

Investigación Original

Respuesta de variedades criollas y mejoradas de maíz a la fertilización e inoculación con hongos micorrizas-arbusculares en un suelo de baja fertilidad

Fritzner Pierre 

fritzner.pierre@est.zamorano.edu

Estudiante de posgrado
Maestría en Agricultura Tropical Sostenible
Escuela Agrícola Panamericana Zamorano
Honduras

Francisco José Arévalo Castro 

arevalocastrofranciscojose@gmail.com

Estudiante de pregrado
Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Escuela Agrícola Panamericana Zamorano
Honduras

Iveth Yassmin Rodriguez 

yassmin_1191@hotmail.com

Técnica en Ciencias Biológicas | Servicio de Investigación Agrícola
Cultivos tropicales e investigación de germoplasma
Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)
Puerto Rico

Raphael Wesly Colbert 

rcolbert@zamorano.edu

Profesor Asociado
Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Escuela Agrícola Panamericana Zamorano
Honduras

Juan Carlos Rosas 

jrosas@zamorano.edu

Profesor Emérito Genética y Fitomejoramiento
Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Escuela Agrícola Panamericana Zamorano
Honduras

Historial del artículo:

Recibido septiembre 12, 2023. Aceptado octubre 31, 2023. Publicado diciembre 5, 2023.

Cómo citar: Pierre, F., Arévalo Castro, F.J., Rodriguez, I.Y., Colbert, R.W., Rosas, J.C. 2023. Respuesta de variedades criollas y mejoradas de maíz a la fertilización e inoculación con hongos micorrizas-arbusculares en un suelo de baja fertilidad. Ceiba, 56(2), p 70-89. doi: 10.5377/ceiba.v56i2.17118

Resumen. El cultivo de maíz (*Zea mays*, L.) en suelos de baja fertilidad representa un desafío para los agricultores de Centroamérica. En este estudio, se evaluó el comportamiento agronómico de variedades

de maíz en un suelo de baja fertilidad y su respuesta a la inoculación con hongos micorrizas-arbusculares (HMA) en dos experimentos en Zamorano, Honduras. En el primero, se evaluaron 16 variedades con y sin inoculación de HMA en un arreglo de parcelas divididas de un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones en casa de malla. En el segundo, se evaluaron 12 variedades con y sin fertilización química en un arreglo de parcelas divididas de un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones e inoculación con HMA de un campo experimental de baja fertilidad. Los tratamientos con y sin fertilización estuvieron distribuidos en las parcelas principales y las variedades en las subparcelas. Las variedades Tuxpeño, Olotillo Mejorado, Planta Baja, DICTA Sequía, DICTA Maya, Indio Choluteca y Capulín, mostraron una mejora significativa en el rendimiento de grano cuando se aplicó la inoculación con HMA y la fertilización. Indio Choluteca y Capulín también demostraron un buen desempeño tanto con la inoculación como con la fertilización, lo que indica su capacidad para adaptarse y expresar su potencial de rendimiento en suelos de baja fertilidad. Además, se encontraron que el contenido relativo de clorofila ($r= 0.5719$), el peso de 100 semillas ($r= 0.6296$) y la biomasa seca ($r= 0.6250$) estuvieron correlacionados con el rendimiento. La inoculación con HMA y la fertilización pueden mejorar significativamente el rendimiento de grano del maíz en suelos de baja fertilidad.

Palabras Clave: granos básicos, microorganismos, rendimiento de grano, *Zea mays* L.

Response of landrace and improved maize varieties to fertilization and inoculation with mycorrhizal-arbuscular fungi in a low fertility soil

Abstract. The cultivation of maize (*Zea mays*, L.) in low-fertility soils is a challenge for farmers in Central America. In this study, two experiments in Zamorano, Honduras evaluated the agronomic performance of maize varieties in a low-fertility soil and their response to inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). In the first experiment, 16 varieties were evaluated with and without AMF inoculation in a split-plot arrangement of a completely randomized design with four replications in a greenhouse. In the second experiment, 12 varieties were evaluated with and without chemical fertilization in a split-plot arrangement of a complete randomized block design with four replications and AMF inoculation in a low fertility field. The fertilization and non-fertilization treatments were distributed in the main plots, and the varieties were assigned to the subplots. The varieties Tuxpeño, Olotillo Mejorado, Planta Baja, DICTA Sequía, DICTA Maya, Indio Choluteca, and Capulín showed a significant improvement in grain yield when AMF inoculation and fertilization were applied. Indio Choluteca and Capulín also performed well with both inoculation and fertilization, indicating their ability to adapt and express their yield potential in low-fertility soils. Relative chlorophyll content ($r= 0.5719$), 100-seed weight ($r= 0.6296$), and dry biomass ($r= 0.6250$) were found to be correlated with the yield. AMF inoculation and fertilization can significantly improve maize grain yield in soils with low fertility.

Keywords: basic grains, grain yield, microorganism, *Zea mays* L.

Introducción

El cultivo de maíz (*Zea mays* L.) es de suma importancia a nivel global, tanto como fuente de alimento como materia prima para múltiples industrias. Sin embargo, se enfrenta a

desafíos considerables en su crecimiento y desarrollo cuando se cultiva en suelos con escasa fertilidad. En particular, en Centroamérica, el maíz desempeña un papel crucial como uno de los granos básicos indispensables en la dieta cotidiana, siendo la

base de la seguridad alimentaria y nutricional para la mayoría de la población (Llanes-Torres et al. 2015; Rodríguez-López et al. 2015; Esquivel-Quispe 2020). En esta región se produce 31,644,210 ton de maíz con un rendimiento promedio de 3,500 kg.ha⁻¹; sin embargo, en Honduras la producción representa solo un 2.13% de Centroamérica con un rendimiento promedio de 1,867 kg.ha⁻¹ (FAOSTAT 2023).

En Centroamérica más del 80% del maíz proviene de una red de agricultores de pequeña escala que abastecen más del 70% del consumo regional de este grano básico (Eitzinger et al. 2013). La mayoría de estas parcelas presentan suelos con baja fertilidad y debido a múltiples limitantes los agricultores hacen un bajo uso de insumos y enmiendas, lo que afecta la productividad del cultivo de maíz (Zea 1992; Fournier Fauchère 2000). Los investigadores están buscando prácticas agroecológicas para abordar la pérdida de fertilidad del suelo y garantizar la sostenibilidad de la agricultura (Zea 1992; Boada y Espinosa 2016). Se ha reconocido la importancia de los microorganismos del suelo en el mantenimiento de la fertilidad y la nutrición de las plantas, los que se consideran una alternativa favorable para la agricultura sostenible y el medio ambiente, ya que pueden ser utilizados como biofertilizantes para superar problemas ambientales y promover un mejor crecimiento de las plantas (Álvarez-Solís y Anzueto-Martínez 2004; Kaur et al. 2021). Los hongos micorrizas-arbusculares (HMA) también establecen simbiosis mutualista colonizando las raíces de las plantas (Kumar y Verma 2019).

El desarrollo del maíz se ve favorecido por la presencia de ciertos grupos de microorganismos naturales en el suelo, especialmente los HMA (Rodríguez-López et al. 2015). Estos microorganismos establecen una asociación simbiótica beneficiosa con aproximadamente el 90% de las plantas terrestres, incluyendo el maíz, a través de

diversas asociaciones micorrícicas (Aracely et al. 2013). Aunque no se conoce el número total de hongos del suelo involucrados en esta simbiosis, se ha comprobado que los HMA pueden establecer una relación simbiótica con las raíces del maíz (Rodríguez-López et al. 2015). Estas asociaciones micorrícicas brindan numerosos beneficios a las plantas cultivadas, como el maíz, al aumentar su adaptabilidad a diferentes entornos y mejorar la productividad del sistema (Lanfranco et al. 1995).

Se ha investigado el papel de los HMA como una herramienta efectiva para mejorar la absorción de nutrientes y la tolerancia a condiciones adversas en las plantas (Estrada et al. 2013). Por lo tanto, es importante comprender cómo la fertilización y la inoculación con HMA pueden influir favorablemente el comportamiento agronómico de variedades de maíz en suelos con baja fertilidad (Bellon et al. 2011). Estudios previos han demostrado que tanto las variedades criollas como las mejoradas de maíz pueden beneficiarse de la fertilización (Pierre et al. 2023) e inoculación con HMA en suelos con baja fertilidad (Hodge y Storer 2015).

