

## 9. Hongos micorrízicos arbusculares y salud del suelo bajo el sistema milpa intercalada con árboles frutales en la mitigación del cambio climático

TANIA ROMERO FIGUEIRAS\*

PABLO ANDRÉS MEZA\*\*

JOAQUÍN MURGUÍA GONZÁLEZ\*\*\*

ALEJANDRO ESPINOSA CALDERÓN\*\*\*\*

OTTO RAÚL LEYVA OVALLE\*\*\*\*

RICARDO SERNA LAGUNES\*\*\*\*

JULIO DÍAZ JOSÉ\*\*\*\*

MIGUEL CEBADA MERINO\*\*\*\*

MARÍA ELENA GALINDO TOVAR\*\*\*\*

MAURO SIERRA MACÍAS\*\*\*\*

MARGARITA TADEO ROBLEDO\*\*\*\*

JOSÉ LUIS DEL ROSARIO-ARELLANO\*\*\*\*



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.296.09>

### Resumen

Las milpas con árboles han tomado gran importancia debido a que contribuyen a mitigar las adversidades del cambio climático y la degradación del suelo. Cuando las milpas son intercaladas con árboles frutales reciben el nombre de MIAF. En Campo Grande, municipio de Ixtaczoquitlán, Veracruz, se estableció un módulo experimental tipo MIAF con cuatro hileras de

---

\* Maestra en Ciencias en Ingeniería Química. Profesora, Universidad Veracruzana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6926-5002>

\*\* Doctor en Ciencias en Recursos Genéticos y Productividad-Genética. Profesor, Universidad Veracruzana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0575-0084>

\*\*\* Doctor en Ciencias, especialista en Agroecosistemas Tropicales. Profesor, Universidad Veracruzana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5087-4943>

\*\*\*\* Doctor en Ciencias en Recursos Genéticos. Profesor, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7128-4712>

\*\*\*\* Doctor en Ciencias en Recursos Genéticos y Productividad-Genética. Profesor, Universidad Veracruzana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6150-9367>

\*\*\*\* Doctor en Ciencias en Recursos Genéticos y Productividad en Ganadería. Profesor, Universidad Veracruzana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1265-9614>

árboles frutales dispuestos en curvas de nivel, plantados a 1 m de separación entre ellos y 7.8 m entre hileras. Los árboles frutales fueron: durazno (*Prunus persica*), limón persa (*Citrus latifolia* Tan.) y lichi (*Litchi chinensis*); distribuidos bajo un arreglo de bloques completamente al azar. Se sembró en cada franja lateral a los árboles, y en forma intercalada en hileras, cuatro surcos de maíz y frijol. Se aplicaron 6 tratamientos: (a) Consorcio de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) + *Rhizobium etli* (1) + 50% de fertilización mineral (FM); (b) Consorcio de HMA + *Rhizobium etli* (2) + 50% de FM; (c) *Rhizophagus irregularis* + *Rhizobium etli* (1) + 50% de FM; (d) *Rhizophagus irregularis* + *Rhizobium etli* (2) + 50% de FM; (e) 100% de FM (testigo positivo); y (f) 0% de FM (testigo negativo). La formación de consorcios microbianos impulsó la actividad biológica en el suelo, facilitando la descomposición de materia orgánica, la mineralización de nutrientes y la fijación de nitrógeno atmosférico. Estas actividades microbianas contribuyeron a mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas y, favorecieron el crecimiento y el desarrollo de los cultivos.

**Palabras clave:** *sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF), hongos micorrízicos arbusculares, cambio climático.*

## Introducción

Los sistemas agroforestales tradicionales (SAFT) incluyen biodiversidad silvestre y domesticada, animales y vegetales manejados por el ser humano

\*\*\*\* Doctor en Problemas Económico-Agroindustriales. Profesor, Universidad Veracruzana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0182-8814>

\*\*\*\* Maestría en Horticultura Tropical. Profesor, Universidad Veracruzana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6483-304X>

\*\*\*\* Doctora en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales. Profesora, Universidad Veracruzana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5296-6996>

\*\*\*\* Doctor en Ciencias Agrícolas y Forestales. Profesor, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6476-2192>

\*\*\*\* Doctora en Ciencias en Recursos Genéticos y Productividad-Genética. Profesora, Universidad Nacional Autónoma de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9801-8721>

\*\*\*\* Doctor Ciencias Agropecuarias. Profesor, Universidad Veracruzana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1768-566X>

(Moreno-Calles et al., 2014), donde árboles se asocian con cultivos agrícolas en espacio y tiempo, lo que genera un equilibrio ecológico y económico entre los componentes del sistema (Duché-García et al., 2021). Sin embargo, los SAFT se encuentran bajo la presión de los sistemas de producción agrícola, pecuaria y forestal de carácter especializado, y de la racionalidad económica que los impulsa. Diversos factores socio-ecológicos asociados a esos sistemas productivos especializados ponen en riesgo a los sistemas agroforestales tradicionales (Boege, 2008).

