

La micorriza arbuscular como biofertilizante en cultivo de café Arbuscular mycorrhiza as a biofertilizer in production of coffee

Elizabeth Hernández-Acosta^{1*} , Dora Trejo-Aguilar² ,
Andrés Rivera-Fernández² y Ronald Ferrera-Cerrato³ 

¹ Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

² Autora para correspondencia / Corresponding author (ehernandez@chapingo.mx)

² Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Veracruzana. Zona Universitaria. 91090 Xalapa, Veracruz, México.

³ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

RESUMEN

En fincas cafetaleras del sureste de México, la degradación química, física y biológica de los suelos afecta la producción de plantas. Esta situación perjudica económicamente a los cafecultores, por lo que es común encontrar un descuido en sus plantaciones donde labores de cultivo como la poda y fertilización son costosas. Para resolver el problema del costo de fertilizantes, se recomienda la aplicación de inóculos micorrízicos arbusculares, su efectividad queda clara en hortalizas y frutales. Se evaluó la respuesta de dos inóculos del Colegio de Postgraduados, de una especie, (*Rhizophagus aggregatus*) y un consorcio (*Glomus claroides*, *Rhizophagus diaphanus* y *Paraglomus albidum*) (CMgrp) en plántulas de las variedades de café garnica, catimor, caturra y catuaí, con la finalidad de ubicar la mejor simbiosis planta-hongo. Se evaluaron las variables altura de la planta, materia seca, contenido de fósforo en hojas, porcentaje de colonización micorrízica, porcentaje de la eficiencia micorrízica, porcentaje de fósforo absorbido por la micorrización y el índice de eficiencia de la micorrización en la sanidad de la planta (E_m). Los resultados mostraron que el consorcio CMgrp generó los valores e incrementos más altos con respecto a las plantas no inoculadas en las variables altura de la planta y materia seca (1774 y 1701% para la variedad garnica respectivamente) y contenido de fósforo (650% en la variedad catimor). La respuesta de las plantas a la micorrización mostró los mejores resultados en las variedades garnica (34.32% porcentaje de colonización) y caturra (1670%

SUMMARY

In coffee plantations in southeastern Mexico, the chemical, physical and biological degradation of soils affects the production of plants. This situation economically harms the coffee growers, so it is common to place the neglect of their plantations where the cultivation tasks such as pruning and fertilization are costly. To solve the problem of fertilization, the application of arbuscular mycorrhizal inocula is recommended, its effectiveness is clear in vegetables and fruit trees. The response of two inocula (*Rhizophagus aggregatus*) and the consortium formed by the fungi *Glomus claroides*, *Rhizophagus diaphanus* and *Paraglomus albidum* (CMgrp) was evaluated in the coffee varieties garnica, catimor, caturra and catuaí, with the purpose of locating the best symbiosis plant-fungus. The variables height of the plant, dry matter, content of phosphorus in leaves, percentage of mycorrhizal colonization, percentage of mycorrhizal efficiency, percentage of phosphorus absorbed by mycorrhization and the efficiency index of mycorrhizae in the health of the plant were evaluated. (E_m) The results showed that the CMgrp consortium generated the highest values and increases with respect to non-inoculated plants in the plant height and dry matter variables (177 and 1701% for garnica variety) and phosphorus content (650% in the catimor variety). The response of the plants to mycorrhization showed the best results in the garnica varieties (34.32% colonization percentage) and caturra (1670% mycorrhizal efficiency and 1651% phosphorus absorbed by mycorrhization effect). The E_m

Cita recomendada / Recommended citation:

Hernández-Acosta, E., D. Trejo-Aguilar, A. Rivera-Fernández y R. Ferrera-Cerrato. 2020. La micorriza arbuscular como biofertilizante en cultivo de café. Terra Latinoamericana Número Especial 38-3: 613-628.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.659>

Recibido / Received: octubre / October 14, 2019.

Aceptado / Accepted: diciembre / December 13, 2019.

Publicado en / Published in Terra Latinoamericana 38: 613-628.

de eficiencia micorrízica y 1651% fósforo absorbido por efecto de la micorrización). El índice E_m reveló que las plantas de café inoculadas con el CMgrp presentaron mejor sanidad. Se recomienda utilizar al consorcio CMgrp como biofertilizante en plantas de café, para asegurar el éxito del trasplante, situación que representará un ahorro económico y de tiempo para el cafeticultor.

Palabras clave: variedades *garnica*, *catimor*, *caturra* y *catuai*, fertilizantes biológicos.

INTRODUCCIÓN

Desde finales de los años ochenta, el uso de los hongos micorrízicos (HM) en la agricultura, se incrementó como una alternativa al empleo de fertilizantes sintéticos (Berruti *et al.*, 2016). En México, hasta el presente año (2019) se comercializan bajo distintas marcas, aunque no hay información de producción y venta disponible (Weber, 2014). INIFAP, Buckman Laboratories, Plant Health Care, la Universidad Veracruzana, Colegio de Postgraduados, Biofábrica Siglo XXI, por mencionar algunos, producen el biofertilizante en distintas presentaciones. Muchos de estos productos contienen principalmente la especie *Rhizophagus irregularis*, tal es el caso de BuRIZE (Buckman Lab, Estado de México, MX), EndoRyza (Plant Health Care, CDMX, MX) y MicorrhizaFer (Biofábrica SXXI, CDMX, MX) de acuerdo a las etiquetas de los mismos.

El fósforo, es el principal elemento que el HM trasloca a la planta (Jakobsen y Hammer, 2015); sin embargo, también moviliza el agua, expande el área de exploración radical a través de las hifas, accediendo a nutrientes y espacios edáficos inaccesibles para las raíces. A pesar de los beneficios, la planta tiene influencia en el crecimiento del hongo (Sawers *et al.*, 2017), sin olvidar que los HM también interactúan con otros microorganismos del suelo (Battini *et al.*, 2017).

Los HM se asocian con cerca de 200 000 hospederos, y se cree que existe una baja especificidad (van der Heijden *et al.*, 2015); sin embargo, algunos trabajos muestran que existe una preferencia o compatibilidad por determinadas especies (Torrecillas *et al.*, 2012; Sawers *et al.*, 2017). Por otra parte, la preferencia puede no estar relacionada con la eficiencia, a modo que algunos hongos pueden ser más eficientes que otros en el mismo hospedero (Zhang *et al.*, 2015).

index revealed that the coffee plants inoculated with the CMgrp presented better health. It is recommended to use the CMgrp consortium as a biofertilizer in coffee plants, to ensure the success of the transplant, a situation that will represent an economic and time saving for the coffee grower.

Index words: *garnica*, *catimor*, *caturra* and *catuai* varieties, biological fertilizers.

INTRODUCTION

At the end of the 80s, the use of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in agriculture increased as an alternative to the use of synthetic fertilizers (Berruti *et al.*, 2016). Until now, they have been produced or commercialized in Mexico under different brands although no information on production and sale has been available (Weber, 2014). The Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Buckman Laboratories, Plant Health Care, Universidad Veracruzana, Colegio de Postgraduados, Biofábrica Siglo XXI, just to mention some, produce the biofertilizer in different presentations. Many of these products contain mainly the species *Rhizophagus irregularis*; such is the case of BuRIZE (Buckman Lab, Estado de México, MX), EndoRyza (Plant Health Care, CDMX, MX) and MicorrhizaFer (Biofábrica SXXI, CDMX, MX) according to the labels of their products.

Phosphorus is the main element that AMF translocate to the plant (Jakobsen and Hammer, 2015); however, they also mobilize water, expand the radicle exploration area through the hyphae, gaining access to nutrient and soil spaces inaccessible to roots. Despite the benefits, the plant has influence in fungus growth (Sawers *et al.*, 2017) without forgetting that AMF also interact with other soil microorganisms (Battini *et al.*, 2017).

The AMF associate, with close to 200 000 hosts, may have a low specificity (van der Heijden *et al.*, 2015); however, some studies have shown that a preference or compatibility for determined species exists (Torrecillas *et al.*, 2012; Sawers *et al.*, 2017). On the other hand, preference may not be related to efficiency, in a way that some fungi may be more efficient than others in the same host (Zhang *et al.*, 2015).

Mexico has a replanting program of coffee plantations – a guide for high quality coffee production – which comes from the Plan Integral de Atención

En México, existe un programa de replantación de fincas de café procedente en relación al Plan Integral de Atención al Café (PIAC) dentro del Plan Nacional de Desarrollo 2017-2030 (SAGARPA, 2016), donde se plantea producir plantas sanas y resistentes al trasplante desde el vivero. Siendo el café una planta micotrófica (Hernández-Acosta *et al.*, 2018), la búsqueda de HM nativos con posibilidades de utilizarse como biofertilizantes es una opción viable (Vincenzo *et al.*, 2018). En Oaxaca, la producción de café orgánico se incrementó y se práctica la inoculación micorrízica (Noriega-Altamirano *et al.*, 2014).

