutrientes (Bhale *et al.*, 2018; Zou *et al.*, 2021), especialmente fósforo, que es escaso o de baja movilidad en los suelos tropicales (Cogo *et al.*, 2017), y cuya asimilación es especialmente importante como inductor del crecimiento del micelio presimbótico para iniciar la colonización, tales como los estrigolactones (Duc *et al.*, 2017). Además de lo anterior, se reconoce la fuerte influencia de varios factores ambientales como distribución de la precipitación en el año, el estado fisicoquímico del suelo (Janowski y Leski, 2022) y la edad de la planta (Jefwa *et al.*, 2004).

Coffea spp. presenta alto grado de micotrofia (Hernández-Acosta *et al.*, 2018), como se ha verificado en las regiones tropicales donde se cultiva (Vallejo-Torres *et al.*, 2019), como en el sur de México (Trejo-Aguilar *et al.*, 2018) y el Soconusco, Chiapas (Bertolini *et al.*, 2020).

Diversos autores han citado mayor crecimiento de *Coffea* spp. y aumento nutrimental con la simbiosis de hongos endomicorrízicos (Ibarra-Puón *et al.*, 2014; Perea *et al.*, 2019); no obstante, al evaluarlos en consorcio o por separado, su efectividad depende del hongo endomicorrízico utilizado y de su compatibilidad con el hospedero (Aguilar-Paredes *et al.*, 2020), registrando inducción diferencial entre los componentes del

rendimiento de diversos cultivos (Aguirre-Medina *et al.*, 2020). Con base en lo anterior, se evaluaron aislamientos de hongos endomicorrízicos con diferente origen geográfico en diversas variables fisiológicas y morfológicas del crecimiento de *Coffea arabica* L. var Catimor y su aportación en el contenido de fósforo en el tejido vegetal.

MATERIALES Y METODOS

La presente investigación se realizó en condiciones de vivero de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) ubicada en Huehuetán, Chiapas, México, (15° 01' N, 92° 32' O) a 44 m de altitud. El clima se clasifica como Am (w") i g según García (2004), y se define como tropical cálido húmedo con lluvias en verano. La precipitación fue de 2650 mm y las temperaturas máximas y mínimas de 38 ° y 15 °C, respectivamente. La temperatura media, considerada isotérmica, es de 25.4 °C.

Origen, aislamiento y reproducción de los hongos endomicorrízicos

Los aislamientos de los hongos endomicorrízicos fueron obtenidos de tres regiones tropicales del sureste de México (Cuadro 1).

Se colectaron 500 g de suelo rizosférico en cinco plantas y en ese momento fueron separadas raíces y fijadas en FAA (Megías *et al.*, 2023) y en las mismas se verificó la colonización de acuerdo con Phillips y Hayman (1970). El resto del suelo se mantuvo en laboratorio. En cada muestra de suelo, las esporas similares en color, forma y tamaño fueron separadas mediante tamizado en húmedo y decantación (Gerdemann y Nicolson, 1963) para su multiplicación. Las mismas se propagaron durante 90 días en contenedores de 1 L con sustrato de arena de río estéril, utilizando *Sorghum bicolor* (L.) Moench como planta

Cuadro 1. Localización geográfica de los sitios de recolecta de los aislamientos, cultivo asociado y características del ambiente.

Sitio	Cultivo asociado	Suelo	Precipitación (mm)	Denominación
Tenampulco, Puebla: 20° 08' 30" N, 97° 30' 00" O, 350 msnm	<i>Vanilla planifolia</i>	Regosol	2100	Caracoles
San Rafael, Veracruz (20° 08' 20" N, 97° 02' 57" O, 20 msnm)	<i>Vanilla planifolia</i>	Cambisol	1600	San Rafael
	<i>Theobroma cacao</i>			Izapa
Tuxtla Chico, Chiapas (14° 30' N, 92° 00' O, 425 msnm)	<i>Coffea arabica</i>	Luvisol	4250	Limón
	<i>Vanilla planifolia</i>			Vainilla

hospedante. En general, se encontró que las esporas de los aislamientos pertenecen al género *Glomus*, con esporas globosas y elípticas de color amarillo, amarillo claro, café amarillento o anaranjado fuerte. Este género se ha citado como dominante en otros lugares de América Latina (Lopes *et al.*, 1983) y en la selva tropical de México (Bertolini *et al.*, 2020).

Características del sustrato

El sustrato se conformó con la mezcla de suelo andosol mólico de la Colonia El Triunfo, Municipio de Escuintla, Chiapas, México, al cual se agregó arena de río lavada (1:1 v/v). El sustrato final presentó las siguientes características fisicoquímicas: arena 80.76 %, limo 13.35 %, arcilla 5.88 %, textura arena migajonosa (Bouyucos), 2.63 % de materia orgánica (Walkley-Black), pH 5.78 (solución acuosa 1:2), N 0.13% (Kjeldhall), P 14.1 mg L⁻¹ (colorimetría), K⁺ 64.20 mg L⁻¹ (espectrofotometría atómica), Na⁺ 95.50 mg L⁻¹, Mg⁺⁺ 53.0 mg L⁻¹, Ca⁺⁺ 469 mg L⁻¹, 5 Meq/100g de capacidad de intercambio catiónico y 0.05 ds/m de conductividad eléctrica (conductímetro). Con dicho sustrato se llenaron bolsas de plástico negro (25 × 35 cm y 6 L de capacidad) y se colocaron en bancales de fierro para su multiplicación.

