

Efecto de inoculación micorrízica en la etapa productiva del cacao nacional (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonía ecuatoriana

*Mycorrhizal inoculation effect on the productive stage of national cocoa (*Theobroma cacao* L.) in the Ecuadorian Amazon*

Lady Sisalima-Ortega^{1,*}, Vinicio Ruilova² y Mirian Capa-Morocho¹

¹ Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador

² Euroagro, Loja, Ecuador,

* Autor para correspondencia: lady.sisalima@unl.edu.ec

Fecha de recepción del manuscrito: 19/01/2023

Fecha de aceptación del manuscrito: 15/05/2023

Fecha de publicación: 30/06/2023

Resumen—El cacao es uno de los principales productos de exportación del Ecuador, siendo la variedad Nacional la que dio a conocer al país en el mercado mundial por su aroma. Sin embargo, el manejo agronómico actual del cultivo no ha permitido que se desarrolle adecuadamente y que se obtenga el rendimiento potencial de la variedad. La utilización de inóculo de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) podría ayudar a la absorción de nutrientes indispensables para las plantas, a proporcionar mayor resistencia a plagas y a reducir la toxicidad de metales pesados. El presente estudio tuvo como objetivo probar dos cantidades de esporas de HMA (17 600 y 35 200) en diferentes momentos de aplicación (una sola aplicación, aplicaciones mensuales y aplicaciones trimestrales) sobre las plantas de cacao Nacional en etapa productiva en la provincia de Zamora Chinchipe, Ecuador. Se estableció un diseño completamente al azar, con 7 tratamientos (en la que se incluye un control) y 4 repeticiones por tratamiento. Se evaluó: número de flores y cuajado, frutos por planta, característica de frutos y semillas, sanidad del fruto, producción y rendimiento. No se encontró una influencia de los tratamientos en el número de flores por planta, porcentaje de cuajado del fruto, número de frutos e índice de mazorca, pero sí en el peso de frutos y semillas, longitud y diámetro de frutos, número de semillas por fruto, producción y rendimiento. Las aplicaciones mensuales de 17 600 esporas de HMA presentaron los valores más altos en todas las variables. Por lo tanto, la aplicación de HMA podría contribuir a mejorar la producción de cacao en la Amazonía ecuatoriana, y ser utilizada como estrategia de manejo orgánico del cultivo.

Palabras clave—Micorrizas, Dosis y momentos, Variables productivas, Cacao Nacional.

Abstract—Cocoa is one of Ecuador's main export products, being the Nacional variety the one that made the country known in the world market for its aroma. However, the current agronomic management of the crop has not allowed it to develop adequately and obtain the potential yield of the variety. The use of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculum could help the absorption of nutrients essential for plants, provide greater resistance to pests, and reduce the toxicity of heavy metals. The present study aimed to test two amounts of AMF spores (17600 and 35200) at different times of application (single application, monthly and quarterly applications) on Nacional cocoa plants in the productive stage in the province of Zamora Chinchipe, Ecuador. A completely randomized design was established, with 7 treatments (including a control) and 4 replicates per treatment. The following variables were evaluated: number of flowers and fruit set, fruit per plant, fruit and seed characteristics, fruit health, production, and yield. No influence of the treatments was found on the number of flowers per plant, fruit set percentage, number of fruits and pod index, but it was found on fruit and seed weight, fruit length and diameter, number of seeds per fruit, production, and yield. Monthly applications of 17600 AMF spores presented the highest values in all variables. Therefore, the application of AMF could contribute to improve cocoa production in the Ecuadorian Amazon, and be used as a strategy for organic crop management.

Keywords—Mycorrhizae, Doses and timing, Production variables, Cacao Nacional.

INTRODUCCIÓN

El cacao Nacional es considerado un grupo genético particular que dio a conocer al Ecuador en el mercado mundial por sus aromas y sabores característicos, atribuyéndole la denominación de cacao fino y de aroma (Abad et al.,

2020). Estas características se les atribuyen a las condiciones geográficas y climáticas y a la riqueza en recursos biológicos que posee su zona de producción. Según ANECACAO (2021), la superficie sembrada a nivel nacional de cacao Nacional en el Ecuador es de 631 500 hectáreas, mientras que la producción ha alcanzado las 375 000 toneladas con un ren-

dimiento promedio de 0,5 t/ha, considerándose dentro de la media regional (0,55 t/ha) (FAOSTAT, 2022). Una investigación sugirió que el lugar de origen del cacao es Ecuador: se encontraron restos de cacao en la selva Amazónica ecuatoriana que datan de 3300 años antes de Cristo, lo que significa que el cacao se cultiva en Ecuador desde hace más de 5 000 años (Valdez, 2021).

Actualmente, en la región Amazónica los productores cuentan con cosechas anuales que les permiten obtener un sustento económico, sin embargo, existen muchos problemas en los cultivos que limitan obtener un buen producto de exportación (Santos y Gaibor, 2016). Entre estos se puede mencionar la presencia de enfermedades como Moniliasis (*Moniliophthora roreri*), cuyo daño externo es caracterizado por una necrosis, deformación y pudrición en mazorcas, lo que conlleva a la muerte del fruto, y Escoba de bruja causada por el hongo *Moniliophthora perniciosa*, así como la presencia de metales pesados, siendo el de mayor influencia el cadmio (Cd), lo que es un impedimento para la exportación ya que excede las concentraciones permitidas (Ortiz, 2018). Además, existe un mal manejo del cultivo y falta de asistencia técnica para su producción, especialmente en cacao orgánico. La mayoría de productores opta por utilizar productos químicos con efectos negativos en la producción, ya que imposibilitan la correcta nutrición de las plantas, y en la salud del suelo (Santos y Gaibor, 2016). Otros de los problemas que afectan a la región son los suelos muy superficiales de poca fertilidad, ácidos, con deficiencia de nitrógeno, fósforo, calcio y boro, por lo que no producen rendimientos agrícolas aceptables (Moragas, 2018). Por otra parte, la falta de conocimiento y de manejo de los procesos químicos de estos suelos no ha permitido desarrollar un plan de fertilización efectivo (Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Zamora Chinchipe, 2015). Todos estos factores contribuyen a la disminución de la producción y rendimiento de cacao, constituyendo un problema de importancia económica y comercial a nivel local y nacional (Loayza y Zabala, 2018).