En este contexto, las milpas son un tipo de sistema agrícola que intercala cultivos como maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), calabaza (*Cucurbita* spp.), chile (*Capsicum* spp.), haba (*Vicia faba* L.) y soya (*Glycine max* L. Mer.) entre otros (Zambrano et al., 2021; Zambrano et al. 2023). Cuando las milpas son intercaladas con árboles frutales reciben el nombre de MIAF (Cortés et al., 2005); este sistema es una tecnología agrícola multiobjetivo para resolver problemas económicos, sociales, ecológicos y de alimentación que aquejan a las familias rurales que siembran en condiciones de laderas (Cortés et al., 2005; Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [Sader], 2023). Las milpas con árboles han tomado gran importancia debido a que contribuyen a mitigar las adversidades del cambio climático y la degradación del suelo (Albino, 2014). Estudios recientes demuestran que, más allá de la producción de alimentos, los sistemas agroforestales como el MIAF son cruciales para la adaptación y mitigación climática. Según Hergoualc'h y Verchot (2014), estos sistemas tienen un alto potencial de secuestro de carbono en la biomasa (tanto en los árboles como en los cultivos) y en el suelo, lo que contribuye directamente a la mitigación al reducir los gases de efecto invernadero en la atmósfera. Además, el aumento de la materia orgánica del suelo, impulsado por las prácticas del MIAF, mejora la capacidad de retención de agua, lo cual es una estrategia clave de adaptación ante la intensificación de las sequías y el estrés hídrico (Lasco et al., 2014).

El sistema MIAF ha tenido buenos resultados en los estados de Oaxaca, Puebla, Veracruz, Chiapas, Guerrero y Estado de México, demostrando su eficacia para reducir la degradación de los suelos, producir granos básicos para la alimentación y frutas para su comercialización, con lo cual mejoran los ingresos familiares (Torres-Zambrano et al., 2008). Además,

permite un aprovechamiento integral del suelo, agua, luz solar, mano de obra familiar, captura de carbono y actividad microbiana, que es básica para mejorar la calidad de los suelos (Cortés et al., 2005; Cadena-Iñiguez et al., 2018).

Por otro lado, el suelo es un complejo de partículas físicas, sustancias y materiales orgánicos que junto con el aire y el agua conforman un recurso esencial para el sostenimiento de la vida de muchos organismos, incluyendo al hombre. El funcionamiento de un ecosistema depende en gran medida de la actividad microbiana del suelo, ya que los microorganismos son los protagonistas de diversas actividades biogeoquímicas benéficas para las plantas a las que se asocian (Jaizme-Vega y Rodríguez-Romero, 2008). Los suelos contienen una amplia variedad de formas biológicas con tamaños muy diferentes, como virus, bacterias, hongos, algas, colémbolos, ácaros, lombrices, nemátodos, hormigas y, por supuesto, las raíces vivas de las plantas vasculares (Andrade-Torres, 2010).

Entre los microorganismos que se encuentran en el suelo están los hongos formadores de micorrizas, conocidos también como hongos micorrízicos arbusculares (HMA) (Lara-Capistrán et al., 2021). Los HMA son microorganismos del suelo que forman una relación simbiótica con 80-90% de especies de plantas vasculares y 90% de plantas agrícolas (Navarro y Ramos-Zapata, 2021), incluyendo la mayoría de los cultivos de importancia económica, particularmente cereales y plantas hortícolas (Diagne et al., 2020).

Los efectos de los hongos micorrízicos arbusculares sobre el crecimiento y sobre los elementos fisiológicos en las plantas han sido ampliamente estudiados en *Solanum lycopersicum*, *Sorghum bicolor* (L.) Moench, *Cucurbita máxima* Duchesne, *Piper longum* L., *Phaseolus vulgaris* L., y algunos árboles frutales como *Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. y Nakai, *Prunus cerasifera* L., entre otros. En todas las especies, los hongos micorrízicos arbusculares desbloquean y facilitan la absorción de nutrientes como el nitrógeno (N), zinc (Zn) y fósforo (P) (Kouadio et al., 2017). También brindan protección contra patógenos; a cambio de ello, la planta le cede carbohidratos y proteínas para su sostenimiento metabólico. La planta y el hongo actúan como simbioses: juntos son capaces de aumentar hasta 25% la producción y no alteran el entorno ambiental. En los ecosistemas débiles y

amenazados, las micorrizas son las principales cooperadoras para el establecimiento y desarrollo de las plantas (Noda, 2009).