El propósito de este estudio fue evaluar el comportamiento agronómico y potencial de rendimiento de variedades de maíz en un suelo de baja fertilidad, y analizar su respuesta a la fertilización e inoculación con HMA. A través de este estudio se esperaba identificar al menos una variedad con buen potencial de rendimiento y respuesta favorable a la inoculación con HMA, con el fin de validar su beneficio en los sistemas de producción de maíz en la región de Centroamérica.

Métodos

Lugar del estudio

Un primer experimento se realizó de mayo a julio de 2022 en una casa de malla de la Unidad de Investigación y Desarrollo de

Cultivos (UIDC) de la Universidad Zamorano, ubicada a 800 msnm, 14°00'39.54" N y 87°00'12.97" O, evaluándose la respuesta de 16 variedades de maíz a la inoculación con HMA. Luego, en septiembre de 2022 a enero de 2023 se evaluó el comportamiento agronómico de 12 variedades en el lote La Vega 4 de Monte Redondo de la Universidad Zamorano, ubicado a 750 msnm y en las coordenadas 13°59'41" N y 86°59'19" O, conteniendo un suelo de textura franca a franco-arcillo-arenosa, pH 5.93-6.19, y bajos contenidos de materia orgánica (1.04-1.24 g/100 g), nitrógeno total (0.05-0.06 g/100 g), fósforo (5-6 mg/kg extraíble), magnesio (134-141 mg/kg extraíble), cobre (1.5-1.7 mg/kg extraíble) y zinc (0.3-0.8 mg/kg extraíble). Durante el experimento, la temperatura promedio fue de 22.1 °C (rango de 20.9-23.3 °C), y la humedad relativa de 80.6% (rango de 78.5-82.2%). Además, se registró una precipitación acumulada de 185 mm, por lo que los requerimientos hídricos del cultivo fueron complementados hasta 450 mm mediante un sistema de riego por goteo.

Tratamientos y diseño experimental

El primer experimento se condujo en casa de malla en maceteros de 18.0 cm de diámetro superior y 13.5 cm de diámetro inferior y 19.5 cm de altura conteniendo un sustrato de suelo: arena que se describe más adelante. Se utilizó un arreglo de parcelas divididas de un diseño completamente aleatorizado con cuatro repeticiones, con dos niveles (con y sin) de inoculación con HMA distribuidos en las parcelas principales, y 16 variedades de maíz en las subparcelas. Se incluyeron 10 variedades criollas con tolerancia al estrés hídrico (Gómez-Cerna et al. 2021; Pierre et al. 2023) y seis variedades mejoradas de Honduras, El Salvador y Guatemala (Cuadro 1). Cada subparcela o unidad experimental consistió en un macetero conteniendo una planta de maíz. La inoculación con HMA se realizó mediante la aplicación de 20 g de *Mycoral*® en la postura de siembra de las

semillas. *Mycoral*® es un producto compuesto por especies de los géneros *Glomus sp.*, *Acaulospora sp.* y *Entrophospora sp.* en un sustrato de un suelo de textura franca, y contiene una concentración de >10 esporas/g de sustrato, así como hifas de hongos y segmentos de raicillas infectadas.

Cuadro 1. Variedades de maíz evaluadas con y sin inoculación de hongos micorrizas-arbusculares en un suelo de baja fertilidad. Zamorano, Honduras, 2022.

No.	Variedad	Código	Descripción
1	Capulín	M0318	Criolla de San Francisco, Choluteca
2	Guanaco	M0028	Criolla de Las Cañas, Yoro
3	Indio	M0321	Criolla de Orocuina, Choluteca
4	Joco ^α	M0085	Criolla de Camasca, Intibucá
5	Maicito ^α	M0044	Criolla de Choluteca
6	Olotillo	M0322	Criolla de Orocuina, Choluteca
7	Planta Baja	M0323	Criollada de El Destino, Yorito, Yoro
8	Taberón I	M0026	Criolla de Pueblito, Yoro
9	Tuza Morada	M0317	Criolla de San Francisco, Choluteca
10	Olotillo Mejorado	M0319	Variedad FP de El Barro, Santa Bárbara
11	CENTA Pasaquina	CP	Mejorada de El Salvador
12	DICTA Maya	DM	Mejorada de Honduras
13	DICTA Sequía	DS	Mejorada de Honduras
14	ICTA B-15 ^α	IB15	Mejorada de Guatemala
15	ICTA B-7 ^α	IB7	Mejorada de Guatemala
16	Tuxpeño	TUX	Mejorada de Honduras (testigo)

^α Variedades que se no incluyeron en el Experimento 2 por su menor rendimiento de grano y floración y madurez fisiológica tardías.

El segundo experimento se condujo en un arreglo de parcelas divididas de un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Los tratamientos de fertilización (con y sin) se distribuyeron en las parcelas principales y las variedades en las subparcelas. En el experimento se excluyeron cuatro variedades del primer ensayo debido a su menor rendimiento de grano y floración y madurez fisiológica tardías (Pierre et al. 2023). Cada unidad experimental consistió en un surco de 5 m de largo con 25 plantas distanciadas a 20 cm entre sí. Durante la siembra, se aplicó 20 g de *Mycoral*® por postura de semillas en todas las parcelas experimentales. Para el tratamiento con fertilización, se aplicaron 48 kg.ha⁻¹ de 18-46-0 a los 14 días después de la siembra (DDS) y 43.3 kg.ha⁻¹ de urea 46% N a los 40 DDS; y no se aplicó fertilizante en las parcelas sin fertilización.

Manejo agronómico

El primer experimento se condujo en maceteros conteniendo un sustrato de suelo del

lote Vega 4, mezclado con arena en una proporción de 3:1 (v/v). El sustrato se esterilizó mediante autoclave a una temperatura de 121°C × 20 min a 15 PSI para evitar cualquier tipo de contaminación. El segundo experimento se realizó en campo empleando un sistema de riego por goteo tres veces por semana para complementar las precipitaciones naturales de 185 mm hasta un total de 450 mm de agua. Para el control de plagas y enfermedades, se utilizó el insecticida natural Exalt 6 SC (Spinoteram) a los 25 DDS para el control de gusano cogollero [*Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera: Noctuidae)]. Además, se aplicó el fungicida Azoxystrobin (estrobilurina) para prevenir la enfermedad foliar mancha de asfalto. Para el control de malezas, se aplicó 6.75 g.L⁻¹ del herbicida pre-emergente Glifosato (N-fosfonometilglicina) 10 días antes de la siembra, y a los 40 DDS el herbicida pos-emergente Glufosinato de amonio (organofosforado) 15 g.L⁻¹. Adicionalmente, se realizaron dos desmalezados manuales a los 65 y 90 DDS.

Muestreo y variables medidas

En el primer experimento se evaluó la biomasa seca de la parte aérea (BPA), la longitud (LDR), diámetro (DDR), volumen (VDR) y el porcentaje de infección de raíces (PIR). Las muestras de raíces se cosecharon a los 40 DDS, se escanearon en un escáner *EPSON Perfection V700 photo* y un análisis de imagen con el programa *WinRhizo*® versión 2013. Para la BPA, las muestras fueron secadas en una estufa a 70 °C × 72 h y luego se pesaron. Para el PIR se prepararon casetes con 10 muestras de raíces de 1.5 cm de largo, sumergidas en una solución de KOH al 10% durante 30 min, luego se enjuagaron cinco veces con agua y se mantuvieron en agua destilada mientras se preparaba una solución de azul de tripano al 0.5%. Esta solución se calentó a 80 °C y las raíces se sumergieron en ella durante 30 min. Seguidamente, se enjuagaron las raíces para eliminar el exceso de azul de tripano, y se montaron en placas y para determinar el PIR se evaluaron siete campos al microscopio.