Siembra y aplicación de microorganismos

Las semillas de *Coffea arabica* L. var. Catimor fueron germinadas en charolas separadas con los microorganismos (biofertilizantes) adheridos al 4 % del peso de la semilla, mediante la humectación con carboximetil celulosa (Sigma-Aldrich, Saint Louis Missouri, USA). A los 60 días después de sembradas con desarrollo de hojas cotiledonales fueron trasplantadas a bolsas negras de polietileno de 10 × 20 cm, agregando 2.0 g de cada microorganismo, acorde con los tratamientos en el sitio de trasplante.

Tratamientos, repeticiones y diseño experimental

Los tratamientos fueron los cinco aislamientos más el hongo de referencia *R. intraradices* y el testigo (sin microorganismos). La evaluación se realizó con cinco repeticiones en un diseño completamente al azar en condiciones de vivero (media sombra, riego a capacidad de campo). Los aislamientos a la cosecha presentaron al menos 100 esporas g⁻¹ en suelo con 93 % de colonización de raíces. El microorganismo *R. intraradices* (Schenck & Sm.) Walker & Schuessler fue adquirido en el INIFAP-Rosario Izapa, Chiapas, México a una concentración de 40 esporas g⁻¹ de suelo y 95 % de colonización de raíces de *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex. A. Rich.) como planta hospedera. Se realizaron cuatro muestreos destructivos cada 28 días y en total se tuvieron 140 macetas. La unidad experimental

fue un contenedor con una planta. Las plantas se regaron con agua extraída de pozo profundo.

Variables evaluadas

Se registraron variables morfológicas (altura de planta y número de hojas) y fisiológicas (peso seco de los componentes aéreo y radical) a los 28, 56, 84 y 112 días después del trasplante (ddt). La biomasa seca de los componentes de rendimiento de la raíz y parte aérea se pesaron en balanza semianalítica (Ohaus Adventurer Pro, Parsippany, New Jersey, EUA) después de secarse en estufa de aire forzado a 75-80 °C hasta peso constante. El área foliar se registró en cm² con un integrador de área foliar (LI-COR, LI 3100, Lincoln, Nebraska, EUA). Con las variables anteriores se determinó la tasa relativa de crecimiento (TRC) (Milthorpe y Moorby, 1982) y el área foliar específica (AFE) (Hunt, 1982).

El contenido de P se obtuvo mediante análisis foliar con espectrofotómetro (Olsen, Model 400 ¼, Thermo Fisher Scientific, Waltham, Massachusetts, EUA). El porcentaje de colonización se cuantificó utilizando la técnica de Phillips y Hayman (1970) y el número de esporas, de acuerdo con Gerdemann y Nicolson (1963).

Análisis estadístico

Los resultados se evaluaron mediante el programa SAS versión 8.1 (SAS Institute, 1999-2000) basado en un análisis completamente aleatorizado. Las diferencias entre medias de tratamientos se compararon mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) y las gráficas se elaboraron con Sigma Plot (ver. 11.00).

RESULTADOS Y DISCUSION

Componentes morfológicos y fisiológicos

De los componentes morfológicos, la altura de las plantas biofertilizadas con los aislamientos superó al testigo a los 84 y 112 ddt con diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$). La altura máxima fue de 19.7 cm con el aislamiento Limón el cual registró un incremento de 28 % más que el testigo y 11.6 % con respecto a *R. intraradices*. Entre aislamientos, la altura promedio fue de 19.0 ± 1.9 cm. (Cuadro 2).

En otras variedades de *C. arabica*, como en la variedad Garnica, el incremento en altura ha sido citado por Trejo-Aguilar *et al.* (2018) al inocular hongos endomicorrízicos recolectados en fincas de café en Veracruz, México y por Vallejos-Torres *et al.* (2019), así como en la variedad Caturra con diferentes hongos endomicorrízicos nativos

Cuadro 2. Crecimiento de *Coffea arabica* L. var Catimor biofertilizada con diferentes hongos endomicorrízicos del género *Glomus* del sureste de México. Promedios por planta.