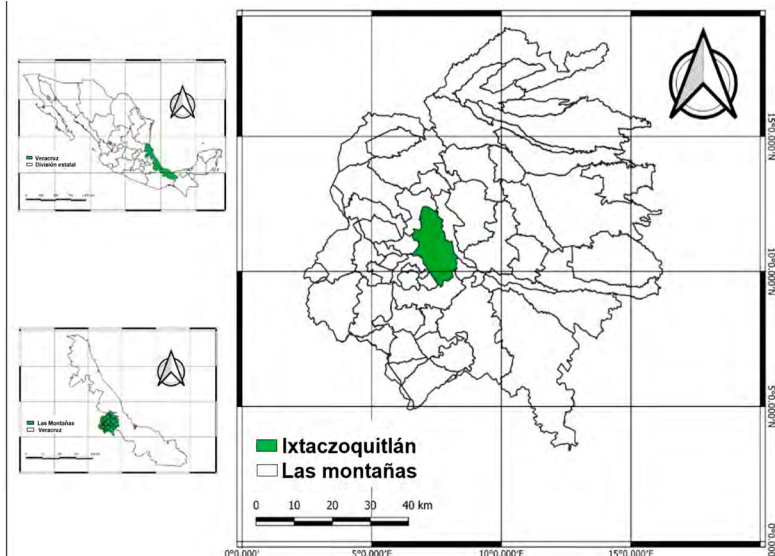
Estos antecedentes nos ayudan a entender la interacción planta-suelo-microorganismo en sistemas agrícolas antropizados, y su importancia en el mejoramiento de la salud el suelo. Por ello, el objetivo general del presente trabajo de investigación fue determinar el efecto de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y *Rhizobium* sobre algunas características agronómicas y fisiológicas en un sistema de milpa intercalado con árboles frutales (MIAF).

## Materiales y métodos

### Área de estudio

La investigación se realizó en la comunidad Campo Grande, municipio de Ixtaczoquitlán, Veracruz, México, ubicada geográficamente a los 18° 49' LN,

Figura 9.1. Ubicación del área de estudio. Área natural protegida Metlac-Río Blanco



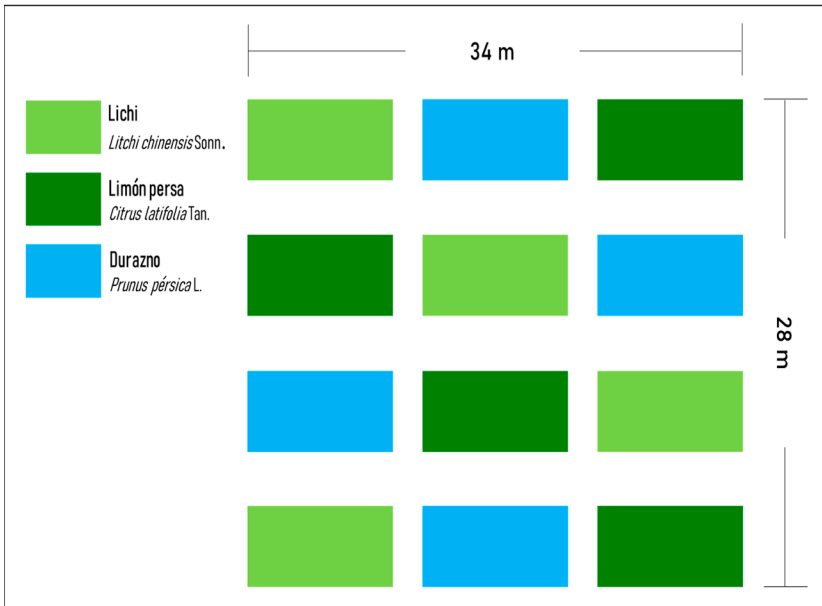
Fuente: Elaboración propia.

97° 1' LO, y una altitud de 881 msnm (figura 9.1). El clima en la localidad es *Am b(i)g* cálido húmedo, con una precipitación media anual de 2035.5 mm, y una temperatura media anual de 19 °C. El tipo de suelo es luvisol, con una pendiente de aproximadamente 27%.

### Diseño y establecimiento de la parcela MIAF

Durante el ciclo otoño-invierno, del periodo 2020-2021, se estableció un módulo experimental tipo MIAF con cuatro hileras de árboles frutales dispuestos en curvas de nivel, plantados a 1 m de separación entre ellos y 7.8 m entre hileras. Los árboles frutales fueron de tres especies: durazno (*Prunus pérsica*), limón persa (*Citrus latifolia* Tan.) y lichi (*Litchi chinensis*), distribuidos bajo un arreglo de bloques completamente al azar (figura 9.2).

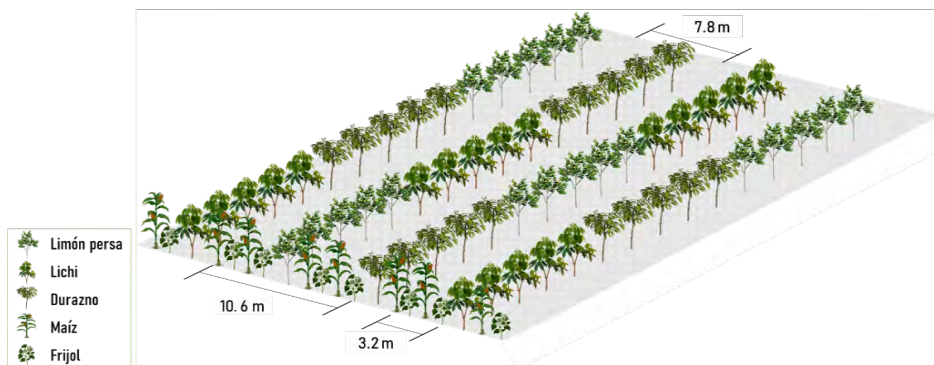
Figura 9.2. Distribución de los árboles frutales en el módulo MIAF