En el segundo experimento, adicionalmente a la BPA y el PIR, se evaluaron el número de esporas por gramo de suelo (NES), las características agronómicas y los componentes del rendimiento de grano (RDG). Para el NES, se tomaron muestras de suelo de 100 g a los 10-15 cm de las raíces de las plantas antes de la cosecha. Las muestras se mezclaron con 2,000 mL de agua y se dejaron reposar durante 30 seg. La mezcla se filtró utilizando tamices superpuestos de diferentes tamaños (425, 250 y 75 µm) repitiendo el proceso. El material filtrado se centrifugó a 3,000 rpm × 5 min en tubos de 50 mL, y luego, se agregó una solución de sacarosa al 40% (v/v) al sedimento. Los tubos se agitaron y se centrifugaron nuevamente a 3,000 rpm × 2 seg. La solución se filtró en un tamiz de 45 µm y se contaron las esporas en un plato Petri de 5 cm bajo estereoscopia.

Las características agronómicas y los componentes del rendimiento se evaluaron en muestras de 10 y 15 plantas, respectivamente. Las evaluaciones incluyeron los días a la floración masculina (DFM), floración femenina (DFF) y madurez fisiológica (DMF). En la etapa de grano pastoso (R4), se midió la altura de planta (ALP), la altura de la primera mazorca (APM), y el contenido relativo de clorofila (CRC) en unidades SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) utilizando un medidor de clorofila marca *Apogee* (MC-100, Apogee Instruments Inc., Logan, UT). A la cosecha, se registró el porcentaje de mazorcas con mala cobertura (MMC) que presentaron deficiencias y granos expuestos. Luego, se obtuvo el peso del grano y de 100 semillas (PCS) por subparcela. El rendimiento de grano (RDG) se calculó ajustándolo al 14% de humedad del grano (HDG), utilizando la fórmula: $RDG = [(PDG \times 10,000 \text{ m}^2) / (\text{Área cosechada m}^2)] \times [(100 - \% \text{ HDG}) \times 0.86]$.

Análisis de datos

Se realizaron análisis de varianza (ANDEVA) de los datos y se verificó su normalidad utilizando la prueba de Shapiro-Wilks. Las diferencias entre los tratamientos se determinaron con la prueba DMS de Fisher ($p \leq 0.05$), utilizando el paquete estadístico *Statistical Analysis System* (SAS versión 9.4) (SAS Institute Inc. 2012). Las relaciones entre las variables agronómicas, fenológicas y de rendimiento de grano, se determinaron mediante el análisis de correlación de Pearson con el programa estadístico *JASP* (versión 0.16.2) (JASP Team 2022) y de los componentes principales utilizando el programa estadístico *InfoStat* versión 2020 (Di Rienzo et al. 2020).

Resultados

En el primer experimento en casa de malla, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos con y sin inoculación con

HMA para las variables BPA ($p= 0.0043$) y PIR ($p<0.0001$). En las parcelas no inoculadas las variedades de maíz presentaron una mejor BPA con respecto a las parcelas inoculadas, mientras que, se observó una tendencia inversa para el PIR (Cuadro 2). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de inoculación para los parámetros del desarrollo radicular del maíz. La interacción fertilización \times variedad no presentó efectos significativos para las variables evaluadas.

Las variedades Planta Baja, Indio Choloteca, Olotillo, CENTA Pasaquina, Tuxpeño, Capulín, DICTA Maya y Maicito, presentaron los mejores valores de BPA; y Joco, DICTA Sequía e ICTA B-15, los más bajos (Cuadro 3). Se encontró que Indio Choloteca, Olotillo, Planta Baja, Maicito y Capulín, presentaron un mayor desarrollo radicular tanto en LDR como en VDR, pero DICTA Maya, DICTA Sequía y CENTA Pasaquina mostraron los valores más bajos en estas variables. No se encontraron diferencias significativas entre las variedades para las variables DDR y PIR.

Cuadro 1. Efectos simples del factor inoculación con hongos micorrizas-arbusculares (HMA) en la biomasa seca de la parte aérea (BPA), longitud (LDR), diámetro (DDR), volumen (VDR) y porcentaje de infección de raíces (PIR) de 16 variedades de maíz a los 40 días después de la siembra en casa de malla. Zamorano, Honduras, 2022.

Tratamiento	BPA (g.planta ⁻¹)	LDR (cm)	DDR (cm)	VDR (cm ³)	PIR (%)
Con HMA	12.1	8,654	0.45	13.9	64.0
Sin HMA	13.6	8,886	0.47	15.2	46.3
Valor p	0.0043**	0.5845 ^{ns}	0.0952 ^{ns}	0.1149 ^{ns}	<0.0001***
CV (%)	22.4	25.0	9.24	30.6	44.2
R ²	0.40	0.34	0.32	0.34	0.26

** ,***, ns Diferencias significativas al $p\leq 0.01$, $p\leq 0.001$ y no significativo, respectivamente; CV= Coeficiente de variación;

Cuadro 2. Efectos simples del factor variedad en biomasa de la parte aérea (BPA), longitud (LDR), diámetro (DDR), volumen (VDR) y porcentaje de infección de raíces (PIR) de 16 variedades de maíz a los 40 días después de la siembra en casa de malla. Zamorano, Honduras, 2022.

Variedad	BPA (g.planta ⁻¹)	LDR (cm)	DDR (cm)	VDR (cm ³)	PIR (%)
Planta Baja	15.6	10,000	0.47	17.1	68.2
Indio Cholteca	14.5	11,486	0.45	18.3	44.3
Olotillo	14.5	10,432	0.46	16.8	56.8
CENTA Pasaquina	14.1	7,404	0.47	12.6	45.7
Tuxpeño	14.0	8,518	0.46	13.8	68.9
Capulín	13.3	9,670	0.46	16.4	53.2
DICTA Maya	13.0	7,326	0.45	11.1	58.2
Maicito	12.9	9,879	0.44	15.1	53.9
Olotillo Mejorado	12.6	8,266	0.48	14.7	45.0
Guanaco	12.5	8,453	0.46	14.3	46.4
Taberón I	12.3	7,675	0.48	14.2	49.3
ICTA B-7	11.8	7,584	0.43	11.0	63.2
Tuza Morada	11.8	9,565	0.49	17.9	60.4
Joco	11.5	8,389	0.49	15.8	53.2
DICTA Sequía	10.6	7,187	0.45	11.5	60.7
ICTA B-15	9.9	8,319	0.42	11.9	54.3
Promedio	12.8	8,760	0.46	14.5	55.1
Rango	9.88-15.6	7,187-11,486	0.42-0.49	11.0-18.3	44.3-68.9
DMS (0.05)- Variedad	2.85	2,176	0.04	4.41	24.2
Valor p- Variedad	0.0095**	0.0019**	0.0565 ^{ns}	0.0068**	0.6404 ^{ns}
CV (%)	22.4	25.0	9.24	30.6	44.2
R ²	0.40	0.34	0.32	0.34	0.26

^{**}, ^{ns} Diferencias significativas al $p \leq 0.01$ y no significativo, respectivamente; DMS= Diferencia mínima significativa; CV= Coeficiente de variación.

En el segundo experimento en el campo, se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos con y sin fertilización por efectos de la interacción fertilización \times variedad para el ASM ($p= 0.0263$) y NMP ($p= 0.0311$). En las parcelas sin fertilización, las variedades de maíz mostraron un retraso significativo en DFM ($p= 0.0032$), DFF ($p= 0.0031$) y DMF ($p= 0.0327$) en relación con las parcelas con fertilización. Por el contrario, las parcelas con fertilización registraron mayor APM ($p= 0.0003$), ALP ($p= 0.0008$) y CRC ($p= 0.0095$) que sin fertilización (Cuadro 4). Además, se registraron valores más altos en BPA ($p= 0.0012$) y PIR ($p= 0.0307$) en el tratamiento con fertilización. Se obtuvieron mayores promedios de MMC ($p= 0.0309$), PCS

($p= 0.0328$) y RDG ($p= 0.0036$) en el tratamiento con fertilización. No se encontraron diferencias en NES, NMP y ASM entre los tratamientos de fertilización.

Cuadro 3. Efectos simples del factor fertilización en los días a floración masculina (DFM) y femenina (DFF), días a madurez fisiológica (DMF), altura de primera mazorca (APM) y altura de planta (ALP), contenido relativo de clorofila (CRC), biomasa seca de la parte aérea (BPA), número de esporas por gramo de suelo (NES), porcentajes de infección de raíces (PIR), mazorcas con mala cobertura (MMC), número de mazorcas por planta (NMP), aspecto de mazorcas (ASM), peso de cien semillas (PCS) y rendimiento de grano (RDG) de 12 variedades de maíz sembradas en un suelo de baja fertilidad e inoculadas con hongos micorrizas-arbusculares. Zamorano, Honduras, 2022.