Tiempo (días)	Tratamiento	Altura (cm)	Número de hojas	Raíz (g)	Tallo + ramas y peciolo (g)	Lámina foliar (g)	Área foliar (cm ²)	% Colonización	% P
28	Testigo	7.4 a	2.0 a	0.042 a	0.038 abc	0.002 d	1.5 cd	12.2±1.9	
	San Rafael	8.1 a	2.0 a	0.038 a	0.038 abc	0.007 b	2.0 bc	16.8±1.6	
	Caracoles	7.4 a	2.0 a	0.041 a	0.044 a	0.008 b	2.5 b	25.4±1.8	
	Limón	8.5 a	2.0 a	0.041 a	0.036 bc	0.059 bc	1.7 cd	22.4±4.7	
	Vainilla	8.6 a	2.0 a	0.036 a	0.037 abc	0.004 cd	1.2 d	22.2±3.1	
	Izapa	7.7 a	2.0 a	0.037 a	0.034 c	0.013 a	4.0 a	14.6±2.7	
	<i>R. intraradices</i>	7.8 a	2.0 a	0.039 a	0.043 ab	0.011 a	4.5 a	29.6±5.5	
	CV (%)	8.3	8.2	10.9	9.6	16.0	13.2		
56	Testigo	8.0 a	3.6 a	0.074 c	0.048 c	0.064 c	19.3 b	23.8±1.5	
	San Rafael	7.8 a	4.8 a	0.077 bc	0.052 bc	0.104 b	26.7 a	28.2±1.1	
	Caracoles	9.0 a	3.6 a	0.109 a	0.052 bc	0.098 b	25.9 a	35.0±1.0	
	Limón	8.3 a	4.0 a	0.082 bc	0.065 a	0.065 c	26.6 a	28.8±1.5	
	Vainilla	8.4 a	4.8 a	0.098 ab	0.059 ab	0.076 bc	22.7 ab	25.2±0.8	
	Izapa	7.7 a	4.0 a	0.097 ab	0.060 ab	0.093 bc	25.7 a	25.2±0.8	
	<i>R. intraradices</i>	8.1 a	4.4 a	0.094abc	0.059 ab	0.019 a	27.95 a	59.4±2.2	
	CV (%)	7.6	19.8	12.3	8.6	14.6	11.1		
84	Testigo	10.3 b	8.0 a	0.215 c	0.095 c	0.253 e	62.1 d	28.4±1.0	
	San Rafael	12.6 a	8.6 a	0.467 a	0.142 ab	0.405 bc	92.4 c	37.0±1.5	
	Caracoles	12.5 a	8.0 a	0.285bc	0.114 bc	0.311 de	71.7 d	36.0±1.2	
	Limón	12.8 a	9.6 a	0.462 a	0.155 a	0.465 b	112.7 b	41.4±2.0	
	Vainilla	13.6 a	9.2 a	0.313 b	0.135 ab	0.366 cd	91.4 c	32.6±1.5	
	Izapa	13.2 a	9.6 a	0.410 a	0.154 a	0.571 a	132.5 a	40.2±1.4	
	<i>R. intraradices</i>	12.9 a	8.8 a	0.405 a	0.147 a	0.383 cd	91.20 c	63.6±1.5	
	CV (%)	6.3	11.1	10.5	10.5	9.6	8.9		
112	Testigo	14.1 b	11.0 b	0.511 d	0.224 d	0.80 d	179.9 c	27.6±0.7	0.16 b
	San Rafael	17.6 a	12.4 ab	0.852bc	0.330 c	1.43 c	306.8 b	34.4±1.1	0.19 a
	Caracoles	19.2 a	13.2 ab	1.116 a	0.444 ab	1.67 abc	362.2 ab	39.6±1.6	0.18 ab
	Limón	19.7 a	14.0 a	1.135 a	0.469 a	1.81 ab	383.7 ab	41.8±1.0	0.19 a
	Vainilla	19.5 a	13.2 ab	1.072ab	0.442 ab	1.74 abc	379.8 ab	42.6±2.1	0.18 ab
	Izapa	19.0 a	12.8 ab	0.872bc	0.440 ab	1.81 a	390.3 a	39.6±3.1	0.19 a
	<i>R. intraradices</i>	14.7 a	11.6 ab	0.823 c	0.376 bc	1.436 c	354.6 ab	54.6±2.8	0.20 a
	CV (%)	8.2	9.5	12.5	11.8	11.1	11.6		4.7

Los valores con letra diferente dentro de cada columna y factor son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). CV: coeficiente de variación.

recolectados en 12 fincas cafetaleras del Perú.

La emisión inicial de hojas en *C. arabica* cv Catimor a los 28 y 56 ddt no expresó variación importante, pero se incrementó al final de la evaluación (84 y 112 ddt), mostrando diferencias entre tratamientos ($P \leq 0.05$). El aislamiento Limón indujo el mayor número de hojas ($n = 14$), superando con tres hojas a las plantas testigo y el hongo de referencia *R. intraradices*, resaltando además que en general, los aislamientos indujeron dos hojas más que el testigo y que *R. intraradices*. En la especie *C. canephora* (Pierre) ex Froehner las diferencias más contrastantes en el número de hojas fueron observadas de los 112 a 140 ddt (Ibarra-Puón *et al.*, 2014), y este efecto se considera relacionado con la colonización radical a través del tiempo.

El sistema radical presentó variación en la asignación de materia seca en todos los tratamientos a partir de los 56 ddt al mostrar diferencia entre ellos ($P \leq 0.05$). El mayor incremento se observó al final de la evaluación y fue con los aislamientos Caracoles y Limón, que tuvieron 54 % más biomasa radical en comparación con el testigo y 26 % en comparación con *R. intraradices*. En otros aislamientos de hongos endomicorrízicos inoculados a *C. arabica* var Caturra, Vallejos-Torres *et al.* (2019) citaron incremento del sistema radical; en cambio, en *C. arabica* var Oro Azteca biofertilizada con *R. intraradices* se presentó menor crecimiento inicial de la raíz y un aumento posterior a los 120 ddt (Aguirre-Medina *et al.*, 2011).