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, durante el ciclo primavera-verano, del año 2021, se sembró en cada franja, a un costado de los árboles e intercalados en hileras, cuatro surcos de maíz y frijol. En el caso del maíz se sembró la variedad nativa, *criollo crema*, a una distancia entre matas de 0.6 m; en cuanto al frijol, se plantó la variedad *criollo negro* a 0.3 m, entre surcos, a una distancia de 0.80 m. La unidad de observación estuvo constituida por un surco de 5 m de largo. Al momento de la siembra se depositaron tres semillas de maíz o frijol por golpe; a los 15 días después de la siembra (DDS) se aclareó, dejando dos plantas por mata. En ambos cultivos se estimó una densidad de población de 20 833 y 41 667 plantas  $\text{ha}^{-1}$ , respectivamente (figura 9.3).

Figura 9.3. Arreglo espacial y temporal de la milpa intercalada con árboles frutales



Fuente: Elaboración propia.

## Fuente de inóculo y diseño de tratamientos

Las fuentes de inóculo utilizadas fueron: *Rhizophagus irregularis* y un consorcio micorrízico compuesto por 13 géneros de HMA, entre los que destacan *Glomus dimorphicum*, *Rhizophagus fasciculatus*, *Funneliformis mosseae* (250 propágulos  $\text{g}^{-1}$ ), y dos cepas de *Rhizobium etli* ( $9 \times 10^7$  unidades formadoras de colonias [UFC]  $\text{g}^{-1}$ ) provenientes de la empresa BioFábrica Siglo XXI. La inoculación se realizó directamente a la semilla del frijol y del maíz en razón de 50 g de inóculo por cada kilogramo de semilla. Como adherente se utilizó carboximetil celulosa.

Se aplicaron 6 tratamientos: (a) Consorcio HMA + *Rhizobium etli* (1) + 50 % de FM; (b) Consorcio HMA + *Rhizobium etli* (2) + 50 % de FM; (c) *Rhizopagus irregularis* + *Rhizobium etli* (1) + 50 % de FM; (d) *Rhizopagus irregularis* + *Rhizobium etli* (2) + 50 % de FM; (e) 100 % de FM (testigo positivo); y (f) 0 % de FM (testigo negativo). Todos los tratamientos se establecieron bajo un diseño experimental de bloques completamente al azar con 4 repeticiones.

### Características físicoquímicas y biológicas del suelo

Para determinar la fertilidad del suelo se tomaron submuestras en diferentes puntos de acuerdo con las características topográficas del terreno. La profundidad de cada unidad muestral fue de 0 a 40 cm; posteriormente, se homogenizó el suelo recogido y se obtuvo una muestra compuesta. En laboratorio se determinó la clase textural, el pH, la densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ), los carbonatos totales (%), la conductividad eléctrica ( $\text{dS/m}$ ), y los macro y micronutrientes. Así mismo, para el análisis biológico se determinó la cantidad de materia orgánica y las unidades formadoras de colonia (UFC) de hongos, bacterias y actinomicetos presentes en el suelo.

### Manejo del experimento

La fertilización mineral para el cultivo de maíz y frijol se realizó con la fórmula 70 N-60 P-00 K y 35 N-35 P-00 K, respectivamente. Al momento de la siembra de maíz se aplicó 1/3 de N y todo el  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; posteriormente, 30 DDS se emplearon los 2/3 restantes del N; mientras que para el frijol todo el fertilizante se aplicó al momento de la siembra. Los frutales se fertilizaron con la fórmula 20 N-10 P-20 K, a razón de 120 g/planta/año; esta dosis se fraccionó en dos aplicaciones; de la misma manera, se suministró alrededor de las plantas un fertilizante líquido PUSH-UP® a razón de 7 litros  $\text{ha}^{-1}$ , lo anterior para favorecer el establecimiento y desarrollo radicular de los árboles.

## Siembra en macetas e inoculación con HMA, *Rhizophagus irregularis* y *Rhizobium etli*

Bajo condiciones de invernadero se sembró maíz y frijol con las mismas variedades utilizadas en campo. Las semillas se depositaron en macetas plásticas de 2 litros (0.70 kg). El sustrato utilizado fue suelo recolectado del módulo experimental. Al maíz y frijol se les aplicaron 15 tratamientos resultantes de la combinación de *rhizobium*, HMA y dosis de fertilización mineral (0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %). Los tratamientos se establecieron bajo un diseño experimental completamente al azar. Después de 6 semanas de crecimiento, las plantas fueron cosechadas para medir algunas variables agronómicas y fisiológicas.

