



Influencia de los consorcios micorrícos arbusculares y la fertilización fosfórica en los componentes del rendimiento de chile piquín*

Influence of arbuscular mycorrhiza consortia and phosphorus fertilization on the yield components of piquin chili

Pedro Osuna-Avila¹, Sergio Alan Aldana-Galvez¹, Joaquín Rodrigo-García¹, Juan Pedro Flores-Margez¹, Baltazar Corral-Díaz¹

* Recepción: 2 de junio, 2025. Aceptación: 30 de octubre, 2025. Este estudio fue parte de los resultados de la tesis de maestría en ciencias Químico-Biológicas del segundo autor, llamada Consorcios micorrícos arbusculares en los componentes del rendimiento de chile piquín. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México.

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Instituto de Ciencias Biomédicas. Av. Plutarco Elías Calles No. 1020. FOVISSSTE Chamizal, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. posuna@uacj.mx (autor para la correspondencia; <https://orcid.org/0000-0002-7499-9676>); sergioalan.aldana@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-3417-2746>); jogarcia@uacj.mx (<https://orcid.org/0000-0002-0997-5811>); juflores@uacj.mx (<https://orcid.org/0000-0003-0379-4128>); bcorral@uacj.mx (<https://orcid.org/0000-0002-1919-5229>).

Resumen

Introducción. El chile piquín (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) es una especie silvestre de fruto rojo común en la sierra del norte de México que aún está en proceso de domesticación. Entender el papel de los hongos micorrícos arbusculares y la fertilización fosfórica es importante para implementar sistemas de producción sostenible de chile piquín. **Objetivo.** Comparar la influencia de tres consorcios micorrícos arbusculares y dos controles con fertilización fosfórica en los componentes del rendimiento. **Materiales y métodos.** El estudio se realizó durante el verano de 2021 en México. Se utilizaron tres consorcios micorrícos y dos controles con fertilización fosfórica con 12 observaciones. Las variables analizadas fueron altura de planta (cm), número de hojas y diámetro del tallo, número de frutos, peso de cosecha, peso unitario de fruto y contenido de fósforo en frutos. El experimento se realizó a través de un diseño completamente al azar. El análisis estadístico de los datos analizados fue con el programa SPSS versión 25 mediante un análisis de varianza (ANDEVA). Se utilizó una significancia de 5 % y se compararon las medias con una prueba de Tukey. **Resultados.** Los consorcios micorrícos superaron significativamente a las plantas de control 1 (22 mg L⁻¹ de P) en las variables agronómicas estudiadas (el número de hojas, la altura de planta y el diámetro de tallo) y las de rendimiento (número de frutos, peso de cosecha y peso unitario de fruto). Los tres consorcios contribuyeron a las variables de rendimiento tal como lo hicieron los tratamientos fertilizados con doble dosis de fósforo. **Conclusiones.** Las micorrizas nativas regionales y la comercial favorecieron las variables de los componentes del rendimiento evaluados. Ellos contribuyeron al contenido del P en los frutos de manera similar a como lo hicieron aquellas plantas fertilizadas con fósforo.

Palabras clave: chile silvestre, desierto chihuahuense, fertilidad, micorrizas nativas, rendimiento.



Agronomía Mesoamericana es desarrollada en la Universidad de Costa Rica bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para más información escriba a pccmca@ucr.ac.cr o pccmca@gmail.com

Abstract

Introduction. The piquin chili (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) is a wild species of typical red fruit found in the mountains north of Mexico, and it is still undergoing domestication. To understand the role of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus fertilization is essential to make sustainable production of piquin chili. **Objective.** To compare the influence of three consortia of arbuscular mycorrhiza and two control groups of phosphorus fertilization on yield components. **Materials and methods.** The study was conducted in the summer of 2021 in Mexico. Three mycorrhizal consortia were utilized in the control group with phosphorus fertilization, with 12 observations. The analyzed variables were plant height (cm), leaf number, stem diameter, fruit number, fruit harvest weight, unitary fruit weight, and fruit phosphorus content. The experiment was conducted using a completely randomized design. The statistical analysis of the collected data was performed using SPSS version 25, employing analysis of variance (ANOVA). A significance of 5% was used, and the means were compared with a Tukey test. **Results.** The mycorrhizal consortia improved significantly over the control plants (22 mg L⁻¹ de P) in the agronomic variables studied (the number of leaves, plant height, and stem diameter, and the yield (number of fruits, harvest weight, and unitary weight of fruit). The three fungal consortia contributed to the yield variables, as the control plants had double the dosage of phosphorus. **Conclusions.** The native and commercial mycorrhizal fungi favored the variables of yield components evaluated. They contributed to their fruit P content, like fertilized plants with phosphorus.

Keywords: wild chili, Chihuahuan desert, fertility, native mycorrhiza, yield.

Introducción

El chile piquín (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum* Dunal) es una planta arbustiva que se desarrolla de manera silvestre en México y es una fuente de riqueza genética para mejorar los chiles comerciales (Hayano-Kanashiro et al., 2016; López-Moreno et al., 2023; Osuna-Rodríguez et al., 2023). Los frutos verdes o rojos frecuentemente provienen de plantas silvestres que tienen gran potencial culinario y aportan vitaminas para los consumidores (Torres-Morán et al., 2022; Ruiz-Núñez et al., 2025). El sabor particular y la pungencia de sus frutos tienen alta demanda en los mercados nacionales e internacionales que contribuyen a la economía de los sectores rurales en México (Maiti et al., 2015).

La domesticación del chile piquín se ha complicado ya que, para facilitar su germinación, las semillas deben ser ingeridas por un ave y procesadas en su tracto digestivo, como una vía de diseminación natural (Dzib-Ek et al., 2025; Reyes-Acosta et al., 2019). Las semillas dispersadas por las aves han originado el crecimiento de traspatio del ecotipo Juárez que podría tener propiedades de interés económico para integrarlo en este estudio. Muchos estudios se han dirigido a describir las características morfológicas del fruto y la variabilidad genética del chile piquín (Alcalá-Rico et al., 2023; Murillo-Amador et al., 2015; Ramírez-Novoa et al., 2018) pero son escasos los reportes de los efectos de los hongos micorrícticos y la fertilización fosfórica en los componentes del rendimiento en chiles silvestres como el piquín.

Es importante introducir microorganismos nativos como biofertilizantes que no dañan al medio ambiente y buscar ecotipos que sean viables para su domesticación como una estrategia para evitar la sobreexplotación de las poblaciones silvestres. No hay estudios de plantas provenientes de traspatio de Ciudad Juárez, Chih. México en las que se incluyen las interacciones micorrícticas nativas de la región y su influencia en los componentes del rendimiento en condiciones de invernadero. Los hongos micorrícticos arbusculares (HMA), al colonizar las raíces, forman una relación simbiótica donde la planta se beneficia al aumentar su capacidad radicular que se traduce en absorber mayor cantidad de agua y nutrientes (Franczuk et al., 2023; Pereira et al., 2024).

Los HMA son una alternativa potencial para brindar protección a la planta frente a agentes bióticos y abióticos para el establecimiento y desarrollo de las poblaciones silvestres (Fasusi et al., 2021; Osuna-Ávila et al., 2021). La biodiversidad geográfica de México ha ocasionado que el amplio número de ecotipos de chile piquín dispersados por aves tengan diferente respuesta en múltiples variables fisiológicas y de rendimiento. Esta biodiversidad requiere un análisis urgente tanto agronómico como de fuentes de fitoquímicos de las poblaciones de diferentes regiones geográficas (Hayano-Kanashiro et al., 2016).