Los hongos formadores de micorrizas constituyen un medio importante para la sostenibilidad y aumento de la producción de los cultivos, ya que facilitan la absorción de nutrientes, proporcionan resistencia a plagas y enfermedades y ayudan a reducir la fitotoxicidad de metales pesados presentes en el suelo (Guerra, 2008). Los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) han sido ampliamente utilizados en la producción agrícola (Cuenca *et al.*, 2007; González y Pupo, 2017; Peterson *et al.*, 2004). En el caso de la asociación de *Theobroma cacao* L. con HMA, Leblanc y Márquez (2014) mencionan que los HMA aumentan en la planta la capacidad de absorción de nutrientes minerales del suelo como N, K, Ca, S, Cu, Zn, y principalmente los menos móviles como el P, a través de un aumento de la superficie de absorción de las raíces y del alcance de las raíces de micrositos impenetrables por los pelos radicales, aumentando así la producción de biomasa aérea, de raíces y total. Además, los HMA constituyen una alternativa para contrarrestar el efecto fitotóxico de los metales pesados en el cacao, fitoestabilizando las concentraciones de estos elementos mediante la inmovilización del metal en el micelio del hongo, especialmente en las paredes celulares (Riopedre *et al.*, 2021).

Ballesteros *et al.* (2004) en su estudio de evaluación de HMA en la etapa de almácigo de cacao, encontraron un efec-

to positivo en altura, absorción de fósforo, peso de biomasa seca en la parte aérea y peso de biomasa seca de las raíces, donde las plantas tratadas con micorrizas presentaron valores 40% superiores a los del testigo, aproximadamente. Sin embargo, pocas investigaciones se han realizado para examinar si los HMA pueden mejorar el rendimiento y la calidad del cacao, especialmente bajo las condiciones de la Amazonía ecuatoriana.

Con los antecedentes antes expuestos, el objetivo de la presente investigación fue analizar el efecto de los HMA sobre la etapa productiva y rendimiento en el cultivo de Cacao Nacional aplicados en diferentes cantidades y momentos bajo las condiciones de la Amazonía ecuatoriana, con la finalidad de implementar una herramienta que beneficie a los productores orgánicos de la región y aumente la productividad de sus cultivos de cacao. Además, se determinó el efecto de los HMA en la sanidad del cultivo y en el contenido de Cd en el suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del ensayo

Esta investigación se realizó en la parroquia Guadalupe, provincia de Zamora Chinchipe, Ecuador, a una altitud de 855 m s.n.m., latitud de 3,90° Sur y longitud 78,87° Oeste. La temperatura oscila entre los 20 y 27°C, con precipitación anual de 2300 mm y humedad relativa del 80% (Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Zamora Chinchipe, 2015). Según la clasificación Köppen Geiger, el clima se clasifica como Af, cálido y lluvioso todo el año, sin estaciones (Rubel y Kottek, 2010). La textura del suelo es franca-areno-arcillosa y arcillosa, con pH ácido, y con contenido de materia orgánica entre medio y alto. Esta zona es representativa de la producción de cacao Nacional en la provincia.

Material vegetal

El área de la plantación fue de 1,0 ha con 625 plantas de cacao Nacional de 7 años de edad, sembradas en un marco de plantación de 4 m x 4 m. Los individuos para la investigación se seleccionaron según la homogeneidad en altura, número de ramas principales, vigor y estado fenológico de acuerdo a la escala Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie (BBCH) 51 (Niemenak *et al.*, 2010). El periodo de evaluación fue de 7 meses, desde el 5 de febrero hasta el 5 de septiembre de 2021.

Diseño experimental y tratamientos

La investigación se realizó con un diseño completamente al azar (DCA), con 7 tratamientos y 4 repeticiones por tratamiento (Fig. 1). Los tratamientos incluyeron dos factores con tres niveles de factor cada uno: 1) dosis de micorrizas (0, 17 600, y 35 200 esporas de HMA por planta), y 2) momento de aplicación (una aplicación, aplicaciones mensuales y aplicaciones trimestrales). Los tratamientos fueron: control con 0 esporas (T1), 17 600 esporas de HMA en una sola aplicación (T2), 17 600 esporas de HMA aplicadas cada mes (T3), 17 600 esporas de HMA aplicadas cada tres meses (T4), 35 200 esporas de HMA en una sola aplicación (T5), 35 200 esporas de HMA aplicadas cada mes (T6) y 35 200 esporas de HMA

aplicadas cada 3 meses (T7).



Fig. 1: Diseño completamente al azar instalado en el campo de cacao.

Se consideraron tres plantas de cacao como unidad experimental (tratamiento), para un total de 12 plantas por tratamiento en cuatro repeticiones, dando un total de 336 plantas evaluadas. La aplicación del inóculo de HMA se realizó en corona, a una distancia de 30 cm de la base de la planta a la altura de las raíces superficiales.