Fertilización	DFM	DFF	DMF (cm)	APM (cm)	ALP (cm)	CRC (SPAD) ^a	BPA (g pl ⁻¹)
Con	57	59	97	97.3	191	44.1	21.8
Sin	60	63	99	64.0	140	41.4	9.46
Valor p- Fert	0.0032**	0.0031**	0.0327*	0.0003***	0.0008***	0.0095**	0.0012**
CV (%)	2.31	2.90	2.23	8.51	6.02	4.69	24.6
R ²	0.94	0.86	0.87	0.91	0.92	0.68	0.83

Fertilización	NES	PIR (%)	MMC (%)	NMP	ASM (1-5)	PCS (g)	RDG (kg ha ⁻¹)
Con	7.33	36.1	3.95	1.01	1.77	33.1	4,043
Sin	7.21	49.8	1.92	0.99	2.69	29.4	2,329
Valor p- Fert	0.6098 ^{ns}	0.0307*	0.0309*	0.4109 ^{ns}	0.1514 ^{ns}	0.0328*	0.0036**
CV (%)	28.2	24.29	51.2	8.29	27.6	8.92	21.0
R ²	0.26	0.57	0.43	0.44	0.74	0.71	0.82

*, **, ***,^{ns} Diferencias significativas al $p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$, $p \leq 0.001$ y no significativo, respectivamente; CV= Coeficiente de variación; ^a evaluación a los 63 DDS.

Las variedades Tuza Morada, Taberón I y Olotillo mostraron mayor precocidad en DFM, DFF y DMF ($p < 0.0001$); y las variedades mejoradas Tuxpeño, CENTA Pasaquina, DICTA Maya y DICTA Sequía fueron las más tardías. Las variedades criollas Guanaco e Indio Cholteca presentaron mayor APM, mientras que, Tuza Morada, Capulín, Tuxpeño y DICTA Sequía las menores. Guanaco, Olotillo Mejorado, Planta Baja e Indio Cholteca mostraron ALP significativamente superiores, mientras que, Tuza Morada, Taberón I, DICTA Maya y Capulín presentaron las plantas más bajas ($p < 0.0001$) (Cuadro 5). Las variedades mejoradas Olotillo Mejorado, DICTA Sequía y Tuxpeño registraron los valores significativamente más altos de CRC, y las criollas Guanaco y Taberón I los más bajos ($p < 0.0001$).

Cuadro 4. Efectos simples del factor variedad en los días a floración masculina (DFM), floración femenina (DFF) y madurez fisiológica (DMF), altura de la primera mazorca (APM) y de planta (ALP) y contenido relativo de clorofila (CRC) de 12 variedades de maíz sembradas en un suelo de baja fertilidad e inoculadas con hongos micorrizas-arbusculares. Zamorano, Honduras, 2022.

Variedad	DFM	DFF	DMF	APM (cm)	ALP (cm)	CRC (SPAD)
Tuza Morada	51	55	90	70.0	149	43.8
Taberón I	51	56	93	81.9	164	39.1
Olotillo	54	58	93	81.2	177	42.1
Capulín	55	59	94	74.0	164	43.7
Guanaco	55	60	100	93.5	189	40.1
Indio Cholteca	58	60	97	89.0	181	42.5
Planta Baja	59	62	101	81.7	182	42.3
Olotillo Mejorado.	59	61	102	86.6	187	45.1
Tuxpeño	61	63	103	75.0	177	43.6
CENTA Pasaquina	62	63	100	80.1	171	43.0
DICTA Sequía	62	62	101	75.6	168	44.6
DICTA Maya	64	65	105	79.1	164	43.0
Promedio variedad	58	60	98	80.6	173	42.7
Rango	51-64	55-65	90-105	70.0-93.5	149-189	39.1-45.1
DMS (0.05)- Variedad	1.33	1.75	2.36	6.85	10.4	2.00
Valor p- Variedad	<0.0001***	<0.0001***	<0.0001***	<0.0001***	<0.0001***	<0.0001***
CV (%)	2.31	2.90	2.23	8.51	6.02	4.69
R ²	0.94	0.86	0.87	0.91	0.92	0.68

*** Diferencias significativas al $p \leq 0.001$; DMS= Diferencia mínima significativa; CV= Coeficiente de variación.

Indio Cholteca, Olotillo y Tuza Morada presentaron una mayor BPA ($18.7 \text{ g.planta}^{-1}$) seguidas de Capulín ($18.5 \text{ g.planta}^{-1}$); y DICTA Maya ($11.8 \text{ g.planta}^{-1}$) y CENTA Pasaquina ($12.5 \text{ g.planta}^{-1}$) los más bajos (Cuadro 6). No se encontraron diferencias significativas entre las variedades de maíz en NES ($p = 0.4464$). Sin embargo, DICTA Sequía (52.2%) y Tuxpeño (51.2%) registraron los valores más altos en PIR ($p = 0.0357$), mientras que, CENTA Pasaquina (39.7%), Tuza Morada (38.9%), Guanaco (38.6%) y Olotillo Mejorado (38.6) los más bajos.

En términos de NMC, Planta Baja (15.75) e Indio Cholteca (15.5) mostraron los valores más altos, y Olotillo (14.3) y Taberón I (13.5) los más bajos. No se observaron diferencias significativas entre las variedades en NMP y MMC. Por otro lado, DICTA Sequía (1.63) y Olotillo Mejorado (1.75) tuvieron

valores más bajos de ASM, mientras que, Taberón I (3.63) registró el valor más alto en una escala de 1 a 5 (1= óptimo; 5= muy deficiente). Con relación al PCS, se observaron valores entre $25.5\text{-}34.7 \text{ g}/100$ semillas, siendo las variedades mejoradas DICTA Maya ($34.7 \text{ g}/100$ semillas) y Tuxpeño ($34.6 \text{ g}/100$ semillas) las que presentaron los valores más altos, y la variedad criolla Tuza Morada ($25.5 \text{ g}/100$ semillas) el valor más bajo.

Cuadro 5. Efectos simples del factor variedad en la biomasa seca de la parte aérea (BPA), número de esporas por gramo de suelo (NES), porcentaje de infección de raíces (PIR), número de mazorcas cosechadas (NMC), aspecto de mazorcas (ASM) y peso de cien semillas (PCS) de 12 variedades de maíz sembradas en un suelo de baja fertilidad e inoculadas con hongos micorrizas-arbusculares. Zamorano, Honduras, 2022.

Variedad	BPA (g.pl ⁻¹)	NES	PIR (%)	NMC	ASM (1-5)	PCS (g)
Olotillo	18.7	7.38	37.1	14.3	1.63	32.2
Indio Cholteca	18.7	7.51	46.4	15.5	1.75	30.2
Capulín	18.5	7.56	46.6	15.0	2.00	32.1
Tuza Morada	16.7	7.63	38.9	14.3	2.00	31.3
Tuxpeño	16.0	6.68	51.2	15.3	2.00	34.6
Guanaco	15.9	7.23	38.6	15.0	2.13	33.6
Planta Baja	15.8	7.04	43.8	15.8	2.13	27.5
Taberón I	14.7	7.24	37.8	13.5	2.25	32.6
DICTA Sequía	14.2	6.50	52.2	15.1	2.38	32.1
Olotillo Mejorado	14.2	8.50	38.6	14.8	2.38	25.6
CENTA Pasaquina	12.5	8.21	39.7	14.9	2.50	34.7
DICTA Maya	11.8	5.80	44.0	14.8	3.63	28.8
Promedio variedad	15.6	7.27	42.9	14.9	2.23	31.3
Rango	11.8-18.7	5.80-8.50	37.1-52.2	13.5-15.8	1.63-3.63	25.6-34.7
DMS (0.05)-Variedad	3.83	2.05	10.4	1.11	0.61	2.78
Valor p- Variedad	0.0038**	0.4464 ^{ns}	0.0357*	0.0140*	<0.0001***	<0.0001***
CV (%)	24.6	28.2	24.3	7.48	12.2	8.92
R ²	0.83	0.26	0.57	0.50	0.74	0.71

*, **, ***, ^{ns} Diferencias significativas al p< 0.05, p< 0.01, p<0.001 y no significativo, respectivamente; DMS =Diferencia mínima significativa; CV= Coeficiente de variación.