Dentro de este contexto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de dos inóculos de HM sobre el crecimiento y desarrollo de cuatro variedades de café en la fase de vivero, con la finalidad de seleccionar la combinación variedad-hongo más eficiente en la obtención de plantas vigorosas, resistentes al trasplante y para promover el uso de la micorriza como biofertilizante entre los cafecultores.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un experimento a nivel vivero en Xalapa, Veracruz, México, a una altitud de 1399 m, con una precipitación pluvial anual promedio de 1626 mm y una temperatura media anual de 18 °C. Se utilizaron semillas de la especie *Coffea arabica* L., de las variedades garnica, catimor, caturra y catuaí con porcentajes de germinación de 95, 98, 97 y 90%, respectivamente. Se utilizaron dos inóculos micorrízicos: *Rhizophagus aggregatus* (Schenck & GS Sm) y el consorcio *Glomus claroides*, *Rhizophagus diaphanus* (Cano & Dalpé) y *Paraglomus albidum* (Walker & Rhodes) (CMgrp). Los porcentajes de colonización de los inóculos propagados en plantas de cebolla fueron 57% para la especie *R. aggregatus* y 67% para el consorcio CMgrp. Ambos inóculos fueron proporcionados por el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos.

El material que se utilizó como sustrato fue una mezcla de suelo y materia orgánica (residuos vegetales) en una proporción 40:60. Ésta se tamizó y esterilizó a una temperatura de 120 °C por 2.5 h. El sustrato presentó 13.82% de materia orgánica, pH de 6.5 y 33 mg kg⁻¹ de fósforo (Método Bray) características adecuadas para el establecimiento del café y el HM (Contreras *et al.*, 2017; Bolaños *et al.*, 2000).

Al centro del recipiente (con capacidad de kg) y a una profundidad de 4 cm se incorporaron 10 g de

al Café (PIAC) within the Plan Nacional de Desarrollo 2017-2030 (SAGARPA, 2016). The plan is set out to produce healthy and resistant plants from the nursery stage. Because coffee is a mycotrophic plant (Hernández-Acosta *et al.*, 2018), the search for native AMF with the possibility of using them as biofertilizer is a viable option (Vincenzo *et al.*, 2018). In Oaxaca, the production of organic coffee has increased with the practice of mycorrhizal inoculation (Noriega-Altamirano *et al.*, 2014).

Within this context, the objective of this study was to evaluate the effect of two AMF inoculants on growth and development of four coffee varieties in the nursery stage to select the most efficient variety-fungus combination to obtain vigorous and resistant plants at transplant and promote the use of mycorrhizae as biofertilizers among coffee producers.

MATERIALS AND METHODS

An experiment at nursery level was performed in Xalapa, Veracruz, México at 1399 m a.s.l. with an average annual precipitation of 1626 mm and an annual average temperature of 18 °C. Seeds of the species *Coffea arabica* L., varieties Garnica, Catimor, Caturra, and Catuaí were used with germination percentages of 95, 98, 97, and 90%, respectively. Two mycorrhizal inoculants were used (1) *Rhizophagus aggregatus* (Schenck & GS Sm) and (2) *Glomus claroides*, *Rhizophagus diaphanus* (Cano & Dalpé) and *Paraglomus albidum* (Walker & Rhodes) consortium (CMgrp). The colonization percentages of the propagated inoculants in onion plants were 57% for *R. aggregatus* and 67% for the CMgrp consortium. Both inoculants were provided by Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, in Texcoco, Estado de México.

The material used as substrate was a mixture of soil and organic matter (vegetal waste) in a ratio of 40:60, which was sieved and sterilized at a temperature of 120 °C for 2.5 h. The substrate had 13.82% organic matter, pH 6.5 and 33 mg kg⁻¹ of phosphorus (Bray Method), which are the adequate characteristics for establishing coffee and AMF (Contreras *et al.*, 2017; Bolaños *et al.*, 2000).

For plant growth, recipients of 1 kg were used with a depth of 4 cm; at the center, 10 g of inoculant were incorporated in each experimental unit; then the coffee seed was placed, covering it with soil and on the surface a very thin layer of sterile volcanic rock to conserve

inóculo en cada unidad experimental, después se colocó la semilla de café, sobre esta se puso suelo y en la superficie una capa muy delgada de tezontle estéril para conservar la humedad. El experimento permaneció once meses, durante los cuales se regó de acuerdo a las necesidades de la planta, hasta alcanzar la capacidad de campo en el sustrato para evitar la presencia del marchitamiento fúngico.

Se estableció un diseño completamente al azar con 12 tratamientos, cuatro variedades, dos inóculos de HM y cuatro testigos (sin inocular) y cinco repeticiones por tratamiento. Cada unidad experimental fue una planta. Al final del experimento, 335 días después de la siembra (dds), se evaluó 1) altura de la planta, 2) materia seca, 3) contenido de fósforo en las hojas, 4) porcentaje de colonización micorrízica, 5) porcentaje de la eficiencia micorrízica, con la ecuación propuesta por Colozzi-Filho y Siqueira (1986):

$$Eficiencia = \left(\frac{\text{altura de plantas inoculadas}}{\text{altura de plantas testigo}} \times 100 \right) - 100$$

6) Porcentaje de fósforo absorbido por la micorrización, de acuerdo con la ecuación propuesta por Sieverding (1991):

$$PI (\%) = \left(\frac{\text{Biomasa en plantas inoculadas} \times 100}{\text{Biomasa de plantas testigo}} \right) - 100$$

y, 7) Sanidad, daño foliar causado por *Phoma costarricensis* y clorosis (amarillamiento por deficiencia de nutrientes) (Rivera, 1991), mediante una escala subjetiva, en 5 plantas. Utilizando una adaptación de la escala de Likert (Bertram, 2007) se calcularon los promedios para constituir un índice denominado (índice de eficiencia de la micorrización). Dicho índice toma valores entre 0 y 5; entre más pequeño sea éste, indicara un mayor beneficio y debe interpretarse como un resumen cuantitativo asociado a la distribución de las frecuencias a partir de nuestra escala (Cuadro 1).

Resultó útil normalizar el indicador, dividiendo su valor entre 5, de tal manera que después E_m toma valores entre 0 y 1, interpretándose que para valores cercanos a 0 la eficiencia de la micorrización es alta, y valores cercanos a 1 es baja. El índice se calculó mediante la siguiente ecuación: Sean f_0, f_1, \dots, f_k las frecuencias observadas en cada una de las categorías asociadas a los valores 0, 1, 2, de nuestra escala definida. Entonces,

humidity. The experiment lasted eleven months, during which irrigation was performed according to the plant needs until the substrate reached field capacity to avoid the presence of fungal wilting.

A complete randomized experimental design was established with 12 treatments, four varieties, two AMF inoculants, four control groups (without inoculation) and five replicates per treatment. Each experimental unit was one plant. At the end of the experiment – 335 days after sowing (DAS) – the following variables were assessed (1) plant height; (2) dry biomass; (3) leaf phosphorus content; (4) mycorrhizal colonization percentage; (5) mycorrhizal efficiency percentage, with the equation proposed by Colozzi-Filho and Siqueira (1986):

$$Efficiency = \left(\frac{\text{inoculated plant height}}{\text{control plant height}} \times 100 \right) - 100$$

(6) Absorbed phosphorus percentage by mycorrhizae, according to the equation proposed by Sieverding (1991):

$$PI (\%) = \left(\frac{\text{Inoculated plant biomass} \times 100}{\text{Control plant biomass}} \right) - 100$$

and (7) Health, leaf harm caused by *Phoma costarricensis* and chlorosis (yellowing due to nutrient deficiency) (Rivera, 1991), measuring five plants by means of a subjective scale. The averages to constitute and index named (mycorrhization efficiency index) were calculated by utilizing an adaptation of Likert scale (Bertram, 2007). Such index takes values from 0-5; the smaller this value is, the greater benefit it indicates and should be interpreted as a quantitative summary associated to frequency distribution starting from our scale (Table 1).