Fuente de micorrizas

Como fuente de micorrizas se utilizó ORGEVIT, fertilizante orgánico certificado de alta calidad, originario de los Países Bajos, con número de registro 1912-F-AGR-A, que contiene HMA que penetran en el interior de las células de las raíces y/o se fijan a la superficie de la raíz. Se utilizaron HMA en dosis de 80 g/planta y 160 g/planta para las dosis de 17 600 y 35 200 esporas, respectivamente. Cabe recalcar que en cada aplicación se colocaron estas dosis según el tratamiento (una aplicación, aplicaciones mensuales y aplicaciones trimestrales).

Todas las plantas recibieron el mismo manejo agronómico, es así que el control de arvenses se realizó de manera manual cada 15 días utilizando una desbrozadora. Al inicio del ensayo, se realizó una poda de mantenimiento eliminando las partes vegetativas improductivas y con problemas sanitarios. Además, se realizó el control de enfermedades mediante aplicaciones mensuales de productos orgánicos obtenidos de la fermentación de materiales vegetales, como el xilotrom y silver 6000 en dosis de 0,5 l/ha y 0,25 l/ha respectivamente. Para el control de hormiga se aplicó hidróxido de potasio mensualmente en dosis de 1 litro/ha. Cabe indicar que no se realizó ningún tipo de riego, dada las altas precipitaciones de la zona de estudio.

Variables analizadas

Durante la etapa productiva se evaluó el número de flores por planta y el porcentaje de cuajado de todas las unidades experimentales. A la madurez fisiológica se determinó el número total de frutos por árbol de todas las unidades experimentales, y se seleccionaron 3 frutos en todas las repeticiones para evaluar la longitud y diámetro de frutos, peso de los frutos y número y peso de semillas frescas (almendras). Además, se determinó el índice de mazorca contando todos los frutos requeridos para obtener 1 kg de semilla seca de acuerdo a Graziani et al. (2002).

En la cosecha, se determinó la producción multiplicando el peso fresco de los frutos por el número de frutos por planta.

Además, se estimó el rendimiento multiplicando el peso seco de un grano, obtenido a partir de 50 semillas, por el número de granos por fruto, el número de mazorcas por planta, y por la densidad de plantas (620 plantas).

También se evaluó la sanidad de la fruta basándose en los criterios de Fedecacao (2015), mediante la observación externa de los frutos se determinó la incidencia de monilia (*Monilophthora roreri*), a través del porcentaje de frutos enfermos respecto del total de frutos evaluados por tratamiento.

En relación al suelo, se determinó el contenido inicial y final de cadmio en suelo en el laboratorio AgroAnálisis S.A. acreditado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano. La metodología usada fue espectrofotometría de absorción atómica (según el método EPA 3052) (Perkin, 1976), y fue a partir 30 g de suelo proveniente de las zonas radicales de cada tratamiento.

Análisis estadístico

Los datos registrados fueron analizados en el programa INFOSTAT, en el cual se realizaron evaluaciones de normalidad y posteriormente fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA), con un nivel de significancia del 5 %. Además, se realizaron pruebas de comparaciones múltiples de Tukey al 95 % de confianza para determinar la existencia de diferencias significativas entre tratamientos por cada variable evaluada, excepto el contenido de cadmio debido a que se contaba con un único dato por tratamiento.

RESULTADOS

La aplicación de diferentes dosis de esporas de HMA en diferentes momentos no afectó significativamente al número de flores y el porcentaje de frutos cuajados por planta de cacao Nacional bajo las condiciones de la Amazonía ecuatoriana (Tabla 1). El número de flores promedio fue de 231 con un cuajado del 19 %. Sin embargo, sí se observaron efectos significativos sobre las características morfológicas de los frutos como longitud, diámetro y peso (Tabla 1). Los valores mayores para longitud y diámetro, de 22,2 y 11,48 cm respectivamente, fueron obtenidos con la aplicación mensual de 17 600 esporas de HMA. La media más baja se presentó en el tratamiento control (sin aplicación de esporas de HMA) con 16,65 y 9,18 cm de longitud y diámetro, respectivamente. Además, se observó un efecto positivo en el peso de los frutos, destacándose el tratamiento T3, que corresponde a la aplicación de 17 600 esporas de HMA en aplicaciones mensuales, que presentó frutos con un 59 % más de peso en relación al control. En cuanto al número de frutos por planta, la aplicación de micorrizas en diferentes dosis no incide significativamente en esta variable, obteniéndose promedios de 39,6 frutos por planta de cacao Nacional (Tabla 1).

En lo referente al número de almendras por fruto (mazorca), se mostraron diferencias significativas ($p = 0,0137$) entre los tratamientos, siendo el tratamiento T3 (con aplicaciones mensuales de 17 600 esporas de HMA) el que tuvo mayor influencia con una media de 43,75 almendras por fruto, mientras que el tratamiento control (sin aplicaciones de esporas de HMA) obtuvo la media más baja, con 31,25 almendras por fruto (Tabla 1). El peso de las almendras se vio positivamente afectado por los tratamientos, observándose el promedio

Tabla 1: Variables morfológicas y productivas de cacao Nacional (*Theobroma cacao* L.) en la parroquia Guadalupe, Zamora Chinchipe, Ecuador, bajo diferentes dosis de esporas de micorrizas y momentos de aplicación.