### Variables evaluadas

Las variedades evaluadas fueron las siguientes: (a) Altura de la plántula: se registró la altura en centímetros desde la base del tallo hasta la última hoja de cuatro plantas tomadas al azar; esta actividad se realizó con la ayuda de una regla; (b) Diámetro de tallo: se registró el diámetro de tallo en milímetros desde la base hasta la primera hoja en cuatro plantas tomadas al azar, esta actividad se llevó a cabo con la ayuda de un *vernier*; (c) Área foliar: se registró el largo y ancho de tres hojas desde el tercio inferior, medio y superior de cada planta, así como el número de hojas, en cuatro plantas tomadas al azar. El área foliar se calculó al multiplicar el largo por el ancho foliar, por el número de hojas. El valor final se expresó en cm<sup>2</sup>; y (d) Unidades SPAD (Soil Plant Analysis Development): se determinó con un medidor SPAD-502 Plus, dispositivo de medición portátil no destructivo para medir el contenido de clorofila de las hojas. Se tomó el promedio de las lecturas realizadas en el tercio inferior, medio y superior de cada planta.

## **Análisis estadístico**

Todas las variables fueron sometidas a una prueba de homogeneidad de varianzas y normalidad mediante la prueba de Bartlett y Shapiro-Wilk. Aquellas variables que no presentaron una distribución normal se transformaron para su análisis. Posteriormente, se realizaron análisis de varianza y una prueba de comparación de medias Duncan ( $P \leq 0.05$ ). Los datos fueron analizados mediante el software estadístico STATGRAPHICS® Plus 5.0.

## **Resultados y discusión**

### **Análisis fisicoquímico del suelo**

Los resultados de los indicadores físicos evaluados se muestran en la tabla 9.1. El módulo agroforestal tipo MIAF presenta un suelo de textura fina con una densidad aparente de  $1.785 \text{ g/cm}^3$ , el cual disminuyó a  $1.58 \text{ g/cm}^3$  como resultado del establecimiento de la parcela agrícola MIAF. Si la densidad aparente se vuelve demasiado alta puede limitar el crecimiento de las raíces de las plantas. Esto podría provocar estrés por aireación (Stepniewski et al., 1994), temperatura del suelo más baja y cambios en los procesos biológicos (Brussaard y Van Faassen, 1994), así como aumento de la desnitrificación (Linn y Doran, 1984) y pérdida de hongos micorrízicos (Ellis, 1998). La susceptibilidad de los suelos a la compactación varía con la textura, siendo los suelos arcillosos más vulnerables que los suelos arenosos (Bünemann et al., 2018).

En cuanto a los indicadores químicos, se observa que el suelo pasó de un pH moderadamente ácido, con 5.70, a un pH ácido, con 4.90 (tabla 9.1). Uno de los fenómenos que pudo ocasionar dicho resultado es la descomposición de la materia orgánica por microorganismos presentes en el suelo, produciendo un constante suplemento de  $\text{CO}_2$ , que fácilmente se transforma en ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ); así, en combinación con las bases intercambiables del suelo (K, Ca, Mg), se lavan del perfil llevando al suelo, de esta forma, a condiciones que desarrollan acidez.

Tabla 9.1. *Propiedades físicas y químicas del suelo antes y después de establecer el sistema agrícola MIAF*

<i>Indicadores</i>	<i>Ciclo productivo cero (2020)</i>	<i>Ciclo productivo uno (2021)</i>	<i>Unidad</i>
<i>Físicos</i>			
Densidad aparente	1.78	1.58	g/cm <sup>3</sup>
<i>Químicos</i>			
pH	5.70	4.90	--
Conductividad eléctrica	0.023	0.039	Sdm <sup>-1</sup>
Carbonatos totales	0.13	--	%
Nitrógeno total	0.081	0.125	%
P asimilable	0.78	1.08	mg/Kg
Ca ++	1998.4	2003.4	mg/Kg
Mg ++	119.93	147.74	mg/Kg
Na +	9.89	10.35	mg/Kg
K +	37.05	56.94	mg/Kg
CIC	13.70	15.38	cmol.kg <sup>-1</sup>
Fe	19.10	66.60	mg/Kg
Cu	0.30	1.22	mg/Kg
Zn	0.15	0.53	mg/Kg
Mn	5.50	17.29	mg/Kg
B	0.29	0.73	mg/Kg

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, los fertilizantes nitrogenados que forman amonio (NH<sub>4</sub>), como la urea, pasan por procesos de oxidación biológica o nitrificación, lo que lleva inevitablemente a la acidificación del suelo. Es importante mencionar que la mineralización de la materia orgánica también produce NH<sub>4</sub> como producto final del proceso de descomposición. Este NH<sub>4</sub> contribuye, de igual forma, a la acidificación del suelo después de la nitrificación (Espinoza y Molina, 1999). El suelo se encuentra libre de carbonatos y sales. Los valores de la conductividad eléctrica (CE) fluctuaron entre 0.023 Sdm<sup>-1</sup>, en el ciclo 0, a 0.039 Sdm<sup>-1</sup> en el ciclo 1.