El efecto diferencial en la inducción del crecimiento radical parece estar relacionados con el incremento de los exudados radicales, que favorece el aumento de la microbiota (Altomare y Tringovska, 2011); además, la hifa del hongo es más delgada que las raíces de las plantas y puede penetrar a ciertos espacios donde normalmente no lo hacen los pelos absorbentes (He *et al.*, 2020).

En relación con la biomasa seca del tallo más las ramas y peciolo de hojas, se observaron diferencias ($P \leq 0.05$) entre tratamientos desde el primer muestreo. Los valores más altos de asignación de materia seca a esta estructura fueron con el aislamiento Limón a los 56, 84 y 112 ddt. La respuesta anterior sugiere abastecimiento nutrimental e hídrico a las plantas hospedantes (Devi *et al.*, 2021). En *C. canephora* (Pierre) ex Froehner se presenta la misma respuesta al inocularlas con *R. intraradices* (Ibarra-Puón *et al.*, 2014).

La asignación de materia seca a la hoja de *C. arabica* L. presenta diferencias estadísticas entre tratamientos ($P \leq 0.05$) a partir del primer muestreo. El aislamiento Izapa indujo mayor incremento en todos los muestreos y fue diferente al resto de los tratamientos ($P \leq 0.05$). Este hecho

fue concomitante con el área foliar. La mayor acumulación de la biomasa en lámina foliar sugiere el beneficio del establecimiento de la simbiosis (Jacott *et al.*, 2017).

En general, la biofertilización de *C. arabica* L. cv Catimor con hongos endomicorrízicos aumenta significativamente la asignación de materia seca en las diferentes variables morfológicas y fisiológicas en comparación con el testigo, y de manera diferencial, se expresa más con alguno aislamientos a diferente tiempo. Las variables morfológicas fueron poco modificadas por la interacción con los diferentes aislamientos. Los valores más contrastantes se presentaron en las variables fisiológicas y la respuesta más evidente se expresó a diferente tiempo. Este hecho sugiere compatibilidad entre el hongo y la planta hospedante; sin embargo, se debe considerar que existe contraste funcional (Jäderlund *et al.*, 2008) en la producción de metabolitos especializados en la raíz (Devi *et al.*, 2021), como los flavonoides que favorecen la comunicación con otros microorganismos del suelo (Desmet *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2017), y que en algunos casos esto puede influir en la germinación de esporas, crecimiento de hifas y colonización de raíces (Larose *et al.*, 2002).

La menor inducción del crecimiento con algunos aislamientos se puede atribuir a su origen geográfico, debido a las diferencias particulares del ambiente y suelo donde fueron recolectados, como lo citan Hart y Reader (2002); sin embargo, la simbiosis es recíproca y ventajosa con la mayoría de las plantas terrestres y su asociación no es tan específica con la especie (Devi *et al.*, 2021).

Tasa relativa de crecimiento

El efecto en la tasa relativa de crecimiento sugiere cierta compatibilidad entre los aislamientos con la var Catimor (Figura 1); es decir, los aislamientos promueven mayor crecimiento en comparación con el testigo; sin embargo, en ambos casos se presenta una etapa de crecimiento seguida por otra de disminución; es decir, que los estratos de la planta se desarrollaron con una fase de crecimiento exponencial, seguida por un período en que la tasa de ganancia de biomasa en el tiempo declina (Collado-Vides, 1997). La variación en los resultados puede estar asociada con factores intrínsecos del hongo endomicorrízico o con su capacidad de colonización para inducir mayor desarrollo vegetal en la planta hospedante mediante el incremento en la tasa fotosintética (França *et al.*, 2016).

Área foliar específica (AFE)

El AFE inducida por los aislamientos presentó incremento en el primer periodo de muestreo, seguido por otro de

disminución de la AFE (Figura 2); después de esta etapa, el AFE se mantuvo de forma general sin cambios en los siguientes muestreos. La diferencia inicial en el aumento o disminución del tejido asimilatorio se atribuye al transporte de nutrientes por los hongos endomicorrízicos (Tajini y Drevon, 2012), resaltando que las plantas testigo no mostraron cambios contrastantes.

Colonización micorrízica

La colonización se observó en todas las plantas de *Coffea arabica* cv Catimor evaluadas, incluyendo el testigo (posible cepa nativa), y fue mayor en las plantas biofertilizadas en comparación con las plantas sin biofertilizar. Lo anterior confirma la presencia de hongos endomicorrízicos en el sustrato regional utilizado; sin embargo, presentan menor capacidad de colonización e inducción del crecimiento, aun cuando *Coffea* ha sido considerada con alta dependencia micorrízica (Andrade et al., 2009). Entre los aislamientos, el porcentaje promedio de colonización fue de 33.1 % y con *R. intraradices* 51.8 .