Variable	Tratamiento							P-valor
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
Flores								
Número de flores por planta	187,50 ^a	227,50 ^a	241,25 ^a	233,75 ^a	230,00 ^a	238,50 ^a	225,00 ^a	0,7654
Porcentaje de cuajado (%)	16,50 ^a	17,00 ^a	22,50 ^a	18,75 ^a	17,25 ^a	20,50 ^a	18,75 ^a	0,2318
Frutos								
Números de frutos (frutos/árbol)	31,00 ^a	39,25 ^a	60,50 ^a	33,50 ^a	40,00 ^a	30,00 ^a	42,75 ^a	0,9880
Peso (g)	619,75 ^b	668,50 ^b	986,75 ^a	679,95 ^b	710,02 ^b	792,62 ^{ab}	779,37 ^{ab}	0,0428
Longitud (cm)	16,65 ^c	17,15 ^{bc}	22,20 ^a	16,83 ^{bc}	17,30 ^{bc}	20,80 ^{ab}	17,78 ^{bc}	0,0010
Diámetro (cm)	9,18 ^b	9,80 ^b	11,48 ^a	9,69 ^b	9,63 ^b	11,36 ^a	9,94 ^{ab}	0,0003
Número de almendras por fruto (g)	31,25 ^b	33,25 ^{ab}	43,75 ^a	33,00 ^{ab}	34,25 ^{ab}	36,75 ^{ab}	35,00 ^{ab}	0,0137
Semilla								
Peso de almendras por fruto (g)	158,83 ^c	193,13 ^{bc}	273,71 ^a	165,81 ^c	188,87 ^c	261,25 ^{ab}	188,09 ^c	0,0004
Índice de mazorca (frutos/kg semilla seca)	23,47 ^a	23,25 ^a	18,43 ^a	20,47 ^a	21,35 ^a	19,15 ^a	20,43 ^a	0,0980

*Letras diferentes en sentido horizontal indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

más alto de 273,71 g de almendras por fruto en el tratamiento T3, que supera en un 72 % al control, que presentó el valor más bajo (158,83 g/fruto).

En lo que respecta al índice de mazorca (número de frutos necesarios para obtener un kilogramo de semilla seca), este no se vio afectado por la aplicación de esporas de HMA en diferentes momentos ($p = 0,0980$). Sin embargo, hay una tendencia, ya que el menor índice de mazorca obtenido se atribuye a la aplicación de 17 600 esporas de HMA fraccionada mensualmente, lo que implica un menor número de frutos, 18,43 frutos, para obtener 1 kg de semilla seca. En cambio, el índice más alto se observó sin la aplicación de HMA (control), requiriéndose 5 frutos más para obtener 1 kg de semilla seca (Tabla 1).

Producción y rendimiento

La producción y el rendimiento variaron con la aplicación de esporas de HMA en diferentes dosis y momentos ($p = 0,005$ y $0,0345$, respectivamente; Fig. 2). El tratamiento con la aplicación de 17 600 esporas de HMA mensualmente incrementó la producción, obteniéndose el doble de cacao por planta a diferencia del control. El rendimiento medio de cacao en almendra seca pasó de 1 044,93 kg/ha sin la aplicación de HMA a 3 282,95 kg/ha con la aplicación de 17 600 esporas de HMA mensualmente, incrementándose un 214 %.

Sanidad de frutos

Las dosis de esporas de HMA aplicadas en diferentes momentos no afectaron significativamente la incidencia de monilia; la plantación de cacao presentó una incidencia entre el 48 y el 52 % (Tabla 2, Fig. 3).

Tabla 2: Incidencia de monilia (*Moniliophthora roreri*) en cacao Nacional (*Theobroma cacao* L.) en la parroquia Guadalupe, Zamora Chinchipe, Ecuador, con aplicación de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en diferentes dosis y momentos.

Tratamientos	Incidencia (%)
T1 (Testigo, sin aplicación de HMA)	49a
T2 100 % (1 sola aplicación)	52a
T3 100 % (1 aplicación c/mes)	48a
T4 100 % (1 aplicación c/3 meses)	50a
T5 200 % (1 sola aplicación)	52a
T6 200 % (1 aplicación c/mes)	48a
T7 200 % (1 aplicación c/3 meses)	51a

*Letras iguales en sentido vertical no expresan diferencias significativas.

Contenido de cadmio en suelo

Los resultados de los análisis de cadmio realizados al inicio y al final del experimento evidencian una disminución en todos los tratamientos, siendo el tratamiento T5 (una sola aplicación de 35 200 esporas de HMA) el que registra el menor valor, con 0,01 mg de Cd por kg de suelo. Al final del

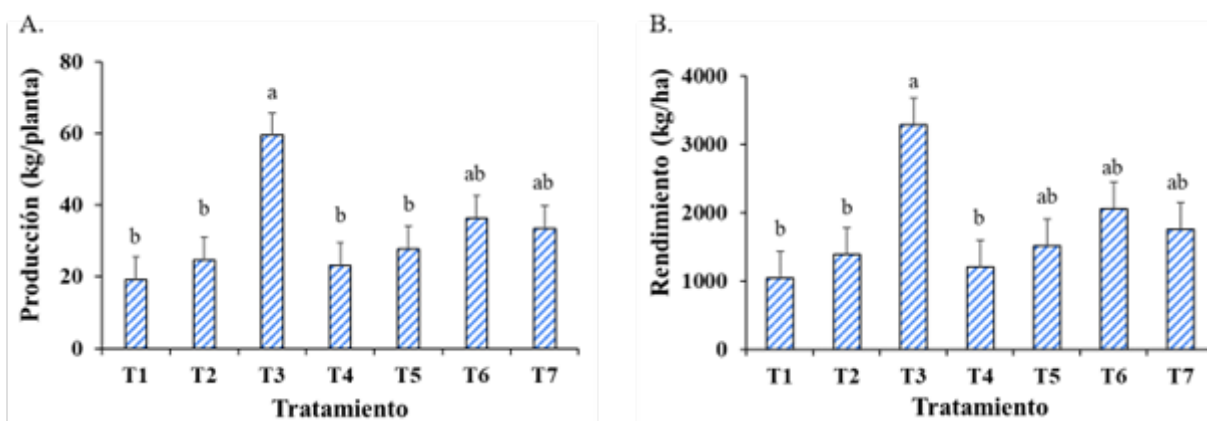


Fig. 2: Producción de cacao Nacional en almendra fresca (A) y rendimiento de cacao Nacional en almendra seca (B) bajo diferentes dosis y momentos de aplicación de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en la parroquia Guadalupe, Zamora Chinchipe, Ecuador. T1: control con 0 esporas; T2: 17 600 esporas de HMA en una sola aplicación; T3: 17 600 esporas de HMA aplicadas cada mes; T4: 17 600 esporas de HMA aplicadas cada tres meses; T5: 35 200 esporas de HMA en una sola aplicación; T6: 35 200 esporas de HMA aplicadas cada mes y T7: 35 200 esporas de HMA aplicadas cada 3 meses. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).