Normalizing the indicator was useful; its value was divided by 5, in such a way that subsequently E_m takes values from 0-1, interpreting that for values closer to 0 where mycorrhization efficiency is higher, and values closer to 1 are lower. The index was calculated by the following equation: Where f_0, f_1, \dots, f_k are the observed frequencies in each one of the categories associated to the values 0, 1, 2, of the defined scale in this study. Then,

$$E_m = \frac{1}{nk} \sum_{j=1}^k j f_j$$

Cuadro 1. Escala subjetiva para la evaluación de la sanidad y vigor de la plántula de café (adaptación de una escala propuesta por Rivera, 1990).**Table 1. Subjective scale to evaluate coffee seedling health and vigor (adapted from a scale proposed by Rivera, 1990).**

Sanidad / Health		Clorosis / Chlorosis	
0	Plantas sanas / Healthy plants	0	Plantas de color verde intenso / Intense green color plants
1	Plantas con daño en un 5% / Plant with 5% damage	1	Plantas verdes no intenso / Not-intense green color plants
2	Plantas con un 20% de follaje dañado / Plants with 20% leaf damage	2	Plantas verdes / Green plants
3	Plantas con un 40% de daño / Plants with 40% damage	3	Plantas verdes limón / Lemon-green plants
4	Plantas con más de 60% de daño / Plants with 60% damage	4	Plantas semi amarillas / Semi-yellow plants
5	Plantas con más de 80% de daño / Plants more than 80% damage	5	Plantas amarillas / Yellow plants

$$E_m = \frac{1}{nk} \sum_{j=1}^k j f_j$$

donde: $n = \sum_{j=0}^k f_j$ corresponde al total de observaciones (plantas). En este caso, $y k = 5$ y $n = 15$.

El presente índice fue diseñado específicamente para el análisis de los datos obtenidos en esta investigación. No hay antecedente de un índice como el que aquí se utiliza y resultó una herramienta útil para el análisis de este tipo de datos, generados a partir de escalas subjetivas.

Después de realizar las pruebas de normalidad, se efectuó un análisis de varianza y se hizo una prueba de comparación de medias (Tukey ($P \leq 0.05$), con el software SAS versión 9.0 (SAS, 2000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Altura de las Plantas

Al evaluar altura de las plantas en las cuatro variedades de café con respecto a las plantas testigo, la inoculación del consorcio CMgrp dio como resultado plantas con mayor altura (Figura 1). Para esta variable, el efecto entre ambos inoculantes fue diferencial, sobre todo con respecto a la variedad de café inoculada. El inóculo *R. aggregatus* tuvo un efecto mínimo en esta variable en las variedades garnica y catuaí (Figura 1). Adriano-Anaya *et al.*, 2011, inoculó la variedad bourbon con *Rhizophagus intrarradices* cultivado en

where: $n = \sum_{j=0}^k f_j$ corresponds to the total observations (plants). In this case, $k = 5$ and $n = 15$.

This index was designed specifically for the analysis of the data obtained in this research study. No background exists of an index such as the one used in this study.

After the normality tests, an analysis of variance (ANOVA) and Tukey's ($P \leq 0.05$) comparison of means (honestly significant difference, HSD) tests were performed with software SAS version 9.0 (SAS, 2000).

RESULTS AND DISCUSSION

Plant Height

When plant height of the four coffee varieties was assessed and compared with respect to the control plants, the inoculation of the CMgrp consortium gave as a result plants with greater height (Figure 1). For this variable, the effect among both inoculants was different, above all, with respect to the inoculated coffee variety. The inoculant *R. aggregatus* had a minimum effect in this variable in the varieties Garnica and Catuaí (Figure 1). Adriano-Anaya *et al.*, 2011 inoculated the var. Bourbon with *Rhizophagus intrarradices* cultivated in transformed roots, but no effect was observed in this variable.

Ibarra-Puón *et al.* (2014) tested the same AMF but in *Coffea canephora* (Robusta), where plant height

raíces transformadas, pero no observó un efecto en esta variable.

Ibarra-Puón *et al.* (2014) probaron la misma especie de HMA, pero en *Coffea canephora* (Robusta), donde la altura de la planta incrementó en comparación con el control a los 140 días después de la inoculación. Estos resultados pueden indicar una cierta preferencia de especies de HMA a variedades o especies de café, aunque la influencia de la forma de producción del inóculo podría ser un factor a estudiar. También se podría esperar que el factor tiempo, tiene influencia en los resultados observados.

El efecto de inoculantes micorrízicos sobre café en altura se ha documentado con distintos consorcios de

increased when compared to control at 140 days after inoculation. These results may indicate a certain preference of AMF species for coffee species although the influence in the form of the inoculant, production could be a factor to study in a near future. Furthermore, the time factor could also have an influence in the results observed.

The effect of the mycorrhizal inoculants on coffee with respect to height has been documented with different AMF consortia. Del Aguila *et al.*, 2018, applied nine mycorrhizal consortia in coffee plants of the var. Caturra although the species in the consortia were not reported. The increase in this variable may be related to obtaining phosphorus by the inoculants.

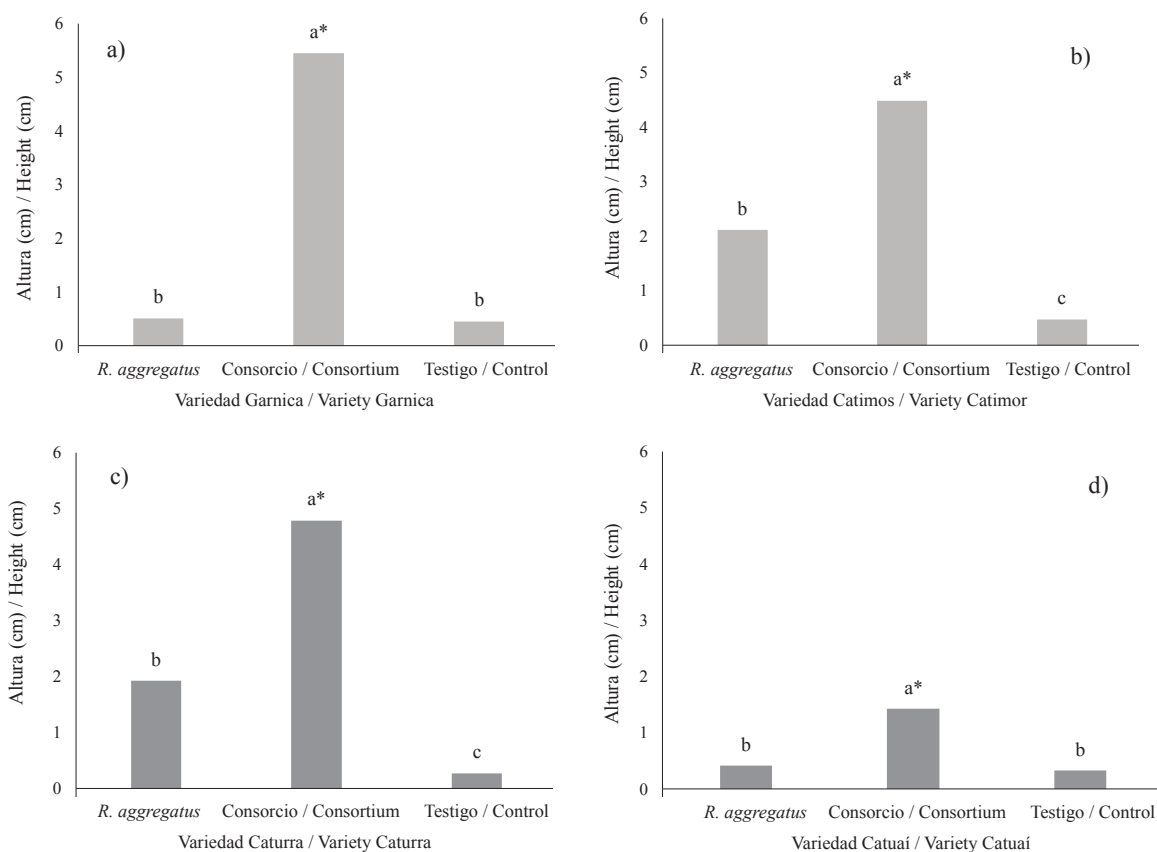


Figura 1. Altura de plantas de café de variedad a) Garnica, b) Catimor, c) Caturra y d) Catuaí, inoculadas con dos inóculos micorrízicos *Rhizophagus aggregatus* y el consorcio, respecto a las plantas testigo, a 335 dds. *Letras distintas en la misma figura, indican diferencias significativas (Tukey $P \leq 0.05$). Consorcio = CMgrp (*Glomus claroides*, *Rhizophagus diaphanus* y *Paraglomus albidum*).

Figure 1. Plant height of coffee varieties (a) Garnica, b) Catimor, (c) Caturra, and (d) Catuaí inoculated with two mycorrhizal inoculants *Rhizophagus aggregatus* and the consortium compared with the control plants at 335 days after sowing (DDS). *Different letters in the same figure indicate significant differences (Tukey's $P \leq 0.05$) test. Consortium = CMgrp (*Glomus claroides*, *Rhizophagus diaphanus*, and *Paraglomus albidum*).