Las inoculaciones en chile piquín con consorcios nativos o comerciales como biofertilizantes favorecen las variables agronómicas (Mendoza-Villarreal et al., 2021; Yakasai & Rabiu, 2025). Estos reportes estimulan el uso de la biodiversidad de HMA que existe en ambientes nativos de cada región. Los HMA mejoran la resistencia al estrés al incrementar la absorción de agua y nutrientes pero su diversidad en los agroecosistemas áridos aún no está bien explorada (Guardiola-Márquez et al., 2022). Los estudios con hongos nativos benéficos aislados del área donde crece el ecotipo Juárez pueden ser de gran impacto en los procesos de la producción agrícola cuya tendencia es reducir el uso de fertilizantes químicos y los costos de producción (Fasusi et al., 2021; Franczuk et al., 2023).

Si se da la relación simbiótica el ecotipo Juárez, tendría más posibilidades de sobrevivir en terrenos de baja fertilidad tal como son la mayoría de los suelos de traspasio urbanos. Recientes estudios se han enfocado en la asociación simbiótica de las micorrizas con los chiles comerciales (Akande et al., 2023; Akhounnejad & Baran, 2023; Canpolat & İşlek, 2023; Hu et al., 2023; Koziol & Bever, 2023; Liu et al., 2023; Pulungan et al., 2023) pero son escasos en los chiles silvestres como el piquín. Es documentado que el chile piquín puede desarrollarse en ecosistemas semiáridos, en traspasio o bajo sombra de mallas cuyas condiciones ambientales pueden tener influencia en las características agronómicas (Ahmed et al., 2023; Paredes-Jácome et al., 2019).

No hay reportes del efecto de los consorcios micorrícos aislados del desierto chihuahuense en los componentes de rendimiento en este ecotipo de chile piquín. Se hipotetiza que los consorcios micorrícos a uno de los dos controles con fertilización fosfórica, para mejorar los componentes del rendimiento de chile piquín del ecotipo Juárez bajo condiciones de invernadero. El objetivo de este estudio fue comparar la influencia de tres consorcios micorrícos arbusculares y dos controles con fertilización fosfórica en los componentes del rendimiento.

Materiales y métodos

Propagación de consorcios micorrícos arbusculares (HMA) nativos del desierto Samalayuca en cultivos trampa

La investigación se realizó durante el verano del 2021 en el invernadero de la Universidad Autónoma de Cd. Juárez, Chihuahua, México ($31,74^{\circ}$ N, $106,44^{\circ}$ O). Dentro del invernadero la temperatura promedio durante el día fue de $28,5^{\circ}\text{C}$ y en la noche $21,3^{\circ}\text{C}$ con un fotoperiodo de 16 h luz. Consorcios de micorrizas fueron colectados de la rizosfera de *Machaeranthera pinnatifida* y se le llamó HMA-1, a los aislados de Mezquite (*Prosopis spp.*) se les denominó HMA-2. Para la multiplicación del consorcio de HMA aislados de cada planta nativa localizados en la zona desértica de Samalayuca, Chihuahua México, se utilizó el trigo variedad Olmeca como cultivo trampa.

El cultivo huésped se desarrolló por 45 días en condiciones de invernadero. Se sembraron 10 semillas de trigo en cada una de las cinco macetas de 5 L macetas conteniendo suelo agrícola estéril con 100 g de la muestra de HMA por especie nativa. Antes del corte de las plantas, se suspendió el riego con inversa por 15 días para inducir la formación de esporas de los HMA en el sustrato. Se recolectó el suelo con raíces del trigo y se pasó por un tamiz de 1,4 mm, donde se separó el suelo de las raíces y se almacenó en bolsas de papel.

Inoculación micorrícica

Los frutos rojos del chile piquín fueron recolectados de una sola planta de traspatio ubicada en Ciudad Juárez, Chih., México. Las semillas fueron mezcladas y se germinaron en cajas Petri con papel húmedo. Las plántulas en la fase de cotiledón fueron trasplantadas en vasos de unicel de 16 oz con sustrato estéril y crecidas durante 15 días en luz artificial y a una temperatura de 25 °C. El trasplante a condiciones de invernadero se realizó cuando las plantas alcanzaron 3 cm de altura y fueron transferidas a bolsas como macetas de 5 L.

El sustrato utilizado para el desarrollo de las plantas inoculadas fue una mezcla que contenía suelo agrícola con residuos descompuestos de árboles de pistacho, turba comercial y arena del desierto chihuahuense en una proporción 1:1:1 (v:v). Las bolsas se llenaron a $\frac{3}{4}$ de su capacidad y sobre la superficie se distribuyó 60 g de mezcla de suelo con el consorcio micorrícico nativo (HMA-1 o HMA-2), más 1 g de raíces de trigo inoculadas y posteriormente se llenaron a 95 % de su capacidad. Para el tercer tratamiento se utilizó una cucharada por maceta del consorcio micorrícico comercial (HMA-3).

La mezcla del sustrato presentó un pH de 7.0 y una conductividad eléctrica de 1,150 dS/m, clasificado como neutro y sin problemas de sales solubles. El sustrato se esterilizó en autoclave a 135 °C durante 40 min. Las plantas se fertilizaron cada 15 días con 1 g de fertilizante granulado que carece de P. Para evitar que las plantas control tuvieran deficiencia de fósforo, se aplicó un riego semanal de 400 mL con agua desionizada que contenía H_2PO_4 a una concentración de 22 mg L⁻¹ (control 1) y de 44 mg L⁻¹ (control 2). Las plantas fueron desarrolladas bajo condiciones de invernadero con temperaturas de 26 ± 5 °C.

Análisis de componentes de rendimiento

Las plantas medidas por tratamiento fueron doce. Las variables agronómicas que se analizaron fueron altura de planta (cm), número de hojas y diámetro del tallo (mm) con 12 observaciones por variable. Cada una de las variables de las plantas con micorrizas se compararon con el control de 22 mg L⁻¹ de P (control 1) y 44 mg L⁻¹ de P (control 2) durante su desarrollo con un intervalo de 15 días. Durante la cosecha, las variables del rendimiento que se analizaron fueron el número de frutos, peso total de cosecha (mg) y peso unitario de fruto (mg). A las variables agronómicas y a las variables del rendimiento se les consideró como componentes del rendimiento.

Los datos se registraron durante la época de cosecha con un intervalo de 5 días entre cada recolección. El peso de frutos de cosecha se obtuvo después de retirar el pedúnculo, se contabilizó al total recolectado de cada planta una vez que alcanzó su madurez hortícola. Para obtener el peso unitario de fruto se seleccionaron 120 frutos al azar de la cosecha de cada tratamiento, los cuales se pesaron de manera individual en una balanza digital.

Determinación del fósforo en frutos

Los frutos rojos cosechados de las plantas se almacenaron en bolsas al vacío en refrigerador a -80 °C. Se crearon grupos de cuatro plantas cada uno, de las cuales se mezclaron los frutos cosechados, para así obtener tres grupos por tratamiento. Estas muestras se liofilizaron por 72 h y se trituraron con un procesador de alimentos que fueron homogenizadas y se tomaron 2 g para analizar contenido de P en frutos de cada grupo. Las muestras fueron procesadas en el laboratorio de análisis de alimentos Unifrut, perteneciente a la Unión Agrícola de Fruticultores del Estado de Chihuahua, ubicado en Ciudad Cuauhtémoc, Chih. Los resultados fueron expresados en porcentaje de peso por muestra de peso seca (% PS).

Análisis estadístico

El experimento se realizó a través de un diseño completamente al azar. El análisis estadístico de los datos colectados fue con el programa SPSS versión 25 mediante un ANDEVA. Se utilizó una significancia de 5 % y se compararon las medias con una prueba de Tukey.

Resultados

Análisis de los componentes de rendimiento

El número de hojas mostró diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 1). Las diferencias empiezan a detectarse en los primeros 15 y 30 días ($11,3 \pm 0,7$ y $15,9 \pm 0,7$ respectivamente) donde las plantas micorrizadas con el consorcio nativo HMA-1 superan en el número de hojas al resto de los tratamientos ensayados. Los siguientes registros de los 45, 60, 75, 90, 105 y 120 días siguieron siendo consistentemente superiores, pero similares a los otros consorcios y aún con el control 2.