Algunos de los microorganismos aislados como Caracoles, así como *R. intraradices* aumentaron la colonización durante las etapas iniciales de la evaluación; es decir, a los 28 y 56 ddt, y en los muestreos siguiente la colonización disminuyó en comparación con los otros aislamientos. En el muestreo a los 84 ddt la colonización mostró aumento

en los aislamientos San Rafael, Limón e Izapa y, en estos últimos dos, la colonización se mantuvo hasta los 112 ddt. La colonización expresa también una etapa de incremento seguida de un periodo de descanso. Lo anterior puede relacionarse con la suplementación de fuentes de carbono de la planta hospedante hacia el hongo (Adolfsson et al., 2015). La alta capacidad de colonización de *R. intraradices* se ha citado en otros cultivos, anuales y perennes (Aguirre, 2006; Wright et al., 2005). En general, los resultados mostraron que el incremento en las variables fisiológicas coincide con el aumento de los niveles de colonización; sin embargo, la correlación no es alta entre ambas variables (França et al., 2016).

Contenido de fósforo

El contenido de fósforo aumentó con todos los hongos endomicorrízicos aplicados a *C. arabica* L. cv Catimor y fueron superiores al control ($P \leq 0.05$). La mayor concentración en tejido vegetal fue con los aislamientos San Rafael, Limón, Izapa y *R. intraradices*. La preferencia de los hongos endomicorrízicos por transportar fósforo ha sido citada por Lebrón et al. (2012), y se debe a la aceleración de la disociación del fosfato insoluble por las raíces colonizadas, resaltando que las plantas se favorecen con la absorción y transporte de P, Zn, Ca, S, Cu y Mg, y sus efectos son más notorios en suelos de baja fertilidad (Zhu et al., 2008).

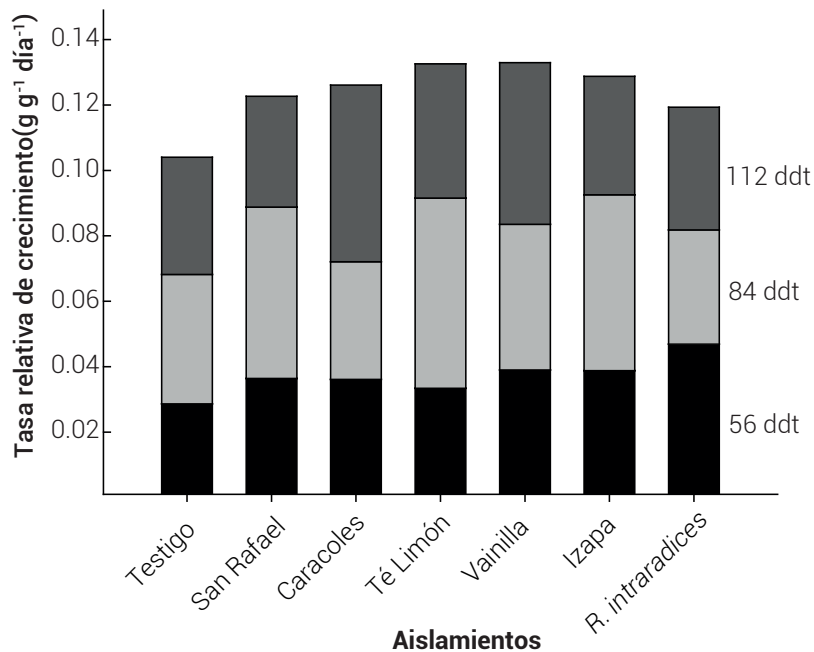


Figura 1. Tasa relativa de crecimiento de *Coffea arabica* L. cv Catimor biofertilizada con hongos endomicorrízicos (*Glomus* spp.) aislados de diferente origen geográfico en vivero. Los valores son promedios de cinco repeticiones.