HMA, Del Aguila *et al.*, 2018, aplicó nueve consorcios micorrízicos en plantas de café de la variedad caturra, aunque no reportan las especies presentes en los consorcios. El incremento en esta variable, podría estar relacionada a la obtención de fósforo por parte de los inoculantes.

Materia Seca

La variable materia seca, también se influyó por la inoculación micorrízica, sobre todo cuando se inoculó con el consorcio CMgrp con pesos que fluctuaron de 1.4 a 5.45 g, para todas las variedades. La única variedad donde el efecto fue menor, aunque significativo, se observó con catuaí (Figura 2).

Dry Biomass

The dry biomass variable was also influenced by the mycorrhizal inoculation, above all, when it was inoculated with the CMgrp consortium with weight fluctuating from 1.4-5.45 g for all the varieties. The only one where the effect was lower, although significantly, was observed on the var. Catuaí (Figure 2).

Dry biomass is one of the most measured growth and development variables in coffee to analyze the mycorrhizal effect as biofertilizer (Ibarra-Puón *et al.*, 2014) because it allows calculating the variation among genotypes, environment and management – factors that generate modifications in biomass accumulation (Di Benedetto and Tognetti, 2016).

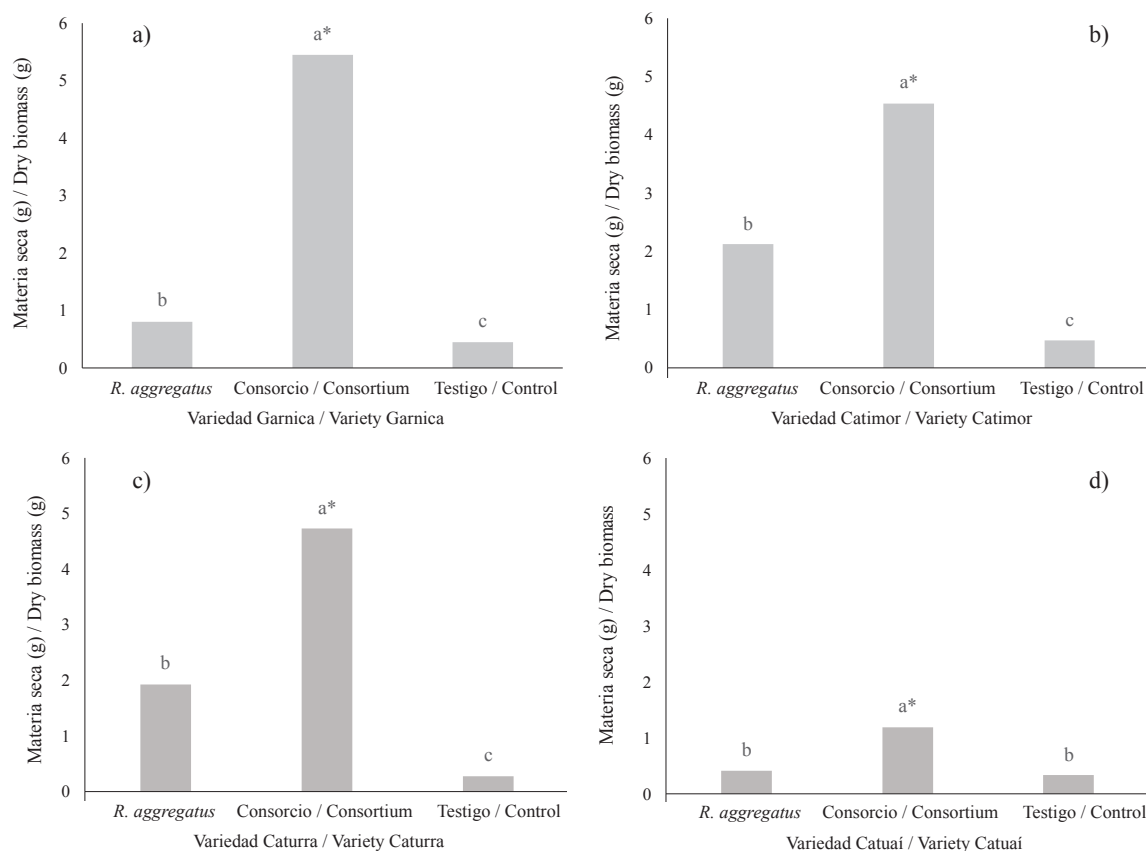


Figura 2. Materia seca en plantas de café de variedad a) Garnica, b) Catimor, c) Caturra y d) Catuaí, inoculadas con dos inóculos micorrízicos *Rhizofagus aggregatus* y el consorcio, respecto a las plantas testigo, a 335 dds. *Letras distintas en la misma figura, indican diferencias significativas (Tukey $P \leq 0.05$). Consorcio = CMgrp (*Glomus claroides*, *Rhizophagus diaphanus* y *Paraglomus albidum*).

Figure 2. Dry biomass in coffee plants varieties (a) Garnica, (b) Catimor, (c) Caturra, and (d) Catuaí with two mycorrhizal inoculations (1) *Rhizofagus aggregatus* and (2) the consortium, compared with the control plants at 335 days after sowing (DDS). *Different letters in the same figure indicate significant differences (Tukey's $P \leq 0.05$) test. Consortium = CMgrp (*Glomus claroides*, *Rhizophagus diaphanus*, and *Paraglomus albidum*).

La materia seca es una de las variables de crecimiento y desarrollo más medidas en plantas de café para analizar el efecto de la micorriza como biofertilizante (Ibarra-Puón *et al.*, 2014). Lo anterior es porque permite calcular las variaciones entre genotipos, el ambiente y el manejo; factores que generan modificaciones en la acumulación de biomasa (Di Benedetto y Tognetti, 2016).

Aguirre-Medina *et al.*, 2011, observaron que la inoculación con *Rhizophagus intraradices* no mostró variación en esta variable, incluso cuando evaluaron el peso seco en raíz, tallo y hojas de plantas de café variedad oro azteca muestreadas de los 60 a 210 días después de la siembra.

Por otro lado, Adriano-Anaya *et al.* (2011), evaluaron el efecto de *Rhizophagus intraradices* en plantas de café variedad Bourbon a los 112 días después de la inoculación; cuando evaluaron el peso seco de la raíz y el follaje, hallaron incrementos de 118 a 141% con respecto a las plantas testigo. En ambos estudios, se observa que la eficiencia del hongo micorrízico como biofertilizante en cuestión de crecimiento, depende de la variedad del café y del inoculante micorrízico.

Contenido de Fósforo en Hojas

La inoculación de HMA tuvo un efecto en el incremento del contenido de fósforo total, teniendo resultados diferenciales en función de la fuente de inóculo y la variedad de café. Los valores con mayor contenido de fósforo se presentaron en la variedad catimor, incluso en el tratamiento no inoculado. Los incrementos de fósforo con la inoculación de los HMA, fueron 0.16 mg kg^{-1} (con *R. aggregatus*) y 0.15 mg kg^{-1} (con CMgrp) (Figura 3).

Ibarra-Puón *et al.* (2014) reportaron que la concentración de fósforo en plantas de café fueron 0.014% superiores en los tratamientos inoculados con *Rhizophagus intraradices* (0.045%) a 140 días después del trasplante, en comparación con el tratamiento testigo (0.031%).

En cultivos como la papaya, Quiñones-Aguilar *et al.* (2012) mencionan que las hifas de los hongos micorrízicos arbusculares son capaces de captar y transportar el fósforo del suelo hacia las partes superiores de las plantas en tierras pobres o sin fertilizar, lo que podría explicar el incremento.

Aguirre-Medina *et al.*, 2011 observed that *Rhizophagus intraradices* inoculation did not show variation in this variable in coffee plants var. Oro Azteca even when dry root, stem, and leaf dry weight were evaluated from 60-210 DAS.

On the other hand, Adriano-Anaya *et al.* (2011) assessed the effect of *Rhizophagus intraradices* in coffee plants var. Bourbon at 112 days after inoculation when they evaluated dry root weight and leaves, finding increments from 118-141% compared to the control plants. In both studies, mycorrhizal fungus efficiency as biofertilizer was observed in growth depending on the variety of coffee and mycorrhizal inoculant.

Leaf Phosphorus Content

Inoculation of the AMF had effect on increasing total phosphorus content, having differential results in function of the inoculant source and coffee variety. The values with greater phosphorus content were observed in the var. Catimor, which increased with the AMF inoculation with 0.16 mg kg^{-1} (*R. aggregatus*) and 0.15 mg kg^{-1} (CMgrp) even in the non-inoculated treatment (Figure 3).