Fig. 3: Frutos de cacao Nacional afectados por monilia (*Moniliophthora roreri*).

ensayo, el tratamiento T1 (control, sin aplicaciones de HMA) registró el mayor valor, con 0,05 mg/kg de cadmio en suelo (Figura 4).

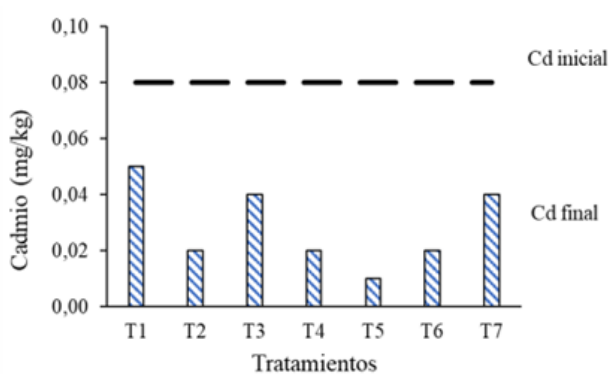


Fig. 4: Contenido de cadmio en un cultivo de cacao Nacional (*Theobroma cacao* L.) tratadas con diferentes dosis de micorrizas en diferentes momentos en la parroquia Guadalupe, Zamora Chinchipe, Ecuador. T1: control con 0 esporas; T2: 17 600 esporas de HMA en una sola aplicación; T3: 17 600 esporas de HMA aplicadas cada mes; T4: 17 600 esporas de HMA aplicadas cada tres meses; T5: 35 200 esporas de HMA en una sola aplicación; T6: 35 200 esporas de HMA aplicadas cada mes y T7: 35 200 esporas de HMA aplicadas cada 3 meses.

DISCUSIÓN

El mayor número de flores por planta lo presentó el tratamiento T3, aplicaciones mensuales de 17 600 esporas de HMA, mientras que el tratamiento control (sin aplicación de esporas de HMA) registró el menor número. Sin embargo, no existen diferencias significativas entre los tratamientos. Resultados similares fueron reportados por Berdeni et al. (2018), quienes no encontraron diferencias significativas entre las plantas de manzana inoculadas con HMA y las no inoculadas, por lo tanto, la inoculación de micorrizas no influyó en la producción de flores en este frutal.

Respecto al porcentaje de cuajado tampoco se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, lo cual difiere de Vera (2010), quien en su estudio sobre la influencia de HMA nativos en el cultivo de tomate, obtuvo un efecto positivo en el cuajado de frutos frente a los demás tratamientos. La ausencia de efecto de la aplicación de HMA sobre el cuajado se pudo deber a que el cultivo presentaba una alta incidencia de monilia, la cual provocó una alta pérdida de frutos en general. Al respecto Correa et al. (2018) mencionan que, en zonas de cultivo de cacao, la infección se presenta en la superficie de los frutos y en cualquier fase del desarrollo vegetativo, sin embargo, la susceptibilidad más alta se observa en los primeros estados de desarrollo del fruto, en plantaciones localizadas en regiones con alta humedad y sin manejo adecuado.

En las variables longitud y diámetro de fruto se mostraron diferencias estadísticamente significativas, y el tratamiento con mayores longitud y diámetro de mazorca fue el tratamiento T3 con aplicaciones mensuales de 17 600 esporas de HMA, el cual produjo un incremento de 5,55 y 2,3 cm respectivamente, significativamente mayor al control. Estos resultados discrepan con los reportados por Latacela et al. (2017), quienes no encontraron diferencias significativas para longitud de mazorca, aunque las mazorcas provenientes de plantas de cacao tratadas con HMA mostraron un mayor tamaño, mientras que para el diámetro de mazorca sí se reportaron diferencias estadísticas significativas registrando el mayor valor las mazorcas provenientes de plantas tratadas

con micorrizas. Estos resultados demuestran que los HMA producen un efecto positivo en estas variables, sin embargo, también es indispensable llevar a cabo un plan de fertilización para la obtención de mejores resultados, esto logra una mejor interrelación entre el nutriente y el organismo que lo transforma en el suelo. Al respecto, Pérez (2000) manifiesta que con la utilización de los HMA como biofertilizantes no se suprime la aplicación de fertilizantes, sino que la fertilización se hace más eficiente y puede disminuirse la dosis.

El uso de HMA afectó positivamente al número de mazorcas por planta, pero no afectó al índice de mazorca, mientras que el peso de mazorca registró un aumento en el tratamiento T3 de 367 g en relación al tratamiento T1 (control). Al respecto, Vázquez et al. (2011) mencionan en su estudio que encontraron diferencias estadísticamente significativas en cuanto al número de frutos por planta y al peso del fruto, siendo las plantas tratadas con HMA las que presentaron el mayor número y peso de frutos con respecto a las plantas no inoculadas, atribuyéndose el incremento a una mayor exploración del volumen del suelo y a una mayor absorción de agua y nutrientes. De igual manera, Choez (2021) sostiene que la aplicación de HMA en pitahaya aumenta el número de frutos por planta y presenta mayor peso de frutos. Sin embargo, Colina et al. (2020) no reportaron significancia estadística para el número de mazorcas en el cultivo de maíz, pero destacaron que con aplicación de HMA se tuvieron más mazorcas en comparación al tratamiento testigo sin estos microorganismos.