Cuadro 1. Cuantificación del número de hojas en plantas de chile piquín ecotipo Juárez durante 150 días de crecimiento en condiciones de invernadero en Ciudad Juárez, México. 2021.

Table 1. Quantification of leaf number in piquin chili plants of ecotype Juarez during 150 days of growth under greenhouse conditions in Juarez City, Mexico. 2021.

| Periodo | Tratamiento | | | | |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| | Control 1 | Control 2 | HMA-1 | HMA-2 | HMA-3 |
| 0 días | $4,0 \pm 0,0$ a $4,0 \pm 0,0$ a |
| 15 días | $7,3 \pm 0,4$ b | $8,7 \pm 0,6$ b | $11,3 \pm 0,7$ a | $9,5 \pm 0,6$ ab | $10,1 \pm 0,5$ ab |
| 30 días | $9,3 \pm 0,5$ b | $11,9 \pm 0,5$ b | $15,9 \pm 1,2$ a | $15,8 \pm 0,6$ a | $15,3 \pm 0,8$ a |
| 45 días | $23,7 \pm 2,5$ bc | $25,8 \pm 1,4$ bc | $36,3 \pm 4,3$ ab | $39,2 \pm 3,0$ a | $35,6 \pm 2,6$ ab |
| 60 días | $40,8 \pm 4,8$ b | $49,9 \pm 3,9$ ab | $53,5 \pm 4,7$ ab | $60,5 \pm 3,1$ a | $53,5 \pm 6,0$ ab |
| 75 días | $46,4 \pm 5,5$ c | $57,8 \pm 3,9$ bc | $84,0 \pm 9,9$ ab | $103,6 \pm 6,6$ a | $67,3 \pm 6,3$ bc |
| 90 días | $71,5 \pm 6,6$ c | $82,6 \pm 4,5$ bc | $103,0 \pm 8,7$ ab | $117,0 \pm 6,4$ a | $108,0 \pm 9,3$ ab |
| 105 días | $76,2 \pm 7,0$ c | $87,1 \pm 4,6$ bc | $112,0 \pm 9,2$ ab | $123,1 \pm 6,5$ a | $116,0 \pm 10,2$ ab |
| 120 días | $78,2 \pm 7,2$ c | $88,2 \pm 4,4$ bc | $115,7 \pm 9,0$ ab | $127,2 \pm 6,5$ a | $120,6 \pm 10,0$ a |
| 135 días | $113,3 \pm 8,1$ b | $129,2 \pm 9,0$ ab | $150,2 \pm 8,5$ a | $159,7 \pm 4,7$ a | $160,3 \pm 11,6$ a |
| 150 días | $122,6 \pm 11,2$ b | $139,7 \pm 9,7$ b | $184,7 \pm 8,7$ a | $186,0 \pm 9,3$ a | $186,9 \pm 10,7$ a |

Control 1- 22 mg L⁻¹ P: sin HMA con solución estándar de fósforo, Control 2- 44 mg L⁻¹ P: sin HMA con doble concentración de fósforo. HMA-1 *Machaeranthera*, HMA-2 Mezquite, HMA-3 Comercial. $n = 12$ plantas. \pm Error estándar de la media. / Control 1-22 mg L⁻¹ P: without HMA with standard solution of phosphorus, Control 2- 44 mg L⁻¹ P: without HMA with double phosphorus concentration, HMA-1 *Machaeranthera*, Mezquite HMA-2, Commercial HMA-3. $n = 12$ plants, \pm standard error of the mean.

Letras diferentes entre tratamientos en cada periodo indican diferencias significativas según Tukey ($p \leq 0,05$). / Different letters among treatments in each period indicate significant differences agreed with Tukey ($p \leq 0,05$).

El consorcio HMA-2 inició su efecto en el número de hojas a los 30 días y continuó interactuando con la planta a lo largo de los 150 días del cultivo. El consorcio HMA-3 del producto comercial fue estadísticamente similar a los otros consorcios micorrícos, los cuales superaron a los controles en esta variable en todo el periodo del estudio. El control 1 fue el tratamiento que registró el menor número de hojas. En general, las plantas inoculadas fueron estadísticamente superiores a los controles a los 150 días de cultivo.

En el monitoreo de las alturas de plantas bajo condiciones de invernadero se obtuvieron resultados con diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 2). Estas diferencias se observaron desde el día 15, donde los consorcios HMA-3 y HMA-1 superaron en altura ($8,2 \pm 0,7$ y $8,1 \pm 0,7$ respectivamente) al resto de los tratamientos. En los siguientes registros, HMA-3 promovió el mayor crecimiento a lo largo del cultivo; en algunas fechas se obtuvo similitud estadística con los otros consorcios HMA y con el control 2.

Cuadro 2. Evaluación de la altura de plantas (cm) en plantas de chile piquín ecotipo Juárez durante 150 días de crecimiento en condiciones de invernadero en ciudad Juárez, México. 2021.

Table 2. Evaluation of the plant height (cm) in piquin chili plants of ecotype Juarez during 150 days of growth under greenhouse conditions in Juarez City, Mexico. 2021.

| Periodo | Tratamiento | | | | |
|----------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| | Control 1 | Control 2 | HMA-1 | HMA-2 | HMA-3 |
| 0 días | $2,8 \pm 0,1$ a | $2,8 \pm 0,07$ a | $3,3 \pm 0,1$ a | $3,1 \pm 0,0$ a | $2,9 \pm 0,1$ a |
| 15 días | $5,8 \pm 0,3$ b* | $6,4 \pm 0,5$ ab | $8,1 \pm 0,7$ a | $7,1 \pm 0,4$ ab | $8,2 \pm 0,7$ a |
| 30 días | $10,9 \pm 0,8$ b | $13,9 \pm 0,9$ b | $19,7 \pm 1,3$ a | $20,5 \pm 0,7$ a | $20,9 \pm 1,3$ a |
| 45 días | $28,3 \pm 3,5$ b | $36,8 \pm 2,6$ ab | $38,9 \pm 3,2$ ab | $36,2 \pm 1,7$ ab | $41,6 \pm 3,4$ a |
| 60 días | $42,9 \pm 4,7$ b | $53,7 \pm 3,6$ ab | $56,0 \pm 4,2$ ab | $55,0 \pm 2,0$ ab | $60,3 \pm 4,0$ a |
| 75 días | $52,2 \pm 5,3$ a | $64,2 \pm 3,8$ a | $63,9 \pm 4,5$ a | $63,8 \pm 2,2$ a | $68,9 \pm 4,8$ a |
| 90 días | $57,4 \pm 4,9$ b | $68,7 \pm 4,0$ ab | $70,5 \pm 3,9$ ab | $72,6 \pm 2,4$ ab | $74,1 \pm 4,8$ a |
| 105 días | $59,4 \pm 4,9$ b | $70,6 \pm 4,1$ ab | $74,7 \pm 4,3$ ab | $72,7 \pm 2,7$ ab | $80,0 \pm 4,5$ a |
| 120 días | $63,8 \pm 5,0$ b | $76,7 \pm 2,5$ ab | $80,8 \pm 4,3$ a | $76,7 \pm 2,4$ ab | $85,3 \pm 4,4$ a |
| 135 días | $65,3 \pm 4,9$ b | $77,5 \pm 2,5$ ab | $82,0 \pm 4,3$ a | $80,8 \pm 2,4$ ab | $88,5 \pm 4,6$ a |
| 150 días | $67,5 \pm 4,5$ b | $79,2 \pm 2,4$ ab | $84,7 \pm 4,1$ a | $82,0 \pm 2,4$ ab | $89,2 \pm 4,5$ a |

Control 1- 22 mg L⁻¹ P: sin HMA con solución estándar de fósforo; Control 2- 44 mg L⁻¹ P: sin HMA con doble concentración de fósforo. HMA-1 *Machaeranthera*, HMA-2 Mezquite, HMA-3 Comercial. $n = 12$ plantas. \pm Error estándar de la media. / Control 1-22 mg L⁻¹ P: without HMA with standard solution of phosphorus, Control 2- 44 mg L⁻¹ P: without HMA with double phosphorus concentration, HMA-1 *Machaeranthera*, Mezquite HMA-2, Commercial HMA-3. $n = 12$ plants, \pm standard error of the mean.