Al final del primer ciclo productivo, la materia orgánica incrementó de 1.71 a 2.76%; es decir, de moderadamente bajo a moderadamente alto (tabla 9.1). La materia orgánica se deriva de la descomposición y transformación microbiana de los detritos de las plantas y los exudados de las raíces (Guo et al., 2020). Diversos estudios reportan que la composición de la materia

orgánica disuelta en el suelo se deriva principalmente de los lixiviados de los desechos vegetales y los rizodepósitos liberados por los exudados de raíz, secreciones y raíces finas que se desprenden durante el alargamiento de la raíz, y compuestos orgánicos del recambio de micorrizas. Este aumento en la materia orgánica es un indicador directo del potencial de mitigación del sistema MIAF, ya que contribuye al secuestro de carbono en el suelo (Lasco et al., 2014; Hergoualc'h y Verchot, 2014). La materia orgánica (MO) y el nitrógeno total (NT) son dos propiedades fundamentales para evaluar la fertilidad del suelo.

### Análisis microbiológico del suelo

Los resultados del análisis microbiológico se muestran en la tabla 9.2; estos presentan un incremento en la cantidad de bacterias (de  $55.0 \times 10^6$  a  $68.0 \times 10^6$  UFC/g), hongos (de  $73.55 \times 10^2$  a  $511.7 \times 10^2$  UFC/g) y actinomicetos (de  $48.61 \times 10^5$  a  $53.19 \times 10^5$  UFC/g) al final del primer ciclo productivo. En general, los microorganismos más abundantes en el suelo son las bacterias; no obstante, los hongos, por su tamaño, representan alrededor de 70% de la biomasa. Lo anterior es importante debido a que la actividad microbiana de la rizosfera es, en gran medida, responsable del funcionamiento del ecosistema y de la fertilidad de los suelos agrícolas.

Tabla 9.2. *Propiedades biológicas del suelo antes y después de establecer el sistema agrícola MIAF*

<i>Indicadores biológicos</i>	<i>Ciclo productivo cero (2020)</i>	<i>Ciclo productivo uno (2021)</i>	<i>Unidad</i>
Materia orgánica	1.71	2.76	%
Bacterias	$55.0 \times 10^6$	$68.0 \times 10^6$	UFC/g
Hongos	$73.55 \times 10^2$	$511.7 \times 10^2$	UFC/g
Actinomicetos	$48.61 \times 10^5$	$53.19 \times 10^5$	UFC/g

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados mostraron que los sistemas agroforestales promovían una mayor densidad de bacterias en comparación con los sistemas agrícolas convencionales. Además, se observó una mayor diversidad y actividad mi-

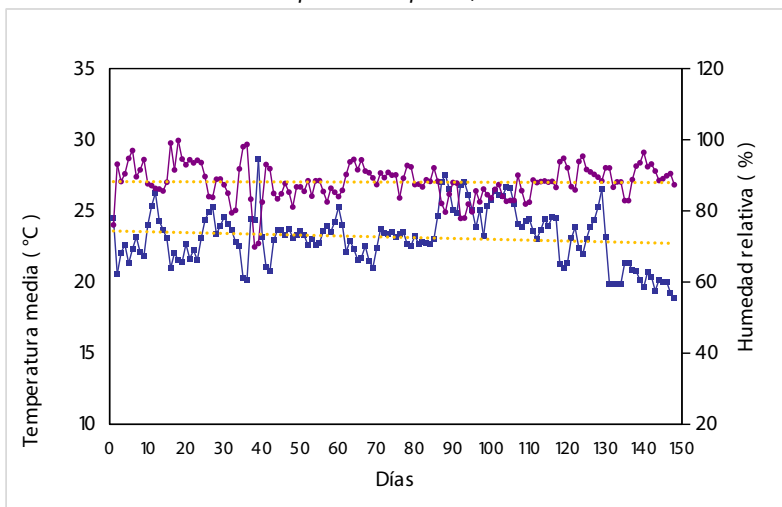
crobiana en los suelos de los sistemas agroforestales. Estos hallazgos respaldan nuestros resultados, donde se encontró una alta densidad de bacterias en el sistema agrícola agroforestal estudiado.

También, los sistemas agroforestales favorecen la presencia y diversidad de hongos en comparación con los sistemas agrícolas convencionales. Este incremento de hongos, especialmente los HMA, es una estrategia clave de adaptación, ya que estos microorganismos mejoran la capacidad de las plantas para resistir el estrés hídrico y absorber nutrientes incluso en condiciones de sequía, un efecto que se espera se intensifique con el cambio climático (Li et al., 2025; Revanna et al., 2022). Estos hallazgos son consistentes con nuestros resultados, donde se encontró una densidad relativamente alta de hongos en el suelo del sistema agrícola agroforestal.