Se presentaron diferencias significativas para el RDG de las variedades de maíz debido al efecto simple de la fertilización (p<0.0001) y la interacción fertilización × variedad (p= 0.0036). Olotillo Mejorado, Tuxpeño, DICTA Sequía, Planta Baja y DICTA Maya obtuvieron los mayores RDG (Cuadro 7). Las parcelas con fertilización registraron un mayor rendimiento (4,043 kg.ha⁻¹) que las parcelas sin fertilización (2,330 kg.ha⁻¹); estas diferencias fueron significativas en ocho variedades, incluyendo a Olotillo Mejorado, Tuxpeño, DICTA Sequía, CENTA Pasaquina, Capulín, Guanaco, Tuza Morada y Taberón I. Por otro lado, Olotillo Mejorado, CENTA Pasaquina, DICTA Sequía y Capulín mostraron un RDG significativamente mayor con fertilización. En las parcelas sin fertilización, DICTA Sequía, Olotillo Mejorado, Olotillo y Tuxpeño presentaron valores de RDG más altos, mientras que, Tuza Morada y Taberón I los valores más bajos. Además, Olotillo (26.7%), DICTA Sequía

(31.2%), DICTA Maya e Indio Cholteca (38.1%) experimentaron reducciones de RDG menores en las parcelas sin fertilización en relación con las parcelas con fertilización; pero las demás variedades mostraron reducciones superiores (40.1 a 54.5%).

Cuadro 6. Efecto simple de fertilización (F) y efectos de interacción fertilización \times variedad (F \times V) en el rendimiento de grano (RDG), la media geométrica y reducción de rendimiento de 12 variedades de maíz crecidas en un suelo de baja fertilidad bajo tratamientos con y sin fertilización e inoculación con hongos micorrizas-arbusculares. Zamorano, Honduras, 2022.

Variedad	Efecto variedad (kg.ha ⁻¹)	Efectos F \times V (kg.ha ⁻¹)			Media geométrica (kg.ha ⁻¹)	Reducción RDG (%)
		Con Fert.	Sin Fert.	Valor p		
Olotillo Mejorado	3,968	5,070	2,866	0.0006***	3,812	43.5
Tuxpeño	3,926	5,083	2,769	0.0379*	3,752	45.5
DICTA Sequía	3,617	4,286	2,947	0.0272*	3,554	31.2
Planta Baja	3,595	4,697	2,494	0.0822 ^{ns}	3,423	46.9
DICTA Maya	3,424	4,230	2,618	0.0735 ^{ns}	3,328	38.1
Olotillo	3,355	3,873	2,838	0.0752 ^{ns}	3,315	26.7
Indio Choluteca	3,357	4,149	2,567	0.0514 ^{ns}	3,264	38.1
CENTA Pasaquina	3,464	4,761	2,166	0.0054**	3,211	54.5
Capulín	3,189	4,017	2,360	0.0082**	3,079	41.2
Guanaco	2,844	3,815	1,874	0.0067**	2,674	50.9
Tuza Morada	2,171	2,716	1,626	0.0292*	2,101	40.1
Taberón I	1,326	1,822	830	0.0130*	1,230	54.4
Promedio fert. (F)	3,186	4,043	2,330		3,062	42.6
DMS- F (0.05)	668	768	1,124			
Valor p- F	<0.0001***	<0.0001***	0.0188*			
DMS-F \times V (0.05)		651				
Valor p- F \times V		0.0036**				
CV (%)	21.0	13.2	11.9			
R ²	0.82	0.81	0.77			

*, **, ***, ^{ns} Diferencias significativas al $p < 0.05$, $p < 0.01$, $p < 0.001$ y no significativo, respectivamente; DMS =Diferencia mínima significativa de fertilización (F) y fertilización \times variedad (F \times V); CV= Coeficiente de variación.

Según la gráfica de dispersión de la interacción fertilización \times variedad se pudo clasificar las variedades en cuatro grupos, de acuerdo con su respuesta a los tratamientos con y sin fertilización (Figura 1). El cuadrante superior derecho agrupa las variedades Tuxpeño, Olotillo Mejorado, Planta Baja, DICTA Sequía, DICTA Maya e Indio Choluteca, las cuales mostraron los mejores resultados en RDG con ambos tratamientos de fertilización. En el cuadrante inferior derecho se ubican Capulín y Olotillo, que obtuvieron un buen rendimiento sin fertilización, pero su respuesta con fertilización estuvo por debajo del promedio de las variedades. En el cuadrante superior izquierdo se encuentra la variedad

CENTA Pasaquina, que mostró una mejor respuesta a la fertilización, pero su rendimiento sin fertilización estuvo por debajo del promedio de las variedades. Por último, el cuadrante inferior izquierdo muestra las variedades Guanaco, Tuza Morada y Taberón I que presentaron rendimientos inferiores al promedio en ambas condiciones de fertilización.

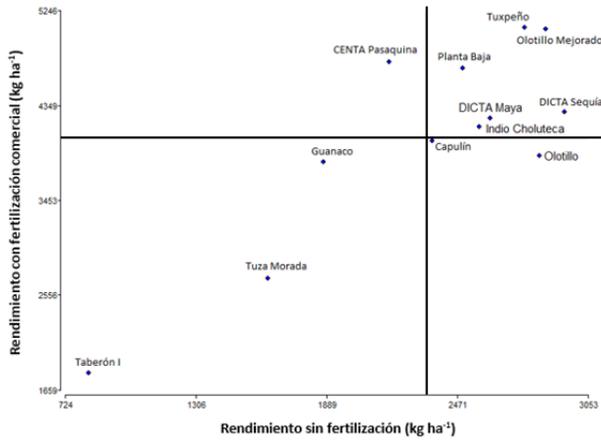


Figura 1. Gráfico de dispersión contrastando las diferencias en el rendimiento de grano con y sin fertilización de 12 variedades de maíz en un suelo de baja fertilidad e inoculación con hongos micorrizas-arbusculares. Zamorano, Honduras, 2022. Los ejes X e Y en el interior de la figura representan los promedios de

rendimiento de grano de las variedades en cada tratamiento de fertilización.

En el tratamiento con fertilización, se observaron correlaciones positivas significativas entre RDG y las variables DFM ($r= 0.5854^{***}$), DFF ($r= 0.5504^{***}$), ALP ($r= 0.4341^{**}$), DMF ($r= 0.6077^{***}$), CRC ($r= 0.3511^*$) y PCS ($r= 0.5437^{***}$); y negativas con ASM ($r= -0.6524^{***}$) (Cuadro 8). Por otro lado, en el tratamiento sin fertilización, se observaron correlaciones positivas significativas entre el RDG y las variables APM ($r= 0.3921^{**}$), ALP ($r= 0.5989^{***}$), DMF ($r= 0.3234^*$), CRC ($r= 0.4486^{**}$), BPA ($r= 0.5137^{***}$), NMP ($r= 0.5830^{***}$) y PCS ($r= 0.4942^{***}$); y correlaciones negativas con MMC ($r= -0.3120^*$) y ASM ($r= -0.7048^{***}$). Sin embargo, en ambos tratamientos de fertilización, las variables NES y PIR no mostraron correlaciones significativas con el RDG.

Cuadro 7. Coeficientes de correlación de Pearson® entre el rendimiento de grano y las características fenológicas, morfológicas y componentes de rendimiento de 12 variedades de maíz crecidas con y sin fertilización en un suelo de baja fertilidad e inoculación con hongos micorrizas-arbusculares. Zamorano, Honduras, 2022.

Características	Correlación (r) con rendimiento de grano	
	Fertilización	Sin fertilización
Días a la floración masculina	0.5854 ^{***}	0.2508 ^{ns}
Días a la floración femenina	0.5504 ^{***}	0.1196 ^{ns}
Biomasa de la parte aérea (g planta ⁻¹)	0.0709 ^{ns}	0.5137 ^{***}
Altura de primera mazorca (cm)	0.1018 ^{ns}	0.3921 ^{**}
Altura de planta (cm)	0.4341 ^{**}	0.5989 ^{***}
Contenido relativo de clorofila (SPAD)	0.3511 [*]	0.4486 ^{**}
Días a la madurez fisiológica	0.6077 ^{***}	0.3234 [*]
Número de mazorcas con mala cobertura	0.1026 ^{ns}	-0.3120 [*]
Número de mazorcas por planta	0.2568 ^{ns}	0.5830 ^{***}
Aspecto de mazorca (1-5)	-0.6524 ^{***}	-0.7048 ^{***}
Peso de 100 semillas (g)	0.5437 ^{***}	0.4942 ^{***}

*, **, ***, ns Diferencias significativas al $p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$, $p \leq 0.001$ y no significativo, respectivamente.