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas según Tukey ($p \leq 0,05$). / Different letters in columns indicate significant differences agreed with Tukey ($p \leq 0,05$).

En el caso de HMA-2 se encontró que en la mayoría de las mediciones comparte características con el control que se suministró doble dosis de fertilizante a base de P. Los controles presentaron la menor altura en todas las mediciones. Los HMA incrementaron la altura de las plantas. El consorcio HMA-3 promovió la mayor altura desde el día 15, continuando así hasta concluir en el día 150.

El desarrollo del diámetro de tallo mostró diferencias significativas entre los tratamientos durante los 150 días de observación (Cuadro 3). El efecto del HMA-1 se inició desde el día 15 ($4,5 \pm 0,2$). En el día 60 esta diferencia no se presentó, pero fue detectada de nuevo su influencia en el día 75 y continuó superando a los controles hasta

el día 150. En el caso de HMA-3, se observaron diferencias al día 30 ($5,7 \pm 0,4$) compartiendo similitud con el Control 2 en el día 75 ($9,0 \pm 0,4$), pero retomó su diferencia en la siguiente medición, día 90, manteniéndose así hasta concluir las mediciones. El HMA-2 fue el consorcio que registró el diámetro de tallo más bajo.

Cuadro 3. Evaluación del diámetro de tallo (mm) en plantas de chile piquín ecotipo Juárez durante 150 días de crecimiento en condiciones de invernadero en ciudad Juárez, México. 2021.

Table 3. Evaluation of stem diameter in piquin chili plants of ecotype Juarez during 150 days of growth under greenhouse conditions in Juarez City, Mexico. 2021.

| Periodo | Tratamiento | | | | |
|----------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|
| | Control 1 | Control 2 | HMA-1 | HMA-2 | HMA-3 |
| 0 días | $1,5 \pm 0,06$ a* | $1,6 \pm 0,07$ a | $1,7 \pm 0,05$ a | $1,6 \pm 0,07$ a | $1,8 \pm 0,1$ a |
| 15 días | $3,6 \pm 0,3$ b | $4,2 \pm 0,1$ ab | $4,5 \pm 0,2$ a | $4,2 \pm 0,1$ ab | $4,2 \pm 0,1$ ab |
| 30 días | $4,2 \pm 0,3$ b | $4,9 \pm 0,2$ ab | $5,8 \pm 0,3$ a | $5,3 \pm 0,3$ ab | $5,7 \pm 0,4$ a |
| 45 días | $5,3 \pm 0,5$ b | $5,8 \pm 0,3$ ab | $6,9 \pm 0,3$ a | $6,7 \pm 0,2$ ab | $6,8 \pm 0,5$ a |
| 60 días | $7,0 \pm 0,4$ a | $7,2 \pm 0,3$ a | $8,0 \pm 0,4$ a | $7,4 \pm 0,1$ a | $8,0 \pm 0,4$ a |
| 75 días | $7,0 \pm 0,4$ c | $7,6 \pm 0,2$ ab | $9,4 \pm 0,5$ a | $8,7 \pm 0,3$ bc | $9,0 \pm 0,4$ ab |
| 90 días | $7,4 \pm 0,3$ c | $8,3 \pm 0,1$ bc | $9,8 \pm 0,5$ ab | $9,3 \pm 0,2$ ab | $10,2 \pm 0,6$ a |
| 105 días | $7,9 \pm 0,3$ c | $8,5 \pm 0,1$ bc | $10,7 \pm 0,3$ a | $10,0 \pm 0,4$ ab | $10,3 \pm 0,5$ a |
| 120 días | $8,4 \pm 0,2$ b | $9,4 \pm 0,2$ ab | $10,8 \pm 0,3$ a | $10,7 \pm 0,4$ a | $10,5 \pm 0,4$ a |
| 135 días | $8,7 \pm 0,2$ b | $9,6 \pm 0,2$ b | $11,3 \pm 0,3$ a | $11,1 \pm 0,3$ a | $11,6 \pm 0,4$ a |
| 150 días | $9,5 \pm 0,1$ b | $10,0 \pm 0,2$ b | $11,8 \pm 0,3$ a | $11,5 \pm 0,3$ a | $12,0 \pm 0,3$ a |

Control 1- 22 mg L⁻¹ P: sin HMA con solución estándar de fósforo; Control 2- 44 mg L⁻¹ P: sin HMA con doble concentración de fósforo. HMA-1 *Machaeranthera*, HMA-2 Mezquite, HMA-3 Comercial. $n = 12$ plantas. ± Error estándar de la media. / Control 1-22 mg L⁻¹ P: without HMA with standard solution of phosphorus, Control 2- 44 mg L⁻¹ P: without HMA with double phosphorus concentration, HMA-1 *Machaeranthera*, Mezquite HMA-2, Commercial HMA-3. $n = 12$ plants, ± standard error of the mean. Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas según Tukey ($p \leq 0,05$). / Different letters in columns indicate significant differences agreed with Tukey ($p \leq 0,05$).

En las últimas 2 mediciones ($9,6 \pm 0,2$ y $10,0 \pm 0,2$ respectivamente) mostró similitud al control con dosis más baja de P. El Control 22 mg L⁻¹ P desde el día 15 mostró medias más bajas en el diámetro de tallo y continuando así hasta concluir las mediciones en el día 150 ($9,5 \pm 0,1$), el cual fue significativamente menor en comparación con las plantas inoculadas con HMA. Los HMA-3 y HMA-1 presentaron diferencias en el diámetro con mayor rapidez, fueron consistentes hasta el día 150.

El número de frutos fue incrementado significativamente por el consorcio micorrílico HMA-2 que comparte similitudes con los consorcios de HMA-1 y HMA-3 y el control con doble dosis de P. El control 1 fue el que presentó el menor número de frutos. La influencia de los consorcios nativos y el control 44 mg L⁻¹ P fue más notorio en la producción de la cosecha total de frutos y en el peso unitario de frutos (Cuadro 4). El análisis de contenido de fósforo en frutos maduros no mostró diferencias significativas entre los tratamientos ensayados. Los valores variaron entre $0,381 \pm 0,03$ % y $0,411 \pm 0,02$ % de peso seco (Cuadro 5).

Cuadro 4. Cuantificación de parámetros de cosecha de frutos en plantas de chile piquín inoculadas con micorrizas bajo condiciones de invernadero recolectados a 150 días en ciudad Juárez, México. 2021.

Table 4. Quantifying fruit harvest parameters over 150 days inoculated with mycorrhiza under greenhouse conditions in Juarez City, Mexico. 2021.

| Tratamiento | Parámetro de fruto | | |
|-------------|--------------------|----------------------|-----------------------------|
| | Número de Frutos | Peso de Cosecha (mg) | Peso Unitario de Fruto (mg) |
| Control 1 | 59,7 ± 11,3 b | 3329,8 ± 626,6 b | 82,4 ± 10,8 b |
| Control 2 | 103,9 ± 10,2 ab | 6459,3 ± 585,0 a | 129,8 ± 11,8 a |
| HMA-1 | 91,5 ± 13,0 ab | 6246,6 ± 742,6 a | 157,5 ± 10,3 a |
| HMA-2 | 106,0 ± 5,7 a | 7072,3 ± 422,4 a | 126,4 ± 8,0 a |
| HMA-3 | 90,5 ± 13,7 ab | 6300,4 ± 932,1 a | 159,8 ± 8,6 a |

Control 1- 22 mg L⁻¹ P: sin HMA con solución estándar de fósforo; Control 2- 44 mg L⁻¹ P: sin HMA con doble concentración de fósforo. HMA-1 *Machaeranthera*, HMA-2 Mezquite, HMA-3 Comercial. ± Error estándar de la media / Control 1-22 mg L⁻¹ P: without HMA with standard solution of phosphorus, Control 2- 44 mg L⁻¹ P: without HMA with double phosphorus concentration, HMA-1 *Machaeranthera*, Mezquite HMA-2, Commercial HMA-3. n=12 plants, ± standard error of the mean.