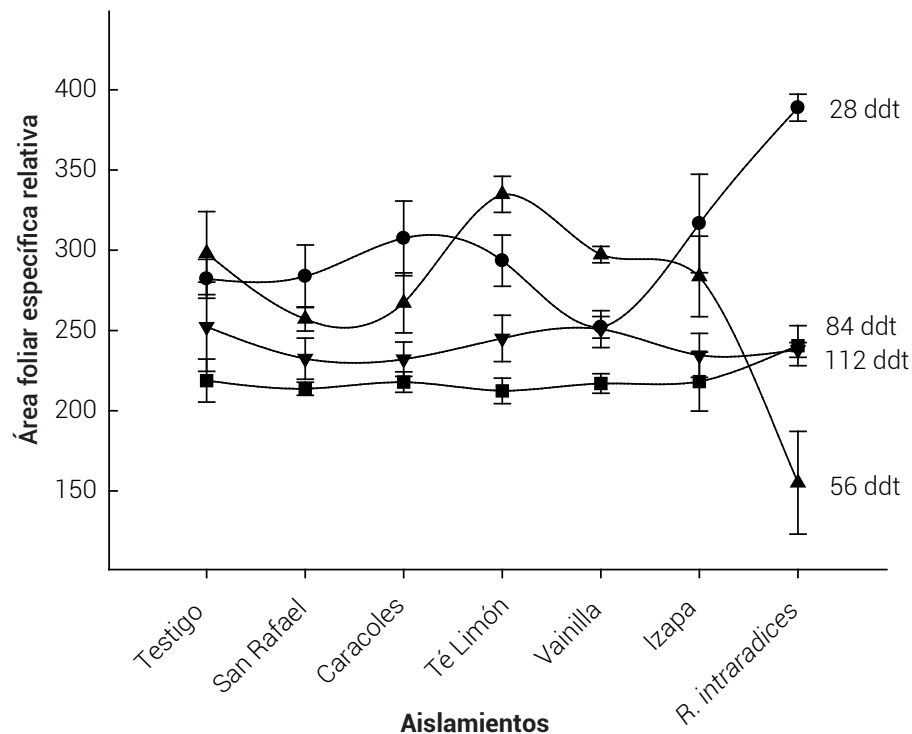


Figura 2. Área foliar específica de *Coffea arabica* L. cv catimor biofertilizado con diferentes aislamientos de hongos endomicorrizicos (*Glomus* spp.) en vivero. Los valores son promedio de cinco repeticiones \pm error estándar.

CONCLUSIONES

La biofertilización de *Coffea arabica* L. var. Catimor con los diferentes hongos endomicorrizicos induce mayor crecimiento vegetal. El aumento en las variables morfológicas altura de planta y número de hojas se expresan al final del periodo de evaluación, pero en el caso de las fisiológicas, el aumento se expresa desde el inicio. La dimensión del aumento dependió del microorganismo aplicado. El contenido de fósforo se incrementó con la biofertilización de todos los hongos endomicorrizicos

BIBLIOGRAFÍA

- Adolfsson L., K. Solymosi, M. X. Andersson, Á. Keresztes, J. Uddling, B. Schoefs and C. Spetea (2015) Mycorrhiza symbiosis increases the surface for sunlight capture in *Medicago truncatula* for better photosynthetic production *PLoS ONE* 10:e0115314, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115314>
- Agnolucci M, L. Avio, A. Pepe, A. Turrini, C. Cristani, P. Bonini, ... and M. Giovannetti (2019) Bacteria associated with a commercial mycorrhizal inoculum: community composition and multifunctional activity as assessed by Illumina sequencing and culture-dependent tools. *Frontiers in Plant Science* 9:1956, <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01956>
- Aguilar-Paredes A., G. Valdés and M. Nuti (2020) Ecosystem functions of microbial consortia in sustainable agriculture. *Agronomy* 10:1902, <https://doi.org/10.3390/agronomy10121902>
- Aguirre M. J. F. (2006) Biofertilizantes Microbianos: Experiencias Agronómicas del Programa Nacional del INIFAP en México. Libro Técnico Núm. 2. Campo Experimental Rosario Izapa, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Rosario Izapa, Chiapas, México. 201 p.
- Aguirre-Medina J. F., D. M. Moroyoqui-Ovilla, A. Mendoza-López, J. Cadena-Iñiguez, C. H. Avendaño-Arrazate y J. F. Aguirre-Cadena (2011) Hongo endomicorrizico y bacteria fijadora de nitrógeno inoculadas a *Coffea arabica* en vivero. *Agronomía Mesoamericana* 22:71-80, <https://doi.org/10.15517/am.v22i1.8668>
- Aguirre-Medina J. F., F. R. Bartolón-Morales, M. Martínez-Solis, J. Cadena-Iñiguez and V. A. Martínez-Sias (2020) Growth and sweetener content in *Stevia rebaudiana* Bert. biofertilized with *Rhizophagus intraradices* (Schenck & Sm.) Walker ted & Schüßler, and *Azospirillum brasilense* Tarrand, Krieg & Döbereiner in a substrate with bovine manure added. *Japan Journal of Research* 1:1-5, <https://doi.org/10.33425/2690-8077.1015>
- Altomare C. and I. Tringovska (2011) Beneficial soil microorganisms, an ecological alternative for soil fertility management. In: Genetics, Biofuels and Local Farming Systems, Sustainable Agriculture Reviews, Vol. 7. E. Lichtfouse (ed.). Springer. Dordrecht, The Netherlands. pp:161-214, https://doi.org/10.1007/978-94-007-1521-9_6
- Andrade S. A. L., P. Mazzafera, M. A. Schiavinato and A. P. D. Silveira (2009) Arbuscular mycorrhizal association in coffee. *The Journal of Agricultural Science* 147:105-115, <https://doi.org/10.1017/S0021859608008344>
- Baldi E. (2021) Soil-plant interaction: effects on plant growth and soil biodiversity. *Agronomy* 11:2378, <https://doi.org/10.3390/agronomy11122378>
- Bar-On Y. M., R. Phillips and R. Milo (2018) The biomass distribution on earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115:6506-6511, <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>
- Bertolini V., N. M. Montañó, B. L. Salazar-Ortuño, E. Chimal-Sánchez y L. Varela (2020) Diversidad de hongos micorrizicos arbusculares