En la variable número de almendras, se encontraron diferencias significativas en todos los tratamientos, siendo el tratamiento T3 con aplicaciones mensuales de 17 600 esporas de HMA el que tuvo mayor influencia, mientras que el tratamiento T1 (control) obtuvo la media más baja. Estos resultados concuerdan con Latacela et al. (2017) que en su estudio mencionan que los tratamientos con HMA obtuvieron un mayor número e índice de semilla en relación al testigo, debido a que las micorrizas como recurso biológico generan beneficios al mejorar las condiciones fisicoquímicas y biológicas del suelo favoreciendo la disponibilidad de nutrientes para la planta. Las propiedades físicas reflejan la manera como el suelo almacena y provee agua a las plantas y permite el desarrollo radical, de la misma forma las propiedades químicas se relacionan con la calidad y disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas, entre ellas cabe resaltar pH, materia orgánica y conductividad eléctrica (Bautista et al., 2004).

En lo que respecta al peso de almendra, sí se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, ya que los HMA produjeron un efecto positivo en cuanto al peso de almendra. Esto concuerda con Terry y Leyva (2006), quienes mencionan que los hongos micorrízicos contribuyen al estado nutricional de las plantas, generando incrementos en los componentes del rendimiento, evidenciándose en qué grado los microorganismos logran poner en función de las plantas sus diferentes mecanismos de acción relacionados con la absorción de nutrientes, contribuyendo al estado nutricional de las plantas y ejerciendo un efecto positivo en la producción del cultivo de tomate.

En relación a la producción y rendimiento, aplicaciones mensuales de 17 600 esporas de HMA tuvieron efectos positivos, atribuidos a la mayor adaptabilidad de estos hongos a las condiciones ambientales de la región, así como a una ma-

yor asociación con la parte radical de las plantas (Vázquez et al., 2011). Por su parte, Franco (2018) menciona que la mejor asimilación ya no solo de agua, sino también de nutrientes, facilita un aumento de la producción aproximadamente en un 80 % en relación a las plantas no micorrizadas en el cultivo de soja. Las micorrizas mejoran la capacidad productiva de suelos poco productivos, como los afectados por la desertificación, la salinización y la erosión hídrica y eólica (Molina, 2008). Los HMA son eficientes al poner a disposición a la planta los elementos nutricionales esenciales como N, P, K, Ca, Mg, S, Zn, Cu, Mo, Fe, Mn, que se traducen en buen rendimiento obtenido, además de formar parte de una producción sana y sostenible (Vera et al., 2004). El uso de HMA en la producción de papaya 'Maradol' incrementó significativamente el rendimiento sin afectar la calidad de los frutos (Vázquez et al., 2011). De igual manera, los resultados de este estudio concuerdan con Luna et al. (2020), quienes encontraron resultados favorables con la inoculación de hongos micorrízicos en el cultivo de papa, obteniendo rendimientos hasta en un 30 % más respecto al cultivo control. González y Rodríguez (2004) en su estudio sobre aplicación de hongos micorrízicos a plantas de café, al analizar la colonización fúngica de la raíz, observaron que la cepa con una micorrización más efectiva y un efecto agrobiológico superior fue la de mayor porcentaje de colonización, lo que se debía a una mayor frecuencia de aplicación de HMA, superando los valores obtenidos en las plantas no micorrizadas, por lo tanto se asegura su permanencia, que podría verse afectada por la competencia de otros microorganismos del suelo o a las condiciones químicas del suelo, como el pH.

En este trabajo los rendimientos en todos los tratamientos superaron los 1 000 kg/ha, alcanzando el máximo de 3,2 t/ha con la aplicación de 17 600 esporas de HMA mensualmente, valores que superan a los registrados para cacao Nacional. Sin embargo, estos valores son cercanos a los reportados para el clon CCN-51 bajo fertilización: Sánchez-Mora et al. (2015) registraron un rendimiento en seco de 1,05 t/ha con la aplicación de fertilización completa en la costa ecuatoriana. De igual manera, en el clon CCN-51 Cuenca-Cuenca et al. (2019) obtuvieron valores desde 0,995 a 2,39 t/ha usando fertilización NPK en diferentes dosis, mientras que en el control (sin NPK), obtuvieron valores de 0,82 t/ha. En Colombia, se reportaron rendimientos de 2,02 t/ha para el clon CCN-51 con fertilización NPK (Puentes-Páramo et al., 2016) y rendimientos entre 2,3 y 2,8 t/ha usando fertilización completa (Ruales-Mora et al., 2011).

En cuanto a la incidencia de monilia, no se mostraron diferencias significativas por lo que todos los tratamientos registraron un porcentaje similar, sin embargo, se debe resaltar que sí existió una alta incidencia de esta enfermedad en todo el cultivo; esto pudo deberse a las condiciones ambientales que presenta la zona, ya que como lo mencionan Tuesta et al. (2017) este desorden se puede deber a factores ambientales como temperatura y precipitaciones elevadas, sumado a esto se contaba con un cultivo orgánico, por lo cual no se aplicaron productos químicos sino orgánicos para el control de esta enfermedad.