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas según Tukey ($p \leq 0,05$). / Different letters in columns indicate significant differences agreed with Tukey ($p \leq 0,05$).

Cuadro 5. Contenido de fósforo en frutos colectados a los 150 días de cultivo en condiciones de invernadero provenientes de plantas inoculados con micorrizas de chile piquín en ciudad Juárez, México. 2021.

Table 5. Fruit phosphorus content collected over 150 days of culture under greenhouse conditions from inoculated mycorrhiza plants of piquin chili in Juarez City, Mexico. 2021.

| Tratamiento | n | Fósforo en fruto (% PS) |
|---------------------------------|---|-------------------------|
| Control 22 mg L ⁻¹ P | 3 | 0,408 ± 0,02 a |
| Control 44 mg L ⁻¹ P | 3 | 0,411 ± 0,02 a |
| HMA <i>Machaeranthera</i> | 3 | 0,398 ± 0,02 a |
| HMA Mezquite | 3 | 0,402 ± 0,01 a |
| HMA Comercial | 3 | 0,381 ± 0,03 a |

± Error estándar de la media. / ± Standard error of the mean.

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas según Tukey ($p \leq 0,05$). / Different letters in columns indicate significant differences agreed with Tukey ($p \leq 0,05$).

Discusión

Los consorcios micorrícos nativos superaron estadísticamente a las plantas del control 1 con fertilización fosfórica, ya que mejoraron seis de siete variables agronómicas analizadas de chile piquín del ecotipo Juárez. Los HMA han recibido gran atención debido a que hacen simbiosis con más del 80 % de las plantas y por su impacto ecológico-económico al incrementar la nutrición y el rendimiento en la mayoría de los cultivos (Pereira et al., 2024; Zhao et al., 2015). La aplicación de HMA como microorganismos bioestimulantes pueden proteger a las plantas contra el estrés ambiental y minimizar los problemas relacionados con la excesiva fertilización (Sun & Shahrajabian, 2023).

En las localidades de Coahuila y Zacatecas, los chiles piquín silvestres fueron colonizados por siete especies de HMA, siendo *Rhizophagus intraradices* la más frecuente (Sánchez-Sánchez et al., 2018). Estudios filogenéticos de biodiversidad de simbiontes, revelaron que los HMA hacen asociaciones preferenciales con las plantas (Senés-Guerrero et al., 2020). La diversidad de hongos reportados en la rizósfera del género *Capsicum* y el de los consorcios micorrílicos aislados de las plantas provenientes del desierto chihuahuense pueden ser componentes inseparables en sus ecosistemas y realizar diversas funciones en las plantas inoculadas en el chile piquín ecotipo Juárez.

Las hojas funcionan como el órgano principal para la fotosíntesis, a mayor número de hojas será posible aprovechar más luz en esta especie y por lo tanto impactar en la calidad y el rendimiento total de chile piquín. En este estudio, el consorcio micorrílico de mezquite (HMA-1) fue el más consistente en proveer propiedades benéficas para incrementar significativamente el número de hojas en cada fecha de registro. El incremento del área foliar de chile rojo rizado fue atribuido solo a las inoculaciones con HMA (Putra et al., 2020). Existe evidencia que los controles tienen efectos más significativos en el incremento del número de hojas que las plantas inoculadas del chile Cayenne (Pulungan et al., 2023).

La amplia biodiversidad de los HMA ha conducido a tener asociaciones preferenciales con las plantas realizando diferentes funciones (Senés-Guerrero et al., 2020). El HMA comercial fue consistente en promover la altura de la planta durante el tiempo de estudio, en general los HMA fueron superiores a los controles. Se intuye que los HMA son capaces de suministrar nutrientes a las plantas para tener un mejor desarrollo en altura (Safira & Helmi, 2024; Subhash et al., 2025).

El chile pimiento mostró diferencia significativa en la altura de las plantas micorrizadas con consorcios aislados de la rizósfera de cultivos de chile poblano en comparación con las plantas control (Angulo-Castro et al., 2021). La aplicación de diferentes dosis de un grupo de micorrizas tuvo un efecto significativo en la altura de las plantas de chile Cayene (Pulungan et al., 2023) y en ecotipos de chiles perintis (Safira & Helmi, 2024). La interacción de endomicorrizas con *Azospirillum sp.* pueden ser eficientes en impactar la altura y la calidad fitoquímicos de chile morrón (*Capsicum annuum*) en invernadero (Pérez-Velasco et al., 2019).

Los HMA-3 y HMA-1 mostraron con mayor rapidez las diferencias en el diámetro del tallo y continuaron su contribución durante el tiempo de su estudio. Los HMA contribuyen en el grosor del tallo como una opción de sostener la producción de frutos en aquellos ecosistemas de suelos accidentados y con alta velocidad de aires. El sistema de producción de alta tecnología y la fertilización puede influir en la interacción del hospedero con la micorriza. Existe evidencia de que las micorrizas también incrementaron significativamente el diámetro del tallo del chile pimiento (Michels-Mighty et al., 2020).

Las micorrizas con aplicaciones exógenas de estimulantes del crecimiento (Fitomas-E) mezcladas con micorrizas mejoraron el diámetro de los tallos de las plantas de *Talipariti elatum* (sw.) fryxell (majagua) comparadas con las plantas control (Falcón Oconor et al., 2015). El consorcio HMA-2 aumentó significativamente el número de frutos, pero estadísticamente fue similar al resto de los consorcios y al control 2. Los consorcios nativos y el control 2 tuvieron más influencia en la producción de la cosecha total de frutos y en el peso unitario de frutos. Las inoculaciones micorrílicas incrementan el número de frutos y promueven los frutos más pesados que los de las plantas control, lo cual se traduce en altos rendimientos en el chile tipo cayenne (Tuhuteru et al., 2024).

Extractos de algas marinas combinados con HMA y con dosis estándar de fertilización incrementaron los rendimientos de frutos de chile morrón en un 31 % en condiciones altas de salinidad comparados con el control (Pal et al., 2024). Varias cepas de micorrizas tuvieron los más altos rendimientos en la longitud, diámetro y peso de frutos de chile cv. Kashi Anmol (Singh et al., 2023). La inoculación con consorcios micorrílicos mejoró las características agronómicas y calidad de los frutos de chile piquín (Mendoza-Villarreal et al., 2021).

En otro tipo de plantas, como las plantas inoculadas de tomate con HMA y combinadas con dosis bajas de fertilizante, se promovieron ganancias al incrementar el rendimiento de los frutos (Ziane et al., 2021). En el presente

estudio, el chile piquín silvestre inoculado con tres consorcios y la fertilización con 22 mg L⁻¹ P sin inoculación también incrementaron significativamente las variables agronómicas y las del rendimiento. Sin embargo, la influencia de los consorcios en los parámetros del rendimiento fue estadísticamente similar al control con doble dosis de P. Estos resultados sugieren que los consorcios evaluados establecieron una estrecha relación con el hospedero, lo que permitió una translocación de P comparable a la de las plantas fertilizadas con este nutriente.

La ausencia de diferencias entre tratamientos, indica que los consorcios micorrícos contribuyeron al contenido de fósforo en los frutos maduros tal como lo hicieron los tratamientos fertilizados con fósforo. Existen varios reportes donde distintas fuentes de micorrizas comerciales tienen diferentes niveles de influencia en el contenido de P en los diferentes órganos de los cultivos. Los consorcios de microorganismos usados como biofertilizantes no tuvieron influencia significativa en el contenido de P en hojas del chile habanero (Valdovinos-Nava et al., 2020). Las plantas inoculadas con micorrizas mostraron diferencias significativas en el contenido de P en hojas de cafeto (Hernández-Acosta et al., 2020).