Mediante el análisis de componentes principales (ACP), se redujeron las 11 variables que mostraron correlaciones significativas con el RDG a dos componentes principales (CP1 y CP2) los que explicaron el 66.6% de la varianza total del experimento (Figura 2). La variable ASM mostró una relación inversa con APM y una relación positiva con las demás características agronómicas. Por otro lado, la BPA se relacionó positivamente con APM y ALP, mientras que, presentó una relación

inversa con las demás características. Olotillo, Capulín y Tuza Morada se asociaron con valores superiores de BPA. Por otro lado, DICTA Sequía, Taberón I y CENTA Pasaquina estuvieron relacionadas con las características agronómicas NMP y ASM. Tuxpeño mostró una asociación con el carácter RDG. Las variedades más tardías en la floración femenina, como DICTA Maya, Planta Baja, Olotillo Mejorado e Indio Choluteca, se encontraron asociadas con el carácter DMF.

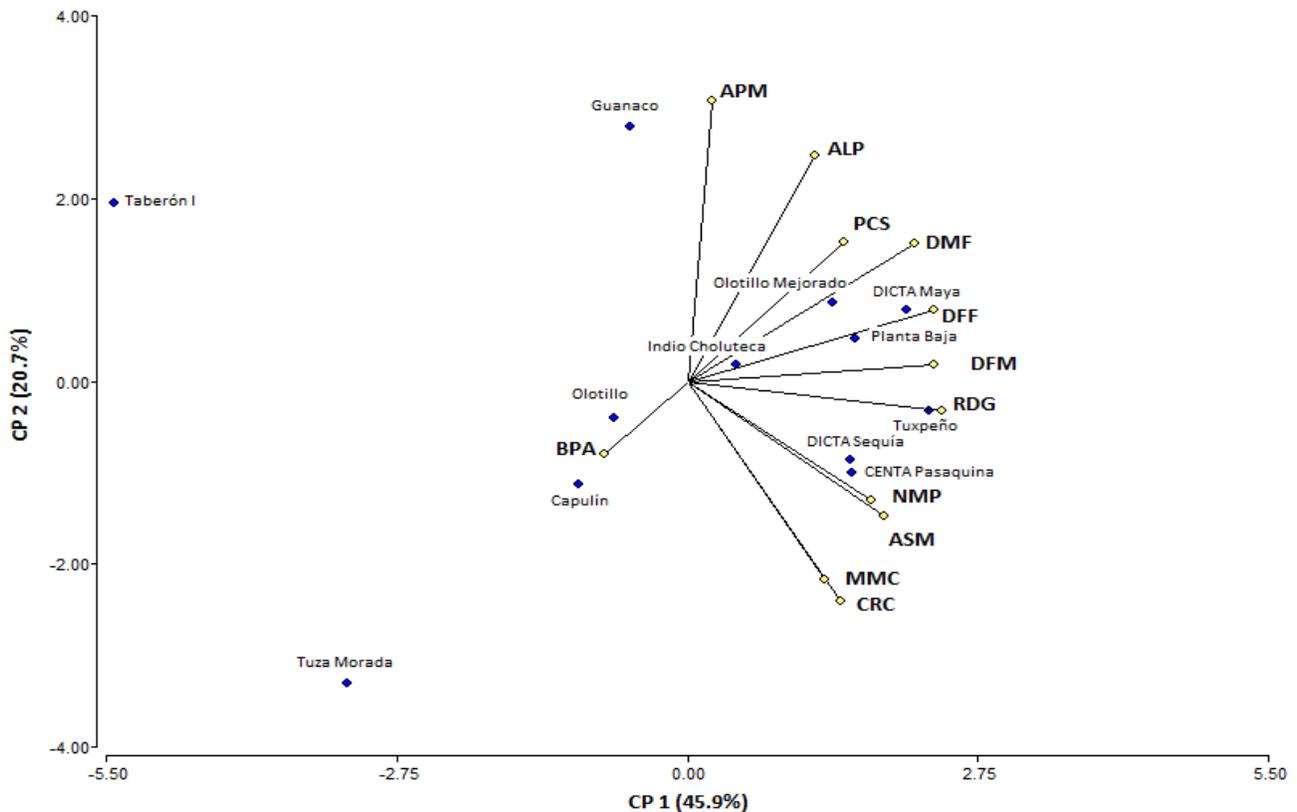


Figura 2. Biplot para variables fenológicas, agronómicas y componentes de rendimiento de 12 variedades de maíz en un suelo de baja fertilidad agrupadas en dos componentes principales (CP1 y CP2) evaluadas en condiciones con y sin fertilización e inoculación con hongos micorrizas-arbusculares. Zamorano, Honduras, 2022.

Discusión

En el primer experimento se observó que las parcelas no inoculadas con HMA mostraron una mejor BPA en comparación con las parcelas inoculadas, lo que es consistente con un estudio previo realizado por Pozo y Arisdely (2022). La relación planta-HMA

puede variar según algunas condiciones edáficas como la humedad y el nivel de compactación. Siendo un experimento en maceteros, dichas condiciones podrían limitar el desarrollo de los HMA los cuales compiten con las plantas para los elementos nutritivos del sustrato. Sin embargo, en el segundo experimento se registró una mayor BPA en las

parcelas con fertilización y HMA, similar a los hallazgos de Sabia et al. (2015), quienes observaron un mayor crecimiento del maíz en los tratamientos con micorrizas. Siendo un experimento en campo abierto, ciertas condiciones edáficas son más estables, favoreciendo la relación planta-HMA. Esto se debe a que las micorrizas mejoran la capacidad de las plantas para absorber nitrógeno y fósforo a través de las raíces (Polcyn et al. 2019), lo que resulta en un mejor crecimiento y asimilación de nutrientes (Priyadharsini y Muthukumar 2017). De acuerdo con Arroyo et al. (2019), las parcelas inoculadas con HMA mostraron un mayor PIR que las no inoculadas. Aunque los tratamientos con y sin fertilización no tuvieron efecto en el NES, se registró un mayor PIR en el tratamiento sin fertilización e inoculación; siendo Tuxpeño, Capulín y DICTA Sequía las variedades que mostraron el mayor PIR. Estos hallazgos concuerdan con los resultados reportados por Del Pérez-Luna et al. (2012), quienes encontraron que la colonización de las raíces de maíz por micorrizas no tuvo un impacto significativo en el NES; lo que sugiere que la biofertilización con HMA puede ser beneficiosa en condiciones de baja fertilización.

La combinación de fertilización química e inoculación con HMA tuvo un impacto positivo en las características fenológicas, morfológicas y el RDG para las diferentes variedades de maíz. Sin embargo, en algunas variedades, no se observaron diferencias significativas en el RDG y algunos de sus componentes entre los tratamientos con y sin fertilización. La interacción fertilización \times variedad solo tuvo influencia en las variables NMP y ASM. Los HMA desempeñan un papel clave en la absorción de fósforo en el suelo y están directamente relacionados con las características agronómicas del maíz (Faggioli et al. 2008).

Taberón I se destacó por ser la variedad más temprana en DFM, concordando con los hallazgos de Gómez-Cerna et al. (2021) y Pierre

et al. (2023) en condiciones de estrés hídrico y baja fertilidad, respectivamente. Por otro lado, las demás variedades fueron más tardías y mostraron diferencias entre los tratamientos con y sin fertilización. Estos resultados en DFM son similares a los encontrados por Barrios y Basso (2018), en que las diferencias dependieron de las características genéticas de cada variedad y del manejo de la fertilización. Además, se registró una correlación positiva moderada entre los DFF y DMF en las parcelas con fertilización, pero no en las parcelas sin fertilización. Esto indica que el RDG aumentó a medida que las plantas alcanzaron la floración más tardíamente y sin estrés nutricional. Sin embargo, bajo estrés nutricional y con la aplicación de HMA, el RDG no mostró una relación significativa con los DFM y DFF en las variedades de maíz.