La aplicación mensual de 17 600 esporas de HMA llevó a mayor producción y rendimiento, sin embargo, no produjo una reducción mayor de Cd en el suelo en relación a la aplicación del doble de cantidad de esporas de HMA, a pesar

de esto los resultados no exceden los parámetros permitidos, siempre inferior a 1 mg/kg, permaneciendo en un intervalo de 0,001 a 0,5 mg/kg, el cual no muestra un elevado poder toxicológico, no obstante, cuando se origina un aumento del metal el suelo adquiere un potencial tóxico eminente (Badillo, 2001). Al final de la evaluación se evidencia una disminución en todos los tratamientos, siendo el tratamiento T5 (una sola aplicación de 35 200 esporas de HMA) el que registra el menor valor, con 0,01 mg/kg, seguido del tratamiento T6 (aplicaciones mensuales de 35 200 esporas de HMA) con 0,02 mg/kg. El tratamiento T1 (control) registra el mayor valor con 0,05 mg/kg de cadmio en suelo. Estos datos muestran un efecto positivo de las micorrizas y del sustrato en el cual viene el inóculo, lo que concuerda con Coninx et al. (2017) quienes mencionan que los HMA presentan un mecanismo intracelular que incluyen la unión a los tioles no proteicos y el transporte a los compartimientos intracelulares que reducen la concentración de metales pesados en suelos.

CONCLUSIONES

La aplicación de HMA tuvo un efecto positivo sobre las variables productivas de longitud y diámetro de mazorca, número de mazorcas por planta, peso de la mazorca, número de almendras por mazorca, peso de almendra, producción y rendimiento, que podría deberse a una enmienda conjunta de las micorrizas y el medio donde vienen los propágulos de micorrizas, y a la mejor asimilación de agua y nutrientes.

La dosis de esporas de micorrizas y el momento de aplicación más eficiente para incrementar la producción y rendimiento del cultivo de cacao Nacional fue la aplicación mensual de 17 600 esporas de HMA, con lo cual se logró obtener el mayor valor en producción y en rendimiento, con incrementos superiores al 200%. De igual manera, se observó una disminución del contenido de cadmio en el suelo con el uso mensual de 35 200 esporas de HMA. Por lo tanto, la aplicación de micorrizas podría contribuir a mejorar la productividad de cacao Nacional en la región amazónica del Ecuador, y ser utilizada como una estrategia de manejo orgánico del cultivo.

AGRADECIMIENTOS

Al Sr Víctor Cajas por facilitar el espacio en su finca para llevar a cabo este estudio.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización: MCM y VR; metodología: LSO, MCM y VR; análisis formal: LSO y MCM.; investigación: LSO; recursos: VR; curación de datos: LSO y MCM; redacción — preparación del borrador original: LSO; redacción — revisión y edición: MCM; visualización: LSO y MCM; supervisión: MCM y VR; administración de proyecto: VR y MCM; adquisición de financiamiento para la investigación: VR.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Lady Sisalima-Ortega: LSO. Mirian Capa-Morocho: MCM. Vinicio Ruilova: VR.

FINANCIAMIENTO

El presente estudio fue financiado por la empresa EURO-AGRO S.A.

REFERENCIAS

- Abad, A., Acuña, C., & Naranjo, E. (2020). El cacao en la Costa ecuatoriana: estudio de su dimensión cultural y económica. *Estudios De La Gestión: Revista Internacional De Administración*, (7), 59-83.
- ANECACAO. (2021). *Cacao Nacional*, 1.
- Ballesteros, W., Unigarro, A., Cadena, C., & Cadena, J. (2004). Evaluación de hongos formadores de micorrizas vesículo arbusculares (MVA) en la etapa de almácigo de cacao (*Theobroma cacao* L.), en Tumaco, Nariño. *Ciencias Agrícolas*, 21(1), 9.
- Badillo, J. (2001). Cadmio. *Curso básico de toxicología ambiental*, 25-29.
- Bautista, A., Etchevers, J., Del Castillo, R., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2), 92-95.
- Berdeni, D., Cotton, T., Daniell, T., Bidartondo, M., Cameron, D., & Evans, K. (2018). Efecto de la colonización de hongos micorrízicos, sobre el estado nutricional, el crecimiento, la productividad. *Frontiers*, 9.
- Choez, G. (2021). Comportamiento productivo del cultivo de la pitahaya (*Hylocereus undatus*) a la aplicación de micorrizas (endomicorriza y arbusculares) en el recinto Cerecita km 51, 43-50.
- Colina, E., Paredes, E., Gutiérrez, X., & Vera, M. (2020). Efecto de fertilización nitrogenada en maíz (*Zea mays* L.) sobre poblaciones de hongos micorrízicos, en Babahoyo. *JOURNAL OF SCIENCE AND RESEARCH*. 10-16.
- Coninx, L., Martinova, V., & Rineau, F. (2017). Micorrizas asistidas fitorremediación. *Advances in Botanical Research*, 83.
- Correa, J., Castro, S., & Coy, J. (2018). Estado de la moniliasis del cacao causada por *Moniliophthora roreri* en Colombia. *SciELO*. 3-9.
- Cuenca-Cuenca, E., Puentes, Y., & Menjivar, J. (2019). Uso eficiente de nutrientes en cacao fino de aroma en la provincia de Los Ríos-Ecuador. *Facultad de Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Colombia*, 72(3), 4-6.
- Cuenca, G., Cáceres, A., Oirdobro, G., Hasmy, Z., & Urdaneta, C. (2007). Las micorrizas arbusculares como alternativa para una agricultura sustentable en áreas tropicales. *INCI*, 32(1), 23-29.
- FAO/STAT. (2022). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Retrieved December 28, 2022, from
- Fedecacao. (2015). *Manejo fitosanitario del cultivo de cacao* (Código: 00.09.39.12C ed.). Bogotá - Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y el Instituto Colombiano Agropecuario ICA.
- Franco, J. (2018). Efectos beneficiosos de las micorrizas sobre las plantas. *Bioscripts*. 17-21.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Zamora Chinchipe. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial*.