El uso de endomicorrizas *Glomus intraradices* en la productividad y calidad de fitoquímicos de chile morrón aumento significativamente el contenido de P en los frutos comparado con sus controles (Pérez-Velasco et al., 2019). Las plantas inoculadas con diferentes micorrizas, el contenido de P y Zn fue significativamente incrementada en sus frutas de limón, naranja y mandarina (Ortas, 2018). En términos generales, se considera que los tres consorcios ensayados en este estudio tuvieron influencia en el contenido de P en la etapa de maduración del fruto del chile piquín tal como lo hicieron los controles fertilizados con P y sin inoculación micorríca.

Hay diferentes formas de la presencia del fósforo en el suelo, así que la forma de absorción por la hifa es el ortofosfato en la condición de iones H₂PO₄⁻ y traslocado a la planta (Khanum et al., 2024). Los consorcios bioestimulantes basados en microorganismos pueden positivamente influenciar en la absorción de nutrientes, reducir la toxicidad de minerales, mejorar el crecimiento del cultivo y el rendimiento (Mrid et al., 2021). Existe la necesidad de utilizar los microorganismos encontrados en la rizosfera para mejorar la salud del suelo e incrementar el crecimiento de las plantas, así como el rendimiento (Goswami et al., 2024).

El microbioma de plantas de garbanzo reveló que si hay salud en el suelo esto impactara positivamente en el rendimiento (Mukherjee et al., 2022). Las micorrizas arbusculares aisladas del suelo realizan simbiosis exitosas con las raíces y producen múltiples beneficios a las plantas hospederas cultivadas en macetas. En las micorrizas los efectos son más significativos cuando se mezclan que cuando se aplican una (Cao et al., 2021). Estos reportes apoyan que las condiciones en que se realizó este estudio proporcionan resultados relevantes que se podrían aplicar en el proceso de la domesticación del ecotipo Juárez. La demanda de los tipos de chiles en el mercado continúa creciendo, así que cualquier esfuerzo para incrementar la productividad es necesario.

La tecnología microbiológica como los HMA que son baratos y amigables con el medio ambiente podría ser una estrategia agrícola sustentable (Putra et al., 2020; Tanwar et al., 2025; Watson-Guido & Rivera-Méndez, 2005). Es bien documentado que la ingeniería micorríca tiene un impacto positivo en la adaptación de plantas al estrés asociado al clima. Dentro de estos se pueden citar a la salinidad, sequía y altas temperaturas (Sangeetha et al., 2024) como factores abióticos asociados a la biodiversidad de los ecosistemas donde se desarrolla el chile piquín.

Conclusiones

Los consorcios micorrízicos aislados de la rizosfera de las plantas nativas del desierto chihuahuense y el consorcio comercial impactaron significativamente las variables agronómicas y las del rendimiento de frutos de chile piquín en comparación con el control con 22 mg L⁻¹ de fósforo sin inoculación. Sin embargo, la influencia de los tres consorcios en las variables relacionadas con frutos fue estadísticamente similar al control con doble dosis

de fósforo. Los consorcios micorrícos también contribuyeron al contenido de fósforo en los frutos maduros, tal como lo hicieron los tratamientos fertilizados con fósforo.

Los resultados sugieren que los consorcios ensayados realizaron alguna asociación simbiótica con su hospedero, lo cual sugiere un gran potencial para aumentar la absorción de nutrientes en sistemas de producción sostenible en el ecotipo Juárez. Este estudio provee un apoyo para aplicar estos consorcios micorrícos en condiciones de invernadero y en campo. Más estudios de campo con inoculaciones de estos consorcios micorrícos son necesarios para evaluar los componentes del rendimiento y confirmar los beneficios de las aplicaciones de estas micorrizas en chile piquín.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por la beca de posgrado otorgada a Sergio Aldana quien colectó los datos y participó en el proceso del establecimiento del experimento.

Conflictos de interés

Los autores afirman que no existen conflictos de interés de ningún tipo que podrían haber influido en el desarrollo de esta publicación

Referencias

- Ahmed, S., Roro, A. G., Beshir, H. M., & Haile, A. (2023). Physiological growth, yield, and quality responses of hot pepper due to shade level. *International Journal of Vegetable Science*, 29(5), 375–402. <https://doi.org/10.1080/19315260.2023.2233955>
- Akande, T. Y., Erinle, K. O., & Bitire, T. D. (2023). Soil properties and growth of yellow bell pepper (*Capsicum annuum*) as influenced by compost and arbuscular mycorrhizal fungi. *Eurasian Journal of Soil Science*, 12(2), 159-168. <https://doi.org/10.18393/ejss.1219669>
- Akhoundnejad, Y., & Baran, S. (2023). Boosting drought resistance in pepper (*Capsicum annuum L.*) with the aid of arbuscular mycorrhizal fungi and key phytohormones. *Horticultural Science*, 58(11), 1358-1367. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI17370-23>
- Alcalá-Rico, J. S. G., Ramírez-Merz, M., Maldonado-Moreno, N., Borja-Bravo, M., Camposeco-Montejo, N., & López-Benítez, A. (2023). Variación morfológica en frutos de genotipos de chile piquín (*Capsicum annuum* var. *Glabriusculum*) del Noreste y Centro de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2): artículo 3482. <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3482>
- Angulo-Castro, A., Ferrera-Cerrato, R., Alarcon, A., Almaraz-Suarez, J. J., Delgadillo-Martinez, J., Jimenez-Fernandez, M., & Garcia-Barradas, O. (2021). Improved growth of bell pepper (*Capsicum annuum*) plants by inoculating arbuscular mycorrhizal fungi and beneficial rhizobacteria. *Scientia Fungorum*, 51, article 1299. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.51.1299>