En las parcelas sin fertilización, se observaron correlaciones positivas entre ALP y APM con el RDG del maíz. La variación de la ALP mostró una tendencia similar a los hallazgos previos de Alori et al. (2019) y fue consistente con los resultados reportados por Priyadharsini y Muthukumar (2017), quienes encontraron que los HMA promovieron el crecimiento del maíz y la asimilación de nutrientes. Sin embargo, Aracely et al. (2013) y Sabia et al. (2015) no encontraron diferencias significativas entre las plantas de maíz con y sin micorrizas.

En las parcelas con fertilización la CRC fue significativamente mayor que en las parcelas sin fertilización; resultados que son consistentes con estudios realizados por Cunha et al. (2015) y Pierre et al. (2023), quienes investigaron la relación entre el índice de verdor y la fertilización en trigo y maíz, respectivamente. Se registró una correlación moderadamente positiva entre el CRC y el RDG del maíz (rango de 35.3-50.0 unidades SPAD), mientras que, el valor crítico para el cultivo de maíz se reporta por debajo de 35.3 unidades SPAD (Castellanos-Reyes et al. 2017). No se

observó una influencia de los tratamientos de fertilización en el ASM. Sin embargo, se encontraron diferencias significativas entre las variedades y la interacción fertilización \times variedad. Como señalaron Pierre et al. (2023), estas diferencias podrían atribuirse a la varianza de la aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE).

Se observó una tendencia similar en el RDG debido a la fertilización e inoculación con HMA en comparación con estudios anteriores (Bernal et al. 2014; Pierre et al. 2023). Las variedades sin fertilización mostraron una amplia reducción en el RDG (26.7-54.5%) en comparación con las variedades fertilizadas. Sin embargo, Indio Choluteca, Olotillo, DICTA Maya y Planta Baja, presentaron un comportamiento similar en ambos tratamientos de fertilización, lo que sugiere una adaptación a condiciones de estrés edáfico, pero con buena respuesta en condiciones favorables. Este comportamiento también se observó en estudios anteriores de variedades de maíz bajo estrés hídrico (Gómez-Cerna et al. 2021). En general, se encontró que el 75% de las variedades tuvieron una media geométrica mayor al promedio general del experimento, lo cual respalda los resultados de Esquivel-Quispe (2020) que demostraron un mejor RDG con la aplicación de un consorcio de HMA. Otros investigadores, como Cabrales et al. (2016), encontraron un mejor RDG en el maíz con el uso de micorrizas, indicando que se puede reducir la fertilización fosfórica hasta un 33% sin afectar significativamente la absorción de nitrógeno y la producción de granos. En general, los HMA ayudan a las plantas a producir cambios en la síntesis de nuevas proteínas, conocidas como micorrizinas, que posiblemente les confieren capacidad de adaptación al estrés (Roveda y Polo 2007).

Las correlaciones negativas altas observadas entre el RDG y el ASM en las parcelas con y sin fertilización, indican que a menor valor de ASM (escala 1-5, 1= óptimo y

5= deficiente) mayor es el RDG. Por ello, el ASM se presenta como un carácter agronómico secundario útil para identificar variedades de maíz con mejor adaptación a condiciones de estrés, resultados que coinciden con los obtenidos por Gómez-Cerna et al. (2021) y Pierre et al. (2023). Por otro lado, se observó una correlación positiva media entre el RDG y la BPA en el tratamiento sin fertilización, lo que sugiere que en condiciones de estrés nutricional y con la inoculación de micorrizas, el RDG del maíz aumenta a medida que se incrementa la BPA. Las plantas aprovechan de manera más eficiente las micorrizas cuando los niveles de fertilización son bajos, ya que, en presencia de altos niveles de fertilización, solo las hojas más viejas mantienen la dependencia con las micorrizas (Poleyn et al. 2019).

En ambos tratamientos de fertilización, se observó una correlación positiva moderada entre el NMP y el PCS con el RDG. Estos resultados coinciden con los hallazgos de Barrios y Basso (2018), sobre los efectos de la fertilización nitrogenada en los componentes del rendimiento del maíz. Contrariamente a los hallazgos de Pierre et al. (2023), se observó un promedio de una mazorca por planta y un mayor PCS. Según lo señalado por Edmeades et al. (1999), estas características agronómicas son especialmente relevantes para determinar el RDG del maíz en condiciones de estrés abiótico.

Conclusiones

En la presente investigación se evaluó el comportamiento agronómico de variedades de maíz en suelos de baja fertilidad y se analizó su respuesta a la fertilización e inoculación con HMA. Las variedades Tuxpeño, Olotillo Mejorado, Planta Baja, DICTA Sequía, DICTA Maya, Indio Choluteca y Capulín, mostraron una mejora significativa en el RDG cuando se aplicó la inoculación de HMA junto con la fertilización. En ambos experimentos, las variedades Indio Choluteca y Capulín mostraron buenos resultados tanto con la

inoculación con HMA como con la fertilización, lo que indica su capacidad para desarrollarse y expresar su potencial de rendimiento en suelos de baja fertilidad. Se observaron que las características agronómicas secundarias ALP, APM, ASM y PCS estuvieron fuertemente correlacionadas con el RDG de las variedades de maíz, por lo que, se recomienda considerar estas características en los programas de mejoramiento genético de este cultivo.

Contribuciones de los autores

F. Pierre: Conceptualización de la investigación; planificación y supervisión de la investigación; recolección, procesamiento y análisis de datos; redacción de borrador original.

F.J. Arévalo Castro: Conceptualización de la investigación; planificación y supervisión de la investigación; recolección, procesamiento y análisis de datos.

I.Y. Rodríguez: Conceptualización de la investigación; planificación, coordinación y supervisión de la investigación; recolección, procesamiento y análisis de datos; revisión de borrador original y artículo final.

R.W. Colbert: Conceptualización de la investigación; planificación y supervisión de la investigación; revisión de borrador original y artículo final.

J.C. Rosas: Conceptualización de la investigación; planificación y supervisión de la investigación; procesamiento y análisis de datos; revisión y edición de borrador original y artículo final.

Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud a la Fundación Nippon por haber respaldado financieramente la

realización de esta investigación, la cual formó parte de los requisitos de graduación del primer autor en el marco de la Maestría en Agricultura Tropical Sostenible (MATS) de la Universidad Zamorano. Asimismo, se extienden agradecimientos al equipo de la Unidad de Investigación y Desarrollo de Cultivos (UIDC), Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria de la Universidad Zamorano, cuyas valiosas contribuciones resultaron fundamentales para el desarrollo de este estudio.

Referencias bibliográficas

- Alori ET, Babalola OO, Prigent-Combaret C. 2019. Impacts of microbial inoculants on the growth and yield of maize plants. *The Open Agriculture Journal*. 13(1):1–8. doi:10.2174/1874331501913010001.
- Álvarez-Solís JD, Anzueto-Martínez MdJ. 2004. Actividad microbiana del suelo bajo diferentes sistemas de producción de maíz en los altos de Chiapas, México. *Agrociencia*. 38(1):13–22. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30238102>.
- Aracely ME, Víctor O, Kalyanne F, Rosalinda S. 2013. Diferencias en la respuesta del maíz (*Zea mays*, L.) a la inoculación con *Glomus cubense* (y. Rodr. & Dalpé) y con un conglomerado de especies de hongos micorrízicos arbusculares (HMA). *Cultivos Tropicales*. 34(2):12–15.
- Arroyo J, Estrella GF, Herrera EC. 2019. Efecto de la micorrización y la fertilización fosfórica en el rendimiento del maíz (*Zea mays* L.) en suelos arenosos de Montería. *Suelos Ecuatoriales*. 49(1):9–18. spa. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7831523>.