- González, M. E., & Rodríguez, Y. (2004). Respuesta de plantas de *Coffea canephora* a la inoculación con hongos micorrizógenos arbusculares durante la fase de aclimatación. *Cultivos Tropicales*, 25(1), 13-16.
- Gonzales, G., & Pupo, C. (2017) Aplicación de micorrizas: Alternativa ecológica para la disminución o sustitución de fertilizantes químicos en el cultivo del maní. *Revista DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, (29).
- Graziani, L., Ortiz, L., Angulo, J., & Parra, P. (2002). Características físicas del fruto de cacao tipos criollo, forastero y trinitario de la localidad de cumboto, Venezuela. *SciELO*, 52(3), 343-362.
- Guerra, B. (2008). Micorriza arbuscular. Recurso microbiológico en la agricultura sostenible. *Tecnología en Marcha*, 21(1), 191-201.
- Latacela, W., Colina, E., Castro, C., Santana, D., Leon, J., Garcia, G., Goyes, M., & Vera, M. (2017). Efectos De La Fertilización Nitrogenada Y Fosfatada Sobre Poblaciones De Micorrizas Asociadas Al Cultivo De Cacao. *European Scientific Journal*, 13(6), 469-472.
- Leblanc, H., & Márquez, E. (2014). Efecto de los hongos formadores de micorrizas en el desarrollo de plantas de cacao en vivero. *Tierra Tropical*. 191-200.
- Loayza, F., & Zabala, J. (2018). Análisis de la cadena productiva del cacao ecuatoriano para el diseño de una política pública que fomente la productividad y la eficiencia de la producción cacaotera período 2007-2016. 48-73.
- Luna, J., Zapana, J., Cutipa, A., Florida, N. (2020). Efecto de la micorriza (*Glomus Intrarradices*), en el rendimiento de dos variedades de papa (*Solanum Tuberosum L.*) en el Altiplano de Puno - Perú. *SciELO*, 22(1), 63-65.
- Molina, G. (2008). Uso y aplicación de biofertilizantes y bacterias promotoras del crecimiento de las plantas con agroplasticultura. *CIQA* 40-48.
- Moragas, F. (2018). Suelo amazónico. Amazonas.
- Niemenak, N., Cilas, C., Rohsius, C., Bleiholder, H., Meier, U., and Lieberei, R. (2010). Phenological growth stages of cacao plants (*Theobroma sp.*): codification and description according to the BBCH scale. *Annals Applied Biology*, 156(1), 13-24.
- Ortiz, M. (2018, Julio 18). A la búsqueda del origen del cadmio en el cacao. *Redagráfica*.
- Pérez, M. (2000). Tecnología para la eliminación del bromuro de metilo. Semillero de tabaco con sustrato orgánico y uso de medios biológicos. Instituto de investigaciones de Sanidad Vegetal. MINAGRI, 16-30.
- Perkin E. (1976). *Analytical Methods for Atomic Absorption Spectrophotometry*. EEUU. 122.
- Peterson, R.L., Massicotte, H.B., & Melville, L.H. (2004). *Mycorrhizas: Anatomy and Cell Biology*.
- Puentes-Páramo, Y., Menjivar-Flores, J., & Aranzazu-Hernández, F. (2014). Eficiencias en el uso de nitrógeno, fósforo y potasio en clones de cacao (*Theobroma cacao L.*). *Bioagro*, 26(2), 99-106.
- Riopedre, T., Delgado, A., Cabrera, J., & Cartaya, O. (2021). Relación entre los metales pesados y los hongos formadores de micorrizas arbusculares. *Cultivos Tropicales*, 42(4), 14.
- Ruales-Mora, J., Burbano Orjuela, H., & Ballesteros Possú, W. (2011). Effect of the fertilization with diverse sources on the yield of cacao (*Theobroma cacao L.*). *Revista De Ciencias Agrícolas*, 28(2), 81-94.
- Rubel, F., & Kotteck, M. (2010). Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorol. Zeitschrift*. 19. 135-141.
- Sánchez-Mora, F., Medina, M., Diaz, G., Ramos, R., Vera, J., Vasquez, V., Troya, F., Garces, F., & Onofre, R. (2015). Potencial sanitario y productivo de 12 clones de cacao en Ecuador. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(3). 269-272.
- Santos, M., & Gaibor, E. (2016). Incidencia de los procesos de producción agrícola en los ingresos de los agricultores del cantón Centinela - Zumbi de la provincia de Zamora Chinchipe. 39-40.
- Terry, E., & Leyva, A. (2006). Evaluación agrobiológica de la coinoculación micorrizas-rizobacterias en tomate. *Agro-nomía costarricense*. 3-7.
- Tuesta, Á., Trigozo, E., Cayotopa, J., Arévalo, E., Arévalo, C., Zúñiga, L., & Leon, B. (2017). Optimización de la fertilización orgánica e inorgánica del cacao (*Theobroma Cacao L.*) con la inclusión de *Trichoderma* endófito y Micorrizas arbusculares. *Revista Tecnología En Marcha*. 67-78.
- Valdez, F. (2021). El cacao fino de aroma, el cacao ancestral emblemático del Ecuador. *Open Edition Books*.
- Vázquez, V., Arévalo, M., Escamilla, J., & Jaén, D. (2011). Efecto de *Glomus mosseae* y *Entrophospora colombiana* en el crecimiento, producción y calidad de frutos de papaya "Maradol" (*Carica papaya L.*). *Agroproductividad*. 30.
- Vera, A., Vernal, G., Carrera, G., & Salcedo, G. (2004). Evaluación de dinámica y eficiencia de las endomicorrizas nativas en el cultivo de tomate *Solanum lycopersicum*. X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo.
- Vera, A. (2010). Influencia de endomicorrizas nativas en el cultivo de tomate. *Repositorio Universidad de Guayaquil*. 5.