- Canpolat, S., & İşlek, C. (2023). The effect of arbuscular mycorrhiza on physiological and biochemical parameters and capsaicinoid production in *Capsicum annuum* L.: A comparative study of extraction methods and solvents. *Archives of Biological Sciences*, 75(3), 327–339. <https://doi.org/10.2298/abs230601027c>
- Cao, M. A., Wang, P., Hashem, A., Wirth, S., Abd_Allah, E. F., & Wu, Q. S. (2021). Field inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi improves fruit quality and root physiological activity of citrus. *Agriculture*, 11(12), Article 1297. <https://doi.org/10.3390/agriculture11121297>
- Dzib-Ek, M. G., Andueza-Noh, R. H., Garruña, R., Zavala-León, M. J., Villanueva-Couoh, E., Rivera-Hernández, B., Torres-Cab, W. J., Alvarado-López, C. J., & Ruíz-Santiago, R. R. (2025). Influence of Fruit Ripeness on Physiological Seed Quality of Maax Pepper (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*). *Agronomy*, 15(3), Article 747. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030747>
- Falcón Oconor, E., Rodríguez Leyva, O., & Rodríguez Matos, Y. (2015). Aplicación combinada de micorriza y FitoMas-E en plantas de *Talipariti elatum* (Sw.) Fryxell (Majagua). *Cultivos Tropicales*, 36(4), 35-42. <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/1075>
- Fasusi, O. A., Cruz, C., & Babaloa, O. O. (2021). Agricultural sustainability: microbial biofertilizers in rhizosphere management. *Agriculture*, 11(2), Article 163. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020163>
- Franczuk, J., Tartanus, M., Rosa, R., Zaniewicz-Bajkowska, A., Dębski, H., Andrejiová, A., & Dydiv, A. (2023). The effect of mycorrhizal fungi and various mineral fertilizer levels on the growth, yield, and nutritional value of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *Agriculture*, 13(4), Article 857. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040857>
- Goswami, S. K., Kashyap, A. S., Kumar, R., Gujjar, R. S., Singh, A., & Manzar, N. (2024). Harnessing rhizospheric microbes for eco-friendly and sustainable crop production in saline environments. *Current Microbiology*, 81(1), Article 14. <https://doi.org/10.1007/s00284-023-03538-z>
- Guardiola-Márquez, C. E., Pacheco, A., Mora-Godínez, Schüßler, A., Gradilla-Hernández, M. S., & Senés-Guerrero, C. (2022). *Septoglomus* species dominate the arbuscular mycorrhiza of five crop plants in an arid region of northern Mexico. *Symbiosis*, 87(2), 93-106. <https://doi.org/10.1007/s13199-022-00851-2>
- Hayano-Kanashiro, C., Gámez-Meza, N., & Medina-Juárez, L. Á. (2016). Wild pepper *Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*: Taxonomy, plant morphology, distribution, genetic diversity, genome sequencing, and phytochemical compounds. *Crop Science*, 56(1), 1-11. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.11.0789>
- Hernández-Acosta, E., Trejo-Aguilar, D., Rivera-Fernández, A., & Ferrera-Cerrato, R. (2020). La micorriza arbuscular como biofertilizante en cultivo de café. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 613-628. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.659>
- Hu, J., Hou, S., Cai, P., Minghui, L., Cheng, Z., Wu, F., & Lin, X. (2023). Intercropping with maize (*Zea mays* L.) enhanced the suppression of pepper (*Capsicum annuum* L.) blight by arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Soils and Sediments*, 23(2), 891-901. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03351-4>
- Khanum, S., Al-Tawaha, A. R. M., Abu-Zaitoon, Y., Al-Tawaha, A. R., Alat rash, H., Rauf, A., Karnwal, A., Dey, A., Shatnawi M., Thangadurai, D., Sangeetha, J., Islam, S., Imram, Amanullah, Khalid, S., Saranraj, P., & Gunal, E. (2024). Mycorrhizal role in phosphorus metabolism. In J. Sangeetha, A. R. M. Al-Tawaha, & D. Thangadurai (Eds.), *Mycorrhizal technology: Managing plant stress and mitigating climate change using mycorrhizae* (pp. 1987-2008). Apple Academic Press.

- Koziol, L., & Bever, J. D. (2023). Crop productivity boosters: Native mycorrhizal fungi from an old-growth grassland benefits tomato (*Solanum lycopersicum*) and pepper (*Capsicum annuum*) varieties in organically farmed soils. *Microorganisms*, 11(8), Article 2012. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11082012>
- Liu, Y., He, B., Xiao, Q., Wang, X., Lin, X., & Hu, J. (2023). Earthworms facilitated pepper (*Capsicum annuum L.*) growth via enhancing the population and function of arbuscular mycorrhizal fungi in a low-density polyethylene-contaminated soil. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(1), Article 115. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00493-6>
- López-Moreno, H., Basurto-Garduño, A. C., Torres-Meraz, M. A., Diaz-Valenzuela, E., Arellano-Arciniega, S., Zalapa, J., Sawers, R. J. H., Cibrián-Jaramillo, A., & Diaz-García, L. (2023). Genetic analysis and QTL mapping of domestication-related traits in chili pepper (*Capsicum annuum L.*). *Frontiers in Genetics*, 14, Article 1101401. <https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1101401>
- Maiti, R., Rodríguez, H. G., & Valencia-Narváez, R. I. (2015). A study on autoecology and ecophysiology of chile piquín (*Capsicum annuum* Aviculare Dierb), a wild chilli of high medicinal and commercial value in Northeast Mexico. *International Journal of Bio-Resource & Stress Management*, 6, 292-299. <https://doi.org/10.5958/0976-4038.2015.00045.7>
- Megchún-García, J. V., Rebolledo-Martínez, A., Angel-Pérez, A. L. D., Nataren-Velázquez, J., & Capetillo-Burela, Á. (2024). Chile piquín (*Capsicum annuum* var. *Aviculare*) establecido en un revestimiento de plástico y arreglos espaciales. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(3), Artículo 3984. <https://era.ujat.mx/index.php/rera/issue/view/101>
- Mendoza-Villarreal, R., Robledo-Torres, V., Pérez-Rodríguez, M. A., Guillén-Enríquez, R. R., Martínez-Cueto, V., & Paredes-Jácome, J. R. (2021). Impacto de cubierta, ecotipo y endomicorriza en morfología y calidad de chile piquín. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(2), 193-204. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i2.2847>
- Michels-Mighty, J., Rodríguez-Fernández, P., & Montero-Limonta, G. (2020). Fertilriego e inoculación con *Glomus cubense* sobre crecimiento y productividad del pimiento en cultivo protegido: Array. *Maestro y Sociedad*, 17(2), 218-232. <https://maestrosysociedad.uo.edu.cu/index.php/MyS/article/view/5159>
- Mrid, R. B., Benmrid, B., Hafsa, J., Boukcm, H., Sobeh, M., & Yasri, A. (2021). Secondary metabolites as bioestimulant and bioprotectant agents: A review. *Science of The Total Environment*, 777, Article 146204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146204>
- Mukherjee, A., Singh, S., Gaurav, A. K., Chouhan, G. K., Jaiswal, D. K., Pereiro, A. P. D. A., Passari, A. K., Abdel-Azeem, A. M., & Verma, J. P. (2022). Harnessing of phytomicrobiome for developing potential bioestimulant consortium for enhancing the productivity of chickpea and soil health under sustainable agriculture. *Science of The Total Environment*, 836, Article 155550. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155550>
- Murillo-Amador, B., Rueda-Puente, E. O. Troyo-Dieguez, E. Córdoba-Matson, M. V., Hernández-Montiel, L. G., & Nieto-Garibay, A. (2015). Baseline study of morphometric traits of wild *Capsicum annuum* growing near two biosphere reserves in the peninsula of Baja California for future conservation management. *BMC. Plant Biology*, 15(1), Article 118. <https://doi.org/10.1186/s12870-015-0505-6>
- Ortas, I. (2018). Role of mycorrhizae on mineral nutrition of fruit trees. *Acta Horticulturae*, 1217(34), 271-284. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1217.34>