Ibarra-Puón *et al.* (2014) reported that phosphorus concentration in coffee plants was 0.014% higher in the treatments inoculated with *Rhizophagus intraradices* (0.045%) at 140 days after transplant (DAT), compared with the control group (0.031%).

In papaya cultivation, Quiñones-Aguilar *et al.* (2012) mentioned that the AMF hyphae are capable of capturing and transporting soil phosphorus towards higher parts of the plants in poor soil or without fertilizer, which could explain the increase.

Perea-Rojas *et al.* (2018) studied the importance of the AMF consortium in phosphorus transformation and absorption processes in coffee plants, finding greater leaf phosphorus concentration in the var. Garnica in treatments of plants inoculated with the mycorrhizal consortium and phosphorus solubilizing fungi. This study showed that despite the availability of this element in soil, the presence of the AMF was determinant to translocate phosphorus to the plant parts.

Aguirre-Medina *et al.* (2011) measured an increase in phosphorus at 150 DAS in coffee var. Oro Azteca inoculated with *Rhizophagus intraradices* although this effect was not constant throughout the measurements from 60-210 DAS.

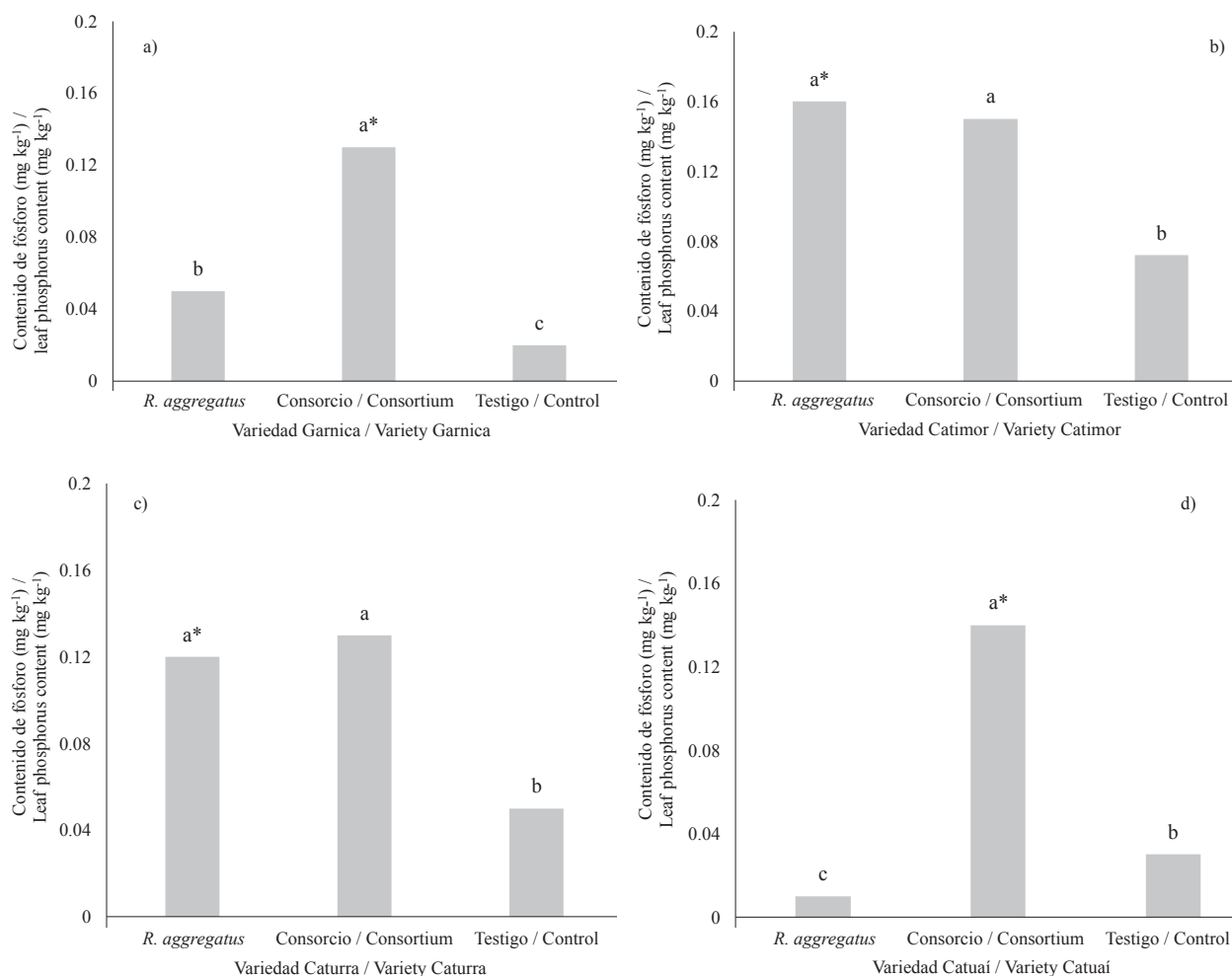


Figura 3. Contenido de fósforo en hojas de café de variedad a) Garnica, b) Catimor, c) Caturra y d) Catuaí, inoculadas con dos inóculos micorrízicos *Rhizophagus aggregatus* y el consorcio, respecto a las plantas testigo, a 335 dds. *Letras distintas en la misma figura indican diferencias significativas (Tukey $P \leq 0.05$). Consorcio = CMgrp (*Glomus claroides*, *Rhizophagus diaphanus* y *Paraglomus albidum*).

Figure 3. Leaf phosphorus content of coffee varieties (a) Garnica, (b) Catimor, (c) Caturra, and (d) Catuaí inoculated with two mycorrhizal inoculants (1) *Rhizophagus aggregatus* and (2) the consortium compared with control at 335 days after sowing (DDS). *Different letters in the same figure indicate significant differences (Tukey's $P \leq 0.05$) test. Consortium = CMgrp (*Glomus claroides*, *Rhizophagus diaphanus*, and *Paraglomus albidum*).

La importancia de los consorcios micorrízicos arbusculares en los procesos de transformación y absorción de fósforo en plantas de café, fue estudiado por Perea-Rojas *et al.* (2018), quienes, encontraron la mayor concentración de fósforo foliar en plantas de la variedad garnica en los tratamientos de plantas inoculadas con un consorcio micorrízico y hongos solubilizadores de fósforo. Este trabajo mostró que pese a haber disponibilidad de este elemento en el suelo, la presencia del hongo micorrízico arbuscular es determinante para traslocarlo a la parte vegetativa.

Mycorrhizal Colonization

The highest colonization percentages were obtained with the CMgrp consortium, which fluctuated from 15.44% (in var. Catuaí) to 34.32% (in var. Garnica); the latter was the variety that best responded to the inoculation with the CMgrp consortium. Although the colonization percentages were lower than those obtained with the mycorrhizal consortium, *R. aggregatus* originated significant values of 9.7% in the var. Garnica and 23.5% in the var. Catimor –

Aguirre-Medina *et al.* (2011), midieron un incremento en fósforo a los 150 días después de la siembra en oro azteca inoculado con *Rhizophagus intraradices*, aunque este efecto no fue constante a lo largo de las mediciones, de 60-210 días después de la siembra.

Colonización Micorrízica

Los porcentajes más altos de colonización se obtuvieron con el consorcio CMgrp, los cuales fluctuaron de 15.44% (en la variedad catuai), a 34.32% (en la variedad garnica), esta última fue la variedad que respondió mejor a la inoculación con CMgrp. Aunque los porcentajes de colonización fueron menores a los obtenidos con el consorcio micorrízico, *R. aggregatus* originó valores significativos, de 9.7% en la variedad garnica a 23.5% en la variedad catimor; variedad con la mejor respuesta a la inoculación con *R. aggregatus* (Cuadro 2).

Varios estudios muestran la dependencia micorrízica de las plantas de café, sobre todo en suelos poco fértiles; Tristão *et al.* (2006) mencionan que, para estas plantas la simbiosis micorrízica es extremadamente importante, sobre todo en suelos donde las condiciones son desfavorables: estrés hídrico, alto contenido de sales, suelos degradados y contaminados.

the variety with the best response to inoculation with *R. aggregatus* (Table 2).

Several studies have shown the mycorrhizal dependence on coffee plants, above all on less fertile soils. Tristão *et al.* (2006) mentioned that for these plants mycorrhizal symbiosis is extremely important, especially in soils where conditions are unfavorable – hydric stress, high salt content, degraded and contaminated soils.