### Parámetros climáticos

Durante el periodo de evaluación se registró la humedad relativa y temperatura imperante en el área de estudio (gráfica 9.1). La humedad relativa

Gráfica 9.1. Humedad relativa y temperatura registrados en la localidad de Campo Grande, municipio Ixtaczoquitlán, Veracruz



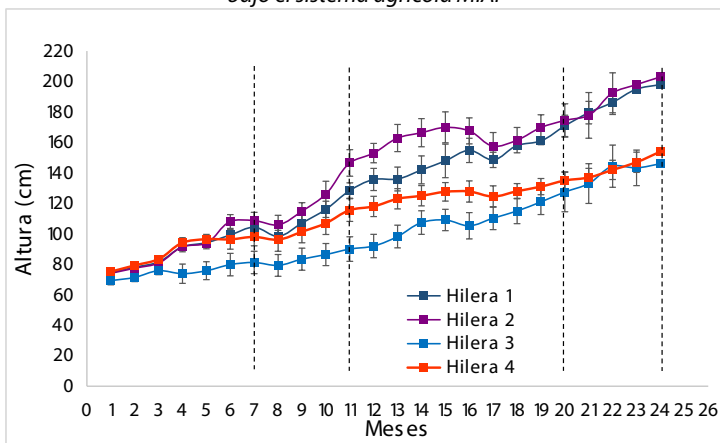
Fuente: Elaboración propia.

registrada se mantuvo en un rango de 69.9 a 99.8 %, con un promedio de 88.1 %, mientras que el promedio de la temperatura diaria osciló entre 18.9 y 28.6 °C. Las características climáticas se encuentran entre los factores más importantes que influyen en las propiedades del suelo, pues alteran la composición y biomasa microbiana de este (Yin et al., 2022; Das et al., 2023). Asimismo, se sabe que el contenido de agua del suelo limita los procesos biológicos en los suelos (Paz-Ferreiro et al., 2010).

## Limón persa

En la gráfica 9.2 se muestra la cinética de crecimiento del limón persa (*Citrus latifolia* Tan.), en ella, se observa que la posición de los frutales dentro de la parcela ha influido en su desarrollo con un rango de crecimiento de 60 a casi 200 cm, aproximadamente. Durante el mes 15 se advierte un decremento en la altura a causa de las podas de formación que se realizaron para darle la fuerza estructural necesaria para soportar una cosecha máxima bien distribuida con exposición de luz solar y accesibilidad para las prácticas culturales y de cosecha.

Gráfica 9.2. Cinética de crecimiento de los árboles de limón persa bajo el sistema agrícola MIAF



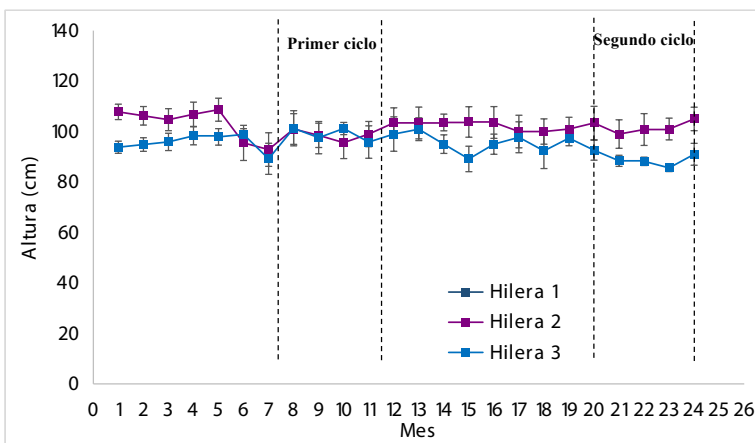
Fuente: Elaboración propia. Nota: Los valores son medias  $\pm$  desviación estándar.

La temperatura influye en el desarrollo del cultivo, la floración y la maduración del fruto. La temperatura óptima del limón persa va de 25 a 31 °C; la temperatura mínima para el cultivo es de 18 °C y la máxima, de 38 °C. Las bajas temperaturas provocan paralización del crecimiento del árbol y, en etapas de fructificación, inducen caídas de frutos; lo anterior sugiere que el cultivo de limón persa es factible en la localidad de Campo Grande, municipio Ixtaczoquitlán, Veracruz.

## Lichi

El lichi (*Litchi chinensis*) crece bien en lugares tropicales con temperaturas altas del orden de los 30 °C; asimismo, requiere de una humedad relativa de entre 70 y 80%. En la zona más importante de producción de lichi, en China, las temperaturas promedio máximas y mínimas va de los 19 a los 9 °C, respectivamente, en enero, mientras que durante el mes de julio oscilan entre los 33 y los 25 °C. No obstante, pese a estar dentro del rango de temperatura óptima, la cinética de crecimiento del lichi no ha cambiado durante su fase de crecimiento (gráfica 9.3); debido a que el cultivo no ha mostrado una buena adaptación a las condiciones edafoclimáticas del