- Osuna-Ávila, P., Flores-Margez, J. P., & Corral-Díaz, B. (2021). Dinámica estacional de micorrizas arbusculares y hongos septados endofíticos oscuros en asociación con raíces de *Solanum elaeagnifolium* Cav. *Botanical Sciences*, 99(2), 291-304. <https://doi.org/10.17129/botsci.2769>
- Osuna-Rodríguez, J. M., Hernández-Verdugo, S., Osuna-Enciso, T., Pacheco-Olvera, A., Parra-Terraza, S., Romero-Higareda, C. E., & Retes-Manjarrez, J. E. (2023). Variations in salinity tolerance in wild pepper (*Capsicum annuum* L var. *glabriusculum*) populations. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 83(4), 432-443. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392023000400432>
- Pal, S. C., Hossain, M. B., Mallick, D., Bushra, F., Abdullah, S. M. R., Dash, P. K., & Das, D. (2024). Combined use of seaweed extract and arbuscular mycorrhizal fungi for alleviating salt stress in bell pepper (*Capsicum annuum* L.). *Scientia Horticulturae*, 325, Article 112597. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112597>
- Paredes-Jácome, J. R., Mendoza-Villarreal, R., Pérez-Rodríguez, M. A., Robledo-Torres, V., & Moreno-Limón, S. (2019). Agronomic behavior of piquin pepper ecotypes under photoselective covers. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 11(1), 53–67. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2018.05.011>
- Pereira, J. A. P., Vieira, I. J. C., Freitas, M. S. M., Lima, T. C., Mendoca, L. V. P., & Goncalves, Y de S. (2024). Effects of phosphorus and arbuscular mycorrhizal fungi on the quality of chili pepper fruits. *Journal of Plant Nutrition*, 47(8), 1319-1330. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2308192>
- Pérez-Velasco, E. A., Mendoza-Villarreal, R., Sandoval-Rangel, A., de la Fuente, M. C., Robledo-Torres, V., & Valdez-Aguilar, L. A. (2019). Evaluación del uso de endomicorrizas y *Azospirillum* sp. en la productividad y calidad nutracéutica de chile morrón (*Capsicum annuum*) en invernadero. *Información Técnica Económica Agraria*, 115(1), 18-30. <https://recyt.fecyt.es/index.php/ITEA/article/view/58577>
- Pulungan, A. S. S., Sari-Rangkuti, M. N., Imelda, Dlm, K. H., & Sativa-Heriyani, W. N. (2023). Pengaruh Pemberian Perbedaan Dosis Pupuk Mikoriza Terhadap Pertumbuhan Cabai Rawit (*Capsicum frutescens*) di Polibag. *Jurnal Pendidikan, Sains Dan Teknologi*, 4(1), 903-907. <http://jurnal.minartis.com/index.php/jpst/>
- Putra, S. S., Putra, E. T. S., & Widada, J. (2020). The effects of types of manure and mycorrhizal applications on sandy soils on the growth and yield of curly red chili (*Capsicum annuum* L.). *Caraka Tani: Journal of Sustainable Agriculture*, 35(2), 258-267. <https://doi.org/10.20961/carakatani.v35i2.34971>
- Ramírez-Novoa, U. I., Cervantes-Ortiz, F., Montes-Hernández, S., Raya-Pérez, J. C., Cibrian-Jaramillo, A., & Andrio-Enríquez, E. (2018). Diversidad morfológica del chile piquín (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) de Querétaro y Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(6), 1159-1170.
- Reyes-Acosta, D. J., Álvarez-Parrilla, E., Jiménez-Alvarado, R., Campos-Montiel, R. G., & Hernández-Fuentes, A. D. (2019). Actividad antioxidante de los extractos de chiltepín (*Capsicum annum*) cultivados bajo redes de colores. *Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP*, 5(10), 1-5. <https://doi.org/10.29057/icap.v5i10.4371>
- Ruiz-Núñez, N. D., Vásquez-Dávila, M. A., Manzanero-Medina, G. I., & Flores-Manzanero, A. (2024). Nurse plants, soil nutrients, and avian seed dispersal of wild chili peppers in a semiarid valley of Southern Mexico. *Journal of Arid Environments*, 227, Article 105297. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105297>
- Safira, C. N., & Helmi, H. (2024). Effectiveness of inoculation types and dosages of arbuscular mycorrhiza fungi (AMF) on the growth of perintis chili variety (*Capsicum annuum* L.) on Entisol soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1297(1), Article 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1297/1/012003>

- Sánchez-Sánchez, A. A., Salcedo-Martínez, S. M., Mendoza-Villarreal, R., Pinedo-Espinoza, J. M., & Moreno-Limón, S. (2018). Aislamiento e Identificación de Micorrizas arbúsculares (MA) Asociadas a la rizósfera del chile piquín (*Capsicum annuum* var. *aviculare* L.). *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3, 86-91. <http://eprints.uanl.mx/23682/1/57.pdf>
- Sangeetha, J., Al-Tawaha, A. R. M., & Thangadurai, D. (Eds.). (2024). *Mycorrhizal technology: Managing plant stress and mitigating climate change using mycorrhizae*. Apple Academic Press.
- Senés-Guerrero, C., Giménez, S., Pacheco, A., Gradilla-Hernández, M. S., & Schüßler, A. (2020). New MiSeq based strategy exposed plant-preferential arbuscular mycorrhizal fungal communities in arid soils of Mexico. *Symbiosis*, 81(3), 235-246. <https://doi.org/10.1007/s13199-020-00698-5>
- Singh, S., Singh, B. K., Singh, A. K., & Gangwar, V. (2023). Effect of various mycorrhizal strains on growth and yield attributes of chilli (*Capsicum annuum* L.) cv. Kashi Anmol. *The Pharma Innovation Journal*, 12(6), 4503-4507. <https://www.thepharmajournal.com/archives/?year=2023&vol=12&issue=6&page=52>
- Subhash, A. P., Veena, S. S., Makeshkumar, T., & Anith, K. N. (2025). *Piriformospora indica* and arbuscular mycorrhizal fungus suppress fungal root rot and mosaic diseases of cassava. *Symbiosis*, 95, 241-254. <https://doi.org/10.1007/s13199-025-01044-3>
- Sun, W., & Shahrajabian, M. H. (2023). The application of arbuscular mycorrhizal fungi as microbial bioestimulant, sustainable approaches in modern agriculture. *Plants*, 12(17), Article 3101. <https://doi.org/10.3390/plants12173101>
- Tanwar, A., Aggarwal, A., Saini, I., Kumar, T., Kumar, M., & Pichardo, S. T. (2025). Diversity and distribution of arbuscular mycorrhizal fungi associated with vegetable crops in Haryana, India. *Eurasian Journal of Soil Science*, 14(1), 46-57. <https://doi.org/10.18393/ejss.1574580>
- Torres-Moran, M. I., Rodríguez-Guzmán, E., Velasco-Ramírez, A. P., Escoto-Delgadillo, M., Riojas-López, M. E. Duran-Puga, N., & Lepiz-Lidefonso, R. (2022). Estudio preliminar de identificación a nivel molecular de ecotipos de chile piquín. *ECUCBA*, 9(18), 192-197. <https://doi.org/10.32870/ecucba.vi18.254>
- Toxqui-Tapia, R., Penalosa-Ramirez, J. M., Pacheco-Olvera, A., Albarran-Lara, A. L., & Oyama, K. (2022). Genetic diversity and genetic structure of *Capsicum annuum* L., from wild, backyard and cultivated populations in a heterogeneous environment in Oaxaca, Mexico. *Polibotanica*, 53(27), 87-103. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.53.6>
- Tuhuteru, A., Rumbiak, R. E., & dan Irianti, I. (2024). Effects of mycorrhizal on the growth and yield of cayenne pepper (*Capsicum frutescens* L.). *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 29(3), 418-429. <https://doi.org/10.18343/jipi.29.3.418>
- Valdovinos-Nava, W., Chan-Cupul, W., Hernández-Ortega, H. A., & Ruíz-Sánchez, E. (2020). Effects of biological and mineral fertilization on the growth, nutrition, and yield of *Capsicum chinense* under greenhouse conditions. *Journal of Plant. Journal on Plant Nutrition*, 43(15), 2286-2298. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1771586>
- Watson-Guido, W., & Rivera-Méndez, W. (2025). Comunicación en las asociaciones simbióticas: mecanismos entre hongos micorrílicos arbusculares, plantas y organismos edáficos. *Agronomía Mesoamericana*, 36(1), Artículo 57100. <https://doi.org/10.15517/am.2024.57100>
- Yakasai, U. A., & Rabiu, S., (2025). The impact of arbuscular mycorrhizal fungal inoculants on growth, nutrients, and yield of vegetable plants: a review. *FUDMA Journal of Sciences*, 9(3), 215-223. <https://doi.org/10.33003/fjs-2025-0903-3353>

Zhao, R., Guo, W., Bi, N., Guo, J., Wang, L., Zhao, L., & Zhang, J. (2015). Arbuscular mycorrhizal fungi affect the growth, nutrient uptake and water status of maize (*Zea mays* L.) grown in two types of coal mine spoils under drought stress. *Applied Soil Ecology*, 88, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.11.016>

Ziane, H., Hamsa, N., & Meddad-Hamsa, A. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi and fertilization rates optimize tomato (*Solanum lycopersicum* L.) growth and yield in a Mediterranean agroecosystem. *Journal of the Saudi Society of agricultural Sciences*, 20(7), 454-458. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.05.009>

Manuscrito aceptado