Efficiency of the different inoculants is one of the parameters that should be considered when selecting them for their use in coffee plants, taking into account different examples, such as *Gigaspora margarita* (Tristão *et al.*, 2006), *Rhizophagus intraradices* (Ibarra-Puón *et al.*, 2014), and mycorrhizal consortia (Del Aguila *et al.*, 2018).

Despite mycorrhizal colonization percentage is one of the most measured variables, it does not guarantee an increase in the plant morphological and physiological variables. An example that supports this argument may be observed in Aguirre-Medina *et al.* (2011) where at 90 DAS, the colonization percentage in the treatments with *Glomus intraradices* did not go beyond 18%; however, the increase in dry biomass compared with the control was 307 and 116% in phosphorus content.

Current data reported by Del Aguila *et al.* (2018) highlighted mycorrhizal colonization from 13-31.3%

Cuadro 2. Eficiencia de la simbiosis *Rhizophagus aggregatus* micorriza-café y disponibilidad de fósforo.
Table 2. Efficiency of *Rhizophagus aggregatus* mycorrhizal-coffee symbiosis and phosphorus availability.

Variedad / Variety	Inoculante micorrízico / Mycorrhizal inoculant	Colonización micorrízica / Mycorrhizal colonization	Eficiencia micorrízica / Mycorrhizal efficiency	Fósforo disponible por la micorrización / Available phosphorus by mycorrhization
		----- % -----		
Garnica	<i>R. aggregatus</i>	9.7b	13b	80b
	CMgrp	34.32a	1110a	1111a
Catimor	<i>R. aggregatus</i>	23.5a	351b	350b
	CMgrp	27.4a	855a	855a
Caturra	<i>R. aggregatus</i>	10.40b	610b	614b
	CMgrp	16.53a	1670a	1651a
Cataui	<i>R. aggregatus</i>	0.10b	24b	24b
	CMgrp	15.44a	333a	260a

La eficiencia de los distintos inóculos es uno de los parámetros que se debe considerar cuando se seleccionan para uso en plantas de café, tomando en cuenta distintos ejemplos en *Gigaspora margarita* (Tristão *et al.*, 2006), *Rhizophagus intraradices* (Ibarra-Puón *et al.*, 2014), y consorcios micorrízicos (Del Aguila *et al.*, 2018).

Pese a ser una de las variables más medidas, altos porcentajes de colonización micorrízica no garantizan un incremento en las variables morfológicas y fisiológicas de las plantas. Un ejemplo que soporta este argumento se observa en el trabajo de Aguirre-Medina *et al.* (2011), donde a 90 días después de la siembra, el porcentaje de colonización en los tratamientos con *Glomus intraradices* no superaron el 18%; sin embargo, el incremento en la materia seca con respecto al testigo fue de 307 y 116% en contenido de fósforo.

Datos actuales, expuestos por Del Aguila *et al.* (2018) señalan porcentajes de colonización micorrízica de 13 a 31.3%, e incrementos con respecto al testigo para la variable biomasa seca (raíz y hoja) de 566%. En tanto, Adriano-Anaya *et al.* (2011) obtuvieron porcentajes de colonización de 6.6 a 16.3% en plantas inoculadas e incrementos de 41.3% (raíz) y 17.3% (hojas) respecto al tratamiento testigo para la variable peso seco. Los resultados anteriores se justifican porque se ubica que el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos dependerá de la eficiencia micorrízica. Al respecto, Aguirre-Medina *et al.* (2011) citan que el establecimiento inicial del hongo micorrízico en plantas de café puede ser lento, por lo que su efecto en la promoción del desarrollo vegetal responde de la misma forma.

Eficiencia Micorrízica

El consorcio CMgrp promovió el mayor porcentaje de eficiencia micorrízica en las cuatro variedades de café con intervalos de 333 % en la variedad catuaí a 1670%, en la variedad caturra, con respecto a las plantas que no se trataron (testigo). El hongo *R. aggregatus*, originó valores de 13% (en la variedad garnica) a 610% (en la variedad caturra) (Cuadro 2). La respuesta benéfica de los hongos micorrízicos arbusculares se define como efectividad, esta capacidad promueve el crecimiento y la nutrición de las plantas y estará definida por la diversidad de especies utilizadas y por la procedencia de su aislamiento (Trejo *et al.*, 2011).

and increments with respect to the control for the dry biomass variable (root and leaf) 566%; whereas Adriano-Anaya *et al.* (2011) obtained colonization percentages from 6.6-16.3% in inoculated plants and increments of 41.3% (root) and 17.3% (leaves) compared to the control for the dry weight variable. The previous results are justified because growth, development, and yield of the cultivation depend on mycorrhizal efficiency. To this respect, Aguirre-Medina *et al.* (2011) quoted that the initial establishment of the AMF in coffee plants may be slow, which is why its effect on plant development promotion responds in the same manner.

Mycorrhizal Efficiency

The CMgrp consortium promoted the greatest mycorrhizal efficiency percentage in the four coffee varieties with intervals from 333% in var. Catuaí to 1670% in var. Caturra, compared to non-treated plants (control). The fungus *R. aggregatus*, originated values from 13% (in var. Garnica) to 610% (in var. Caturra) (Table 2). The beneficial response of the AMF is defined as effectiveness; this capacity promotes plant growth and is determined by the species diversity used and origin of its isolation (Trejo *et al.*, 2011). Coffee plants establish mycorrhizal symbiosis naturally; their efficiency depends on the fungus species, plant (variety), environment, substrate (Rivera, 2010), and soil (nutrient content, mainly phosphorus) (Gadea and Peña, 2013).

In this study, the var. Caturra obtained the greatest mycorrhizal percentage, which was reflected in the highest values for coffee plants for the variables plant height (4.79 cm), dry biomass (4.73 g) and average values in phosphorus content (0.13 mg kg⁻¹) (Figures 1, 2, 3). With these results, we may conclude that the mycorrhizal CMgrp consortium promoted growth, development, and phosphorus absorption in plants.

Assessing mycorrhizal efficiency in this research study was relevant because the best symbiosis plant-fungus (Garnica-CMgrp and Caturra-CMgrp) was found between two mycorrhizal inoculants and four coffee varieties of economic importance for Mexico. To this respect, Tristão *et al.* (2006) mentioned that in coffee plant production, locating the mycorrhizal fungi that show elevated efficiency, greater competitiveness, and soil adaptation is a priority.

Las plantas de café establecen simbiosis micorrízica de manera natural, la eficiencia dependerá de la especie de hongo, de la planta (variedad), del medio ambiente, del sustrato (Rivera, 2010), y del suelo (contenido de nutrimentos, principalmente del fósforo) (Gadea y Peña, 2013).

En el presente trabajo, la variedad caturra fue la que obtuvo el mayor porcentaje de eficiencia micorrízica y reflejó en las plantas de café los valores más altos para las variables altura de la planta (4.79 cm) y materia seca (4.73 g) y valores de medio a alto en contenido de fósforo (0.13 mg kg^{-1}) (Figura 1, 2, y 3). Con estos resultados se concluye que el consorcio micorrízico CMgrp promovió el crecimiento, desarrollo y absorción de fósforo en las plantas.

Evaluar la eficiencia micorrízica en esta investigación fue relevante, porque se logró ubicar entre dos inóculos micorrízicos y cuatro variedades de café de importancia económica para México, la mejor simbiosis planta-hongo (garnica-CMgrp y caturra-CMgrp). Al respecto, Tristão *et al.* (2006), mencionan que en la producción de plantas de café es prioritario ubicar los hongos micorrízicos que presenten elevada eficiencia simbiótica, mayor competitividad y mayor adaptación al suelo.

Fósforo Disponible por la Micorrización

Para las cuatro variedades de café, los mayores porcentajes de fósforo disponible por la micorrización (de 260 a 1651%) se obtuvieron con el consorcio CMgrp. El inóculo *R. aggregatus* también originó porcentajes importantes (de 24 a 614%) ambos inóculos respondieron mejor en la variedad caturra (Cuadro 2). Los inóculos micorrízicos utilizados en la presente investigación favorecieron la traslocación de fósforo, ya que el contenido de este elemento en las hojas fue mayor en las plantas inoculadas (Figura 3).

La variable porcentaje de fósforo disponible por la micorrización, se determina para ubicar al hongo más eficiente para que un hospedero aumente su eficiencia en la absorción de nutrimentos. En consecuencia, en campo se reducirá la aplicación de fertilizantes de origen inorgánico. Balota *et al.* (2011), mencionan que las plantas inoculadas con hongos micorrízicos presentan mayor eficiencia de uso de fósforo en la raíz, que significa, mayor captación de P y su transferencia. Rivera (2010) cita que, para lograr una micorrización

Available Phosphorus by Mycorrhization

The greatest available phosphorus percentages (260-1651%) by mycorrhization for the four coffee varieties were obtained with the CMgrp consortium. The inoculant *R. aggregatus* also originated important percentages (24-614%); both inoculants responded better in the var. Caturra (Table 2). The mycorrhizal inoculants used in this research study favored phosphorus translocation since the content of this element in leaves was greater than in the inoculated plants (Figure 3).