- en plantaciones de café (*Coffea arabica*) del volcán Tacaná, Chiapas, México. *Acta Botánica Mexicana* 127:e1602, <https://doi.org/10.21829/abm127.2020.1602>
- Bhale U. N., S. A. Bansode and S. Singh (2018) Multifactorial role of arbuscular mycorrhizae in agroecosystem. In: Fungi and their Role in Sustainable Development: Current Perspectives. P. Gehlot and J. Singh (eds.). Springer, Singapore. pp:2005-2020, https://doi.org/10.1007/978-981-13-0393-7_12
- Cogo F. D., P. T. G. Guimarães, E. P. Rojas, O. J. Saggin Jr., J. O. Siqueira and M. A. C. Carneiro (2017) Arbuscular mycorrhiza in *Coffea arabica* L.: review and meta-analysis. *Coffee Science* 12:419-443, <https://doi.org/10.25186/CS.V12I3.1227>
- Collado-Vides L. (1997) Aspectos ecológicos y evolutivos de la arquitectura modular en plantas: perspectivas en algas marinas. *Revista Chilena de Historia Natural* 70:23-39.
- Desmet S., K. Morreel and R. Dauwe (2021) Origin and function of structural diversity in the plant specialized metabolome. *Plants* 10:2393, <https://doi.org/10.3390/plants10112393>
- Devi S. H., I. Bhupenandra, S. Sinyorita, S. Chongtham and E. L. Devi (2021) Mycorrhizal fungi and sustainable agriculture. In: Nitrogen in Agriculture – Physiological, Agricultural and Ecological Aspects. T. Ohyama and K. Inubushi (eds.). IntechOpen, London, UK. pp:1-19, <https://doi.org/10.5772/intechopen.99262>
- Duc N. H., Z. Mayer, Z. Pék, L. Helyes and K. Posta (2017) Combined inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi, *Pseudomonas fluorescens* and *Trichoderma* spp. for enhancing defense enzymes and yield of three pepper cultivars. *Applied Ecology and Environmental Research* 15:1815-1829, https://doi.org/10.15666/aeer/1503_18151829
- França A. C., A. F. de Freitas, E. A. dos Santos, P. H. Graziotti, and V. C. de Andrade Jr. (2016) Mycorrhizal fungi increase coffee plants competitiveness against *Bidens pilosa* interference. *Pesquisa Agropecuária Tropical* 46:132-139, <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4639485>
- García E. (2004) Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (Para Adaptarlo a las Condiciones de la República Mexicana) 5a edición. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 90 p.
- Gerdemann J. W. and T. H. Nicolson (1963) Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from the soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society* 46:235-244, [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)
- Hart M. M. and R. J. Reader (2002) Taxonomic basis for variation in the colonization strategy of arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist* 153:335-344, <https://doi.org/10.1046/j.0028-646X.2001.00312.x>
- He J. D., G. G. Chi, Y. N. Zou, B. Shu, Q. S. Wu, A. K. Srivastava and K. Kuča (2020) Contribution of glomalin-related soil proteins to soil organic carbon in trifoliate orange. *Applied Soil Ecology* 154:103592, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103592>
- Hernández-Acosta E., D. Trejo-Aguilar, R. Ferrera-Cerrato, A. Rivera-Fernández y M. C. González-Chávez (2018) Hongos micorrízicos arbusculares en e crecimiento de café (*Coffea arabica* L.) varieties Garnica, Catimor, Caturra y Catuai. *Agroproductividad* 11:61-67.
- Hunt R. (1982) Plant Growth Curves: The Functional Approach to Plant Growth Analysis. Edward Arnold, London, UK. 248 p.
- Ibarra-Puón J. C., J. F. Aguirre-Medina, A. Ley-De Coss, J. Cadena-Iñiguez y G. A. Zavala-Mata (2014) *Coffea canephora* (Pierre) ex Froehner inoculado con micorriza y bacteria fijadora de nitrógeno en vivero. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 20:201-213, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.09.027>
- Jacott C. N., J. D. Murray and C. J. Ridout (2017) Trade-offs in arbuscular mycorrhizal symbiosis: disease resistance, growth responses and perspectives for crop breeding. *Agronomy* 7:75, <https://doi.org/10.3390/agronomy7040075>
- Jäderlund L., V. Arthurson, U. Granhall and J. K. Jansson (2008) Specific interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting bacteria: as revealed by different combinations. *FEMS Microbiology Letters* 287:174-180, <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2008.01318.x>
- Janowski D. and T. Leski (2022) Factors in the distribution of mycorrhizal and soil fungi. *Diversity* 14:1122, <https://doi.org/10.3390/d14121122>
- Jefwa J. M., R. Sinclair and J. A. Maghembe (2004) Diversity of Glomale mycorrhizal fungi in maize/SESBANIA intercrops and maize monocrop systems in Southern Malawi. *Agroforestry Systems* 67:107-114, <https://doi.org/10.1007/s10457-004-2370-4>
- Lara-Capistran L., R. Zulueta-Rodriguez, B. Murillo-Amador, P. Preciado-Rangel, D. M. Verdecia-Acosta and L.G. Hernandez-Montiel (2021) Biodiversity of AM fungi in coffee cultivated on eroded soil. *Agronomy* 11:567, <https://doi.org/10.3390/agronomy11030567>
- Larose G., R. Chênevert, P. Moutoglis, S. Gagné, Y. Piché and H. Vierheilig (2002) Flavonoid levels in roots of *Medicago sativa* are modulated by the developmental stage of the symbiosis and the root colonizing arbuscular mycorrhizal fungus. *Journal of Plant Physiology* 159:1329-1339, <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00896>
- Lebrón L., D. J. Lodge and P. Bayman (2012) Differences in arbuscular fungi among three coffee cultivars in Puerto Rico. *International Scholarly Research Notices* 2012:148042, <https://doi.org/10.5402/2012/148042>
- Lopes E. S., E. Oliveira, R. Dias and N. C. Schenck (1983) Occurrence and distribution of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi in coffee (*Coffea arabica* L.) plantations in central Sao Paulo State, Brazil. *Turrialba* 33:417-422.
- Megías P. M., P. Molist G. y M. Á. Pombal D. (2023) Atlas de histología vegetal y animal. Facultad de Biología, Universidad de Vigo. Vigo, España. <http://mmegias.webs.uvigo.es/inicio.html> (Agosto 2023).
- Milthorpe F. L y J. Moorby (1982) Introducción a la Fisiología de los Cultivos. Ed. Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. 259 p.
- Montoya D. y V. M. Toledo (2020) Historia de la cañicultura en Chiapas (1880-2010). Apuntes de una evolución social y ambiental. *Sociedad y Ambiente* 23:1-25, <https://doi.org/10.31840/sya.vi23.2187>
- Perea R. Y. C., R. M. Arias, R. Medel O., D. Trejo A., G. Heredia and Y. Rodríguez Y. (2019) Effects of native arbuscular mycorrhizal and phosphate-solubilizing fungi on coffee plants. *Agroforestry Systems* 93:961-972, <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0190-1>
- Phillips J. M. and D. S. Hayman (1970) Improved procedures for clearing roots and staining parasitic vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society* 55:158-161, [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- Reyes P. G., G. Reyes P., M. Manchinelli y G. Reyes V. (2020) El oro rojo del Soconusco, Chiapas: el café. *Desde el Herbario CICY* 12:252-258.
- Reyes R. J., J. A. Rodríguez M., D. J. Pimenta T., M. A. Fuentes P., P. Marroquín M., A. Merino G. y J. F. Aguirre M. (2022) Diversidad y estructura arbórea de los árboles de sombra asociados a *Coffea arabica* L. en el Soconusco, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 13:4-27, <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i7.1.191>
- SAS Institute (1999-2000) SAS/STAT User's Guide. Ver 8.1. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA.
- Singh R., K. D. Pandey, A. Kumar and M. Singh (2017) PGPR isolates from the rhizosphere of vegetable crop *Momordica charantia*: characterization and application as biofertilizer. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 6:1789-1802, <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.603.205>
- Suryanarayanan T. S., P. T. Devarajan, K. P. Girivasan, M. B. Govindarajulu, V. Kumaresan, T. S. Murali, ... and G. Venkatesan (2018) The host range of multi-host endophytic fungi. *Current Science* 115:1963-1969, <https://doi.org/10.18520/cs/v115/i10/1963-1969>
- Tajini F. and J. J. Drevon (2012) Phosphorus use efficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as related to compatibility of association among arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia. *African Journal of Biotechnology* 11:12173-12182, <https://doi.org/10.5897/AJB12.603>
- Tedersoo L., S. Anslan, M. Bahram, R. Drenkhan, K. Pritsch, F. Buegger, ... and K. Abarenkov (2020) Regional-scale in-depth analysis of soil fungal diversity reveals strong pH and plant species effects in Northern Europe. *Frontiers in Microbiology* 11:1953, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01953>
- Trejo-Aguilar D., R. Ferrera-Cerrato, W. Sangabriel-Conde y Y. Baeza (2018) Efecto de la micorriza arbuscular en plantas de café (*Coffea*