- Barrios M, Basso C. 2018. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre componentes del rendimiento y calidad nutricional del grano de seis híbridos de maíz. *Bioagro*. 30(11):39–48. http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=s1316-33612018000100004&script=sci_arttext.
- Bellon MR, Hodson D, Hellin J. 2011. Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change. *Proc Natl Acad Sci USA*. 108(33):13432–13437. doi:10.1073/pnas.1103373108.
- Bernal JH, Navas GE, Hernández RS. 2014. Requerimientos y respuestas a la fertilización del maíz en suelos de Sabanas Ácidas de Colombia. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. 15(5):6–10. [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/EE5636022A70E26985257D7400608936/\\$FILE/Art%202.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/EE5636022A70E26985257D7400608936/$FILE/Art%202.pdf).
- Boada R, Espinosa J. 2016. Factores que limitan el potencial de rendimiento del maíz de polinización abierta en campos de pequeños productores de la Sierra de Ecuador. *Siembra*. 3(1):67–82.
- Cabrales EM, Toro M, Lopez-Hernández D. 2016. Efecto de micorrizas nativas y fósforo en los rendimientos del maíz en Guárico, Venezuela. *Temas Agrarios*. 21(2):21–31.
- Castellanos-Reyes MA, Valdés-Carmenate R, López-Gómez A, Guridi-Izquierdo F. 2017. Mediciones de índices de verdor relacionadas con área foliar y productividad de híbridos de maíz. *Cultivos Tropicales*. 38(3):112–116. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=s0258-59362017000300016&script=sci_arttext&tlng=pt.
- Cunha ARD, Katz I, Sousa ADP, Martínez Uribe RA. 2015. Índice SPAD en el crecimiento y desarrollo de plantas de *Lisianthus* en función de diferentes dosis de nitrógeno en ambiente protegido. *Idesia (Arica)*. 33(2):97–105. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=s0718-34292015000200012&script=sci_arttext&tlng=en.
- Del Pérez-Luna YC, Álvarez-Solís JD, Mendoza-Vega J, Pat-Fernández JM, Gómez-Álvarez R, Cuevas L. 2012. Diversidad de hongos micorrícicos arbusculares en maíz con cultivo de cobertura y biofertilizantes en Chiapas, México. *Gayana Bot*. 69(1):46–56. doi:10.4067/s0717-66432012000100006.
- Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo C. 2020. *InfoStat*. 2020. Argentina. <http://www.infostat.com.ar/>.
- Edmeades GO, Bolaños J, Chapman SC, Lafitte HR, Bänziger M. 1999. Selection improves drought tolerance in tropical maize populations: I. Gains in biomass, grain yield, and harvest index. *Crop Science*. 39(5):1306–1315. <https://sci-hub.cat/10.2135/cropsci1999.3951315x>. doi:10.2135/cropsci1999.3951306x.
- Eitzinger A, Läderach P, Sonder K, Schmidt A, Sain G, Beebe SE, Nowak A. 2013. Tortillas on the roaster: Central America's maize-bean systems and the changing climate. *CIAT policy brief*. 1–6.

- Esquivel-Quispe R. 2020. Propagación de hongos micorrizógenos arbusculares nativos y su influencia en la producción de maíz amiláceo en Paquecc-Ayacucho. Segunda parte: Hacia una agricultura sostenible. *Journal of the Selva Andina Biosphere*. 8(1):53–63. http://www.scielo.org/bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2308-38592020000100006&lng=en&tlng=es.
- Estrada B, Aroca R, Maathuis FJM, Barea JM, Ruiz-Lozano JM. 2013. Arbuscular mycorrhizal fungi native from a Mediterranean saline area enhance maize tolerance to salinity through improved ion homeostasis. *Plant, Cell & Environment*. 36(10):1771–1782. doi:10.1111/pce.12082.
- Faggioli VS, Freytes GS, Galarza C. 2008. Micorrización natural de maíz y su relación con la absorción de fósforo del suelo en diferentes sistemas de labranzas y fertilización. *INTA*. 1–6.
- FAOSTAT. 2023. Statistical databases and data sets of the Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and Agriculture Organization. <http://faostat.fao.org/default.aspx>.
- Fournier Fauchère JM. 2000. Technological gap for maize (*Zea mays* L.) cultivation in the Polochic watershed of Guatemala. *ETH Zurich*.
- Gómez-Cerna MJ, Colbert RW, Rodríguez IY, Rosas-Sotomayor JC. 2021. Comportamiento agronómico de accesiones de maíz de Honduras bajo estrés de sequía. *CEIBA. Zamorano Investiga*:36–51.
- Hodge A, Storer K. 2015. Arbuscular mycorrhiza and nitrogen: implications for individual plants through to ecosystems. *Plant Soil*. 386(1-2):1–19. https://idp.springer.com/authorize/casa?redirect_uri=https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-014-2162-1&casa_token=w3v0wjrzrceaaaaa:ytto8tth5x4mb6suke45q0kwhnrwap90e3mzv9cqh5rugtlocuvqqzg8wmgsvf8l-qvffmw6wrqlz. doi:10.1007/s11104-014-2162-1.
- JASP Team. 2022. JASP. 0.16.2. Países Bajos. <https://jasp-stats.org/>.
- Kaur T, Devi R, Kour D, Yadav A, Yadav AN, Dikilitas M, Abdel-Azeem AM, Ahluwalia AS, Saxena AK. 2021. Plant growth promoting soil microbiomes and their potential implications for agricultural and environmental sustainability. *Biologia*. 76(9):2687–2709. doi:10.1007/s11756-021-00806-w.
- Kumar A, Verma JP. 2019. The role of microbes to improve crop productivity and soil health. En: *Ecological Wisdom Inspired Restoration Engineering*. Springer, Singapore. p. 249–265. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-0149-0_14.
- Lanfranco L, Wyss P, Marzachi C, Bonfante P. 1995. Generation of RAPD-PCR primers for the identification of isolates of *Glomus mosseae*, an arbuscular mycorrhizal fungus. *Mol Ecol*. 4(1):61–68. doi:10.1111/j.1365-294x.1995.tb00192.x.
- Llanes-Torres D, Pedro J, Xiomara SR, Juan F, Marlenis MC, Mildrey PM. 2015. Respuesta del maíz (*Zea mays*) a la aplicación de hongos micorrízico-

- arbusculares (HMA) y cantidades complementarias de fertilizantes minerales. *Ecosistema Ganadero*. 2(1,2):9–16.
- Pierre F, Rodriguez IY, Colbert RW, Rosas JC. 2023. Comportamiento agronómico de variedades criollas y mejoradas de maíz en un suelo de baja fertilidad. *CEIBA*. 56(1):16–30. doi:10.5377/ceiba.v56i1.16352.
- Polcyn W, Paluch-Lubawa E, Lehmann T, Mikula R. 2019. Arbuscular mycorrhiza in highly fertilized maize cultures alleviates short-term drought effects but does not improve fodder yield and quality. *Front Plant Sci*. 10:496. doi:10.3389/fpls.2019.00496.
- Pozo M, Arisdely L. 2022. Evaluación de los efectos de la inoculación micorrízica sobre los parámetros morfométricos y productivos del cultivo de maíz [Ingeniería Agropecuaria]. La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/7586>.
- Priyadharsini P, Muthukumar T. 2017. Arbuscular mycorrhizal fungus influences maize root growth and architecture in rock phosphate amended tropical soil. *Anales de Biología*. 39:211–222. doi:10.6018/analesbio.39.22.
- Rodríguez-López CP, Navarro de León A, Arboleda-Valencia JW, Valencia-Jimenez A, Roger H. Valle-Molinares RH. 2015. Hongos micorrizógenos arbusculares asociados a plantas de *Zea mays* L. en un agroecosistema del Atlántico, Colombia. *Agronomía*. 23(1):20–34.
- Roveda G, Polo C. 2007. Mecanismos de adaptación de maíz asociado a *Glomus spp.* en suelos con bajo fósforo disponible. *Agronomía Colombiana*. 25(2):349–356. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0120-99652007000200019.
- Sabia E, Claps S, Morone G, Bruno A, Sepe L, Aleandri R. 2015. Field inoculation of arbuscular mycorrhiza on maize (*Zea mays* L.) under low inputs: preliminary study on quantitative and qualitative aspects. *Ital J Agronomy*. 10(1):30–33. doi:10.4081/ija.2015.607.
- SAS Institute Inc. 2012. SAS for Windows. 9.4. Estados Unidos. <https://www.sas.com/>.
- Zea JL. 1992. Efecto de intercalar leguminosas, con diferentes dosis de fósforo sobre el rendimiento de maíz, *Zea mays* L. en Centroamérica. *Agronomía Mesoamericana*. 3:16–22.