The available phosphorus percentage variable by mycorrhization was determined to find the most efficient fungi for a host to increase its efficiency in nutrient absorption, consequently reducing inorganic fertilizers in field. Balota *et al.* (2011) mentioned that inoculated plants with mycorrhizal fungi showed greater efficiency in the use of phosphorus in root, which means greater P capture and its transference. Rivera (2010) quoted that to achieve an effective mycorrhization in coffee plants and in soils, it was necessary to inoculate an efficient arbuscular mycorrhizal fungus. Therefore, searching for the best plant-fungus symbiosis is necessary to guarantee growth and develop healthy and vigorous plants.

Plant Health

Table 3 shows the E_m Index and the varieties Garnica, Catimor, and Caturra with the lowest harm indices – showing values close to 0 according to the scale from 0.14 +/- 0.24 established – when they were inoculated with the CMgrp consortium. Although the var. Catuaí had values closer to 1 with the CMgrp, it showed differences when compared with the control. Evidently, the effect of a monospecific inoculant, as *R. aggregatus*, reported lower E_m indices than the control. The E_m indices for chlorosis did not report differences in the var. Catuaí, which showed a similar health tendency as the other varieties and the mycorrhizal inoculants.

The subjective scales were used as a tool to assess some variables without destroying the plants; similar classes or scales have been adopted in mycorrhizal symbiosis studies (Sieverding, 1991; Rosendahl and Rosendahl, 1991; Raghavendra-Kumar *et al.*, 2018; Ren *et al.*, 2018).

efectiva en plantas de café y en los suelos, es necesario inocular una cepa eficiente de hongos micorrízicos arbusculares. Por lo que, la búsqueda de la mejor simbiosis planta-hongo será necesaria para garantizar el crecimiento y desarrollo de plantas sanas y vigorosas.

Sanidad de las Plantas

En el Cuadro 3 se presenta el índice E_m , y se observa que las variedades garnica, catimor y caturra, presentaron los más bajos índices de daño, valores cercanos a 0 de acuerdo a la escala establecida, entre 0.14 +/- 0.24, cuando fueron inoculadas con el consorcio CMgrp. Aunque la variedad catuaí tuvo valores más cercanos a 1 con el CMgrp, sí presenta diferencias con respecto al testigo. Es evidente que el efecto de un inoculante monoespecífico como *R. aggregatus* reportó índices E_m menores que el testigo. Los índices E_m para clorosis no reportaron diferencias en la variedad catuaí, se observa una tendencia similar a la sanidad con las otras variedades y los inoculantes micorrízicos.

Las escalas subjetivas son utilizadas como una herramienta para evaluar algunas variables sin llevar a cabo la destrucción de plantas. Clases o escalas similares las adoptaron en estudios de la simbiosis

This study normalized the data obtained in the subjective scale, which allowed developing the E_m Index that demonstrated a similar tendency to quantitative data (Figures 1, 2, 3); the results showed that the production of coffee plants inoculated with the CMgrp consortium experienced less harm by *P. costarricensis*, which has also been demonstrated by several authors who pointed out that the presence of mycorrhizal fungi granted plants tolerance or resistance to harm by pathogens (Plouznikoff *et al.*, 2019; El-Sharkawy *et al.*, 2018; Trejo Aguilar *et al.*, 2018). The data obtained in this study show that not all the varieties responded to the mycorrhizal inoculation, so other coffee varieties should be assessed in future studies.

CONCLUSIONS

- The highest colonization percentage was obtained in the var. Garnica, but the greatest mycorrhizal efficiency and available phosphorus percentage were obtained in the var. Caturra. The E_m Index showed that the coffee plants inoculated with the CMgrp consortium showed the least damage.
- The use of the mycorrhizal consortium formed by the fungi *Glomus claroides* + *Rhizophagus diaphanus* + *Paraglomus albidum* (CMgrp) increased the

Cuadro 3. Índice E_m en cuatro variedades de café por efecto de dos inoculantes micorrízicos.
Table 3. Index E_m in four coffee varieties by the effect of two mycorrhizal inoculants.

Variedad / Variety	Inoculante micorrízico / Mycorrhizal inoculant	Índice E_m / Index E_m	
		Sanidad / Health	Clorosis / Chlorosis
Garnica	<i>R. aggregatus</i>	0.88	0.37
	CMgrp	0.46	0.14
	Control	0.86	0.36
Catimor	<i>R. aggregatus</i>	0.73	0.36
	CMgrp	0.65	0.24
	Control	0.58	0.4
Caturra	<i>R. aggregatus</i>	0.6	0.36
	CMgrp	0.45	0.14
	Control	0.76	0.4
Catuaí	<i>R. aggregatus</i>	0.7	0.4
	CMgrp	0.69	0.4
	Control	0.97	0.4

micorrízica (Sieverding, 1991; Rosendahl y Rosendahl, 1991; Raghavendra-Kumar *et al.*, 2018; Ren *et al.*, 2018).

En este trabajo la normalización de los datos obtenidos en la escala subjetiva, permitió desarrollar el índice E_m que mostró una tendencia similar a los datos cuantitativos (Figuras 1, 2 y 3). En este estudio se demostró que la producción de plantas de café inoculadas con el consorcio CMgrp, presentaron menor daño por *P. costarricensis*, esto se ha demostrado por diversos autores, quienes señalan que la presencia de los hongos micorrízicos otorgan a la planta tolerancia o resistencia a daños por patógenos (Plouznikoff *et al.*, 2019; El-Sharkawy *et al.*, 2018; Trejo-Aguilar *et al.*, 2018). Los datos obtenidos muestran que no todas las variedades respondieron a la inoculación micorrízica, por lo que se sugiere probar en otras variedades de café.

CONCLUSIONES

- El porcentaje de colonización más alto se obtuvo en la variedad garnica, pero la mayor eficiencia micorrízica y el mayor porcentaje de fósforo disponible por la micorrización se obtuvieron en la variedad caturra. El índice E_m mostró que, la producción de plantas de café inoculadas con el CMgrp presentó menor daño.

- El uso de un consorcio micorrízico formado por los hongos *Glomus claroides* + *Rhizophagus diaphanus* + *Paraglomus albidum* (CMgrp) incrementó las variables altura de la planta, materia seca y contenido de fósforo con respecto a las plantas no inoculadas. La eficiencia micorrízica en plantas de café debe tomarse en cuenta cuando se elige un inoculante con respecto a la variedad de la planta. Para la variedad caturra, el inoculante con mayor eficiencia micorrízica en cuanto a fósforo disponible fue el consorcio CMgrp. El uso del consorcio en las variedades de catimor, garnica, catuaí y caturra es recomendable en comparación con el uso de un inoculante de una sola especie, como el de *Rhizophagus aggregatus*.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a H. F. Coronel-Brizio, la colaboración en el análisis de datos y apoyo para la definición del Índice de eficiencia de la micorrización, propuesto en este trabajo.

-Fin de la versión en español-

variables plant height, dry biomass, and phosphorus content compared with the non-inoculated plants. The mycorrhizal efficiency in coffee plants should be taken into account when choosing an inoculant with respect to the plant variety. For the var. Caturra, the inoculant with the greatest efficiency with respect to available phosphorus was the CMgrp consortium. Therefore, the consortium should be used in the varieties Catimor, Garnica, Catuaí, and Caturra rather than the use of one inoculant only, as in the case of *Rhizophagus aggregatus*.

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors want to thank H.F. Coronel-Brizio for his collaboration with the data analysis and his suggestion to use the Mycorrhization Efficiency Index.