- arabica* L.) infectadas por el nematodo de la corchosis de la raíz. *AgroProductividad* 11:98-104.
- U'Ren J. M., F. Lutzoni, J. Miadlikowska, N. B. Zimmerman, I. Carbone, G. May and A. E. Arnold (2019) Host availability drives distributions of fungal endophytes in the imperilled boreal realm. *Nature Ecology & Evolution* 3:1430-1437, <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0975-2>
- Vallejos-Torres G., T. Sánchez, M. A. García, M. Trigoso y L. A. Arévalo (2019) Efecto de hongos formadores de micorrizas arbusculares en clones de café (*Coffea arabica*) variedad Caturra. *Acta Agronómica* 68:278-284, <https://doi.org/10.15446/acag.v68n4.72117>
- Wright S. F. (2005) Management of arbuscular mycorrhizal fungi. In: *Roots and Soil Management: Interactions between Roots and the Soil*. Vol. 48. R. W. Zobel and S. F. Wright (eds). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. pp:181-197, <https://doi.org/10.2134/agronmonogr48.c10>
- Zhu G. S., Z. N. Yu, Y. Gui and Z. Y. Liu (2008) A novel technique for isolating orchid mycorrhizal fungi. *Fungal Diversity* 33:123-137.
- Zou Y. N., Q. S. Wu and K. Kuča (2021) Unravelling the role of arbuscular mycorrhizal fungi in mitigating the oxidative burst of plants under drought stress. *Plant Biology* 23:50-57, <https://doi.org/10.1111/plb.13161>