-End of english version-

REFERENCIAS / REFERENCES

- Adriano-Anaya, M. L., R. Jarquín-Gálvez, C. Hernández-Ramos, M. Salvador-Figueroa y C. T. Monreal-Vargas. 2011. Biofertilización de café orgánico en etapa de vivero en Chiapas, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2: 417-431.
- Aguirre-Medina, J., D. Moroyoqui, A. Mendoza-López, J. Cadena-Iñiguez, C. Avendaño-Arrazate y J. Aguirre-Cadena. 2011. Hongo endomicorrízico y bacteria fijadora de nitrógeno inoculadas a *Coffea arabica* en vivero. *Agron. Moseoam.* 22: 71-80.
- Balota, E. L., O. Machineski e S. N. M. Colauto. 2011. Resposta da acerola à inoculação de fungos micorrízicos arbusculares em solo com diferentes níveis de fósforo. *Bragantia* 70: 166-175. doi: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000100023>.
- Battini, F., M. Grønlund, M. Agnolucci, M. Giovannetti, and I. Jakobsen I. 2017. Facilitation of phosphorus uptake in maize plants by mycorrhizosphere bacteria. *Sci. Rep.* 7: 4686. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04959-0>.
- Berruti A., E. Lumini, R. Balestrini, and V. Bianciotto. 2016. Arbuscular mycorrhizal fungi as natural biofertilizers: Let's benefit from past successes. *Front. Microbiol.* 6: 1559. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01559>.
- Bolaños B., M. M., C. A. Rivillas y S. Suarez. 2000. Identificación de micorrizas arbusculares en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 51: 245-262.
- Colozzi-Filho, A. y J. O. Siqueira. 1986. Micorrizas vesículo-arbusculares em mudas de cafeeiro. I. Efeitos de *Gigaspora margarita* e edubacão fosfatotada no crescimento e nutrição. *Rev. Bras. Ciênc. Solo Campinas*, 10: 199-205.

- Contreras, J., I. Acevedo y A. Escalona. 2017. Efecto del vermicompost sobre el crecimiento de plántulas de café (*Coffea arabica*). Rev. Unell. Cienc. Tecnol. 26: 14-21.
- Del Aguila, K. M., G. Vallejos-Torres, L. A. Arévalo y A. G. Becerra. 2018. Inoculación de consorcios micorrízicos arbusculares en *Coffea arabica*, variedad caturra en la Región San Martín. Inf. Tecnol. 29: 137-146. doi: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000100137>.
- Di Benedetto, A. y J. Tognetti. 2016. Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. Rev. Invest. Agropec. 42: 258-282.
- El-Sharkawy, H. H., Y. M. Rashad, and S. A. Ibrahim. 2018. Biocontrol of stem rust disease of wheat using arbuscular mycorrhizal fungi and *Trichoderma* spp. Physiol. Mol. Plant Pathol. 103: 84-91. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmp.2018.05.002>.
- Gadea, P. y W. Peña. 2013. La importancia de la relación entre las micorrizas arbusculares y el fósforo en nuestros suelos. Repert. Cient. 16: 13-21. doi: <https://doi.org/10.22458/rc.v16i1.595>.
- Hernández-Acosta, E., D. Trejo-Aguilar, F. Ferrera-Cerrato, A. Rivera-Fernández y M. C. González-Chávez. 2018. Hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento de café (*Coffea arabica* L.) variedades garnica, catimor, caturra y catuaí. Agroproductividad 11: 61-67.
- 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. Rev. Chapingo. Serie Hort. 20: 201-213. doi: <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.09.027>.
- Jakobsen, I. and E. C. Hammer. 2015. Nutrient dynamics in arbuscular mycorrhizal networks. pp. 91-131. In: T. R. Horton (ed.). Mycorrhizal networks. Ecological studies (Analysis and synthesis). Springer. Dordrecht, Netherlands. Print ISBN: 978-94-017-7394-2.
- Raghavendra-Kumar, M. R., R. Ashwin, and D. J. Bagyaraj. 2018. Screening arbuscular mycorrhizal fungi in order to select the best for alleviating wilt disease complex of capsicum. Proc. Natl. Acad. Sci., India Sect. B Biol. Sci. 88: 679-684. doi: <https://doi.org/10.1007/s40011-016-0804-1>.
- Noriega Altamirano, G., B. Cárcamo Rico, M. A. Gómez Cruz, R. Schwentesius Rindermann, S. Cruz Hernández, J. Leyva Baeza, E. García de la Rosa, U. I. López Reyes y A. Martínez Hernández. 2014. Intensificación de la producción en la agricultura orgánica: caso café. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 5: 163-169.
- Perea-Rojas, Y. C., R. M. Arias, R. Medel-Ortiz., D. Trejo-Aguilar, G. Heredia, and Y. Rodríguez-Yon. 2018. Effects of native arbuscular mycorrhizal and phosphate-solubilizing fungi on coffee plants. Agrofor. Sist. 93: 961-972. doi: <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0190-1>.
- Plouznikoff, K., M. J. Asins, H. D. de Boulois, E. A. Carbonell, and S. Declerck. 2019. Genetic analysis of tomato root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi. Ann. Bot. 124: 933-946. doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcy240>.
- Quiñones-Aguilar, E., E. Hernández-Acosta, G. Rincón-Enríquez y R. Ferrera-Cerrato. 2012. Interacción de hongos micorrízicos arbusculares y fertilización fosfatada en papaya. Terra Latinoamericana 30: 165-176.
- Ren, L., B. Wang, C. Yue, S. Zhou, S. Zhang, H. Huo, and G. Xu. 2019. Mechanism of application nursery cultivation arbuscular mycorrhizal seedling in watermelon in the field. Ann. Appl. Biol. 174: 51-60. doi: <https://doi.org/10.1111/aab.12469>.
- Rivera, F. A. 1990. Variedades de café cultivadas en México. In: INMECAFE (ed.). El cultivo del café en México. México, D.F.
- Rivera, C. R. 2010. Abonos verdes e inoculación micorrízica de posturas de cafeto sobre suelos Fersialíticos Rojos Lixiviados. Cult. Trop. 31: 1-12.
- Rosendahl, C. N. and S. Rosendahl. 1991. Influence of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus* spp.) on the response of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to salt stress. Environ. Exp. Bot. 31: 313-318. doi: [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(91\)90055-S](https://doi.org/10.1016/0098-8472(91)90055-S).
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2016. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. 63 p. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/255627/Planeaci_n_Agr cola_Nacional_2017-2030-_parte_uno.pdf (Consulta: abril 7, 2019).
- SAS Institute. 2000. Software SAS version 8. Nashville Enabled. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Sawers, R. J. H., S. F. Svane, C. Quan, M. Grønlund, B. Wozniak, M. N. Gebrelesassie, E. González-Muñoz, R. A. Chávez Montes, I. Baxter, J. Goudet, I. Jakobsen, and U. Paszkowski. 2017. Phosphorus acquisition efficiency in arbuscular mycorrhizal maize is correlated with the abundance of root-external hyphae and the accumulation of transcripts encoding PHT1 phosphate transporters. New Phytol. 214: 632-643. doi: <https://doi.org/10.1111/nph.14403>.
- Sieverding, E. 1991. Vesicular arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystem. TZ-Verlagsgesellschaft. Federal Republic of Germany. ISBN: 3-88085-462-9.
- Trejo, D., R. Ferrera-Cerrato, R. García, L. Varela, L. Lara y A. Alarcón. 2011. Efectividad de siete consorcios nativos de hongos micorrízicos arbusculares en plantas de café en condiciones de invernadero y campo. Rev. Chil. Hist. Nat. 84: 23-31. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2011000100002>.
- Trejo-Aguilar, 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.
- Tristão, F. S. M., S. A. Lopez de Andrade e A. P. D. Silveira. 2006. Fungos micorrízicos arbusculares na formação de mudas de cafeeiro, em substratos orgânicos comerciais. Bragantia 65: 649-658. doi: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052006000400016>.
- Torreillas, E., M. M. Alguacil, and A. Roldán. 2012. Host preferences of arbuscular mycorrhizal fungi colonizing annual herbaceous plant species in semiarid Mediterranean prairies. Appl. Environ. Microbiol. 78: 6180-6186. doi: <https://doi.org/10.1128/AEM.01287-12>.
- van der Heijden, M. G. A., F. M. Martin, M. A. Selosse, and I. R. Sanders. 2015. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. New Phytol. 205:1406-1423. doi: <https://doi.org/10.1111/nph.13288>.

- Vincenzo, B., N. M. Montaña, E. Chimal, L. Varela, J. Gómez y J. M. Martínez. 2018. Abundancia y riqueza de hongos micorrízicos arbusculares en plantaciones de café de Soconusco, Chiapas, México. *Rev. Biol. Trop.* 66: 91-105. doi: <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v66i1.27946>.
- Weber, O. B. 2014. Biofertilizers with arbuscular mycorrhizal fungi in agriculture. pp. 45-66. *In*: Z. Solaiman, L. Abbott, and A. Varma (eds.). *Mycorrhizal fungi: Use in sustainable agriculture and land restoration*. Springer. ISBN (Print): 1613-3382.
- Zhang, X., B. Chen, and R. Ohtomo. 2015. Mycorrhizal effects on growth, P uptake and Cd tolerance of the host plant vary among different AM fungal species. *Soil Sci. Plant Nutr.* 61: 359-368. doi: <https://doi.org/10.1080/00380768.2014.985578>.