Gráfica 9.3. Cinética de crecimiento de lichi bajo el sistema agrícola MIAF



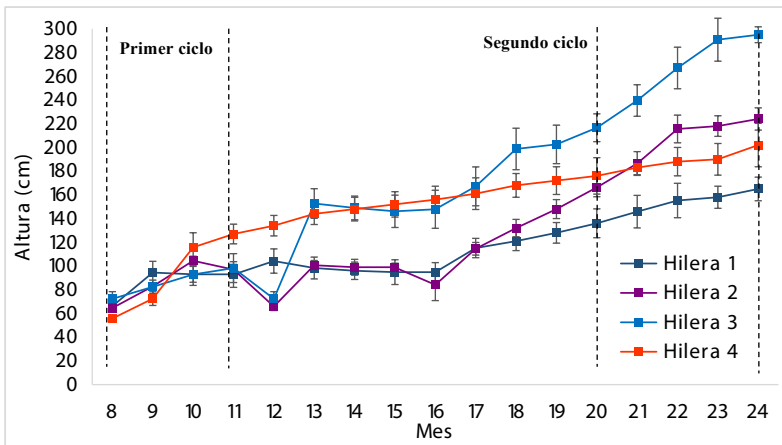
Fuente: Elaboración propia. Nota: Los valores son medias  $\pm$  desviación estándar.

campo. Los suelos ácidos y la presencia de micorrizas en las raíces siempre se han considerado sumamente benéficos y esenciales.

## Durazno

Los árboles de durazno (*Prunus persica*) presentaron la mayor cinética de desarrollo: de 60 a 280 cm, aún cuando se realizaron podas de crecimiento, los árboles respondieron bien al establecimiento (gráfica 9.4).

Gráfica 9.4. Cinética de crecimiento de durazno bajo el sistema agrícola MIAF



Nota: Los valores son medias  $\pm$  desviación estándar.

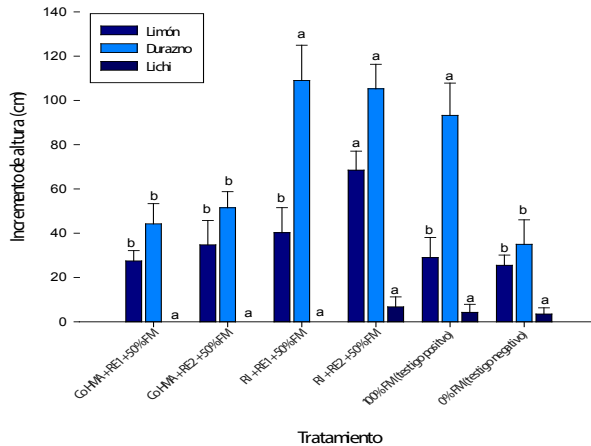
Fuente: Elaboración propia.

No obstante, la falta de bajas temperaturas puede ser también un problema, pues requieren de 400 a 800 horas de frío. Presentan un adecuado desarrollo en los suelos francos, franco-arenosos y franco-arcillosos, con un pH de 6 a 8 y precipitación de 900 a 1 500 mm anuales (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2016).

En conjunto, los resultados de los frutales muestran que el sistema MIAF no sólo permite una producción exitosa en condiciones locales, sino

que también fortalece su capacidad de adaptación. El durazno y el limón persa, en particular, mostraron una buena respuesta de crecimiento, lo que sugiere que el sistema les proporciona el soporte agronómico necesario para prosperar incluso con la variabilidad climática. Este fortalecimiento de la resiliencia es un punto clave para la seguridad alimentaria en el contexto del cambio climático (Quandt et al., 2023). El tratamiento que presentó un mayor efecto en las tres especies de árboles frutales fue *rhizophagus irregularis* + *rhizobium etli* (2) + 50% de fertilización mineral, generando incrementos de altura de  $68.5 \pm 8.6$  cm en los árboles de limón persa;  $105.3 \pm 11.0$  cm, en durazno; y  $6.8 \pm 4.5$  cm, en lichi (gráfica 9.5). Bolan (1991) y Fitter y Garbaye (1994) consideran que el beneficio de las micorrizas se traduce en un mayor crecimiento y desarrollo de las plantas en beneficio de la adaptación, y en eficiencia nutricional al facilitar una mayor absorción de nutrientes minerales del suelo.

Gráfica 9.5. Efecto de los tratamientos en el incremento de altura de los árboles frutales bajo el sistema agrícola MIAF



Nota: Los valores son medias  $\pm$  desviación estándar. Diferentes letras en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variable analizada ( $p \leq 0.05$ ). Co: Consorcio, HMA: hongos micorrízicos, RE1: *rhizobium etli* (cepa 1), RE2: *rhizobium etli* (cepa 2), RI: *rhizophagus irregularis*, FM: Fertilización mineral.

Fuente: Elaboración propia.

## Plántulas inoculadas de maíz

En relación con la altura de la plántula de maíz, los tratamientos 9 y 10 mostraron las mayores alturas con valores promedio de  $2.2 \pm 0.0$  y  $1.3 \pm 0.0$ , respectivamente, seguidos por los tratamientos 4 y 5, con alturas promedio de  $1.9 \pm 0.2$  (tabla 9.3). Estos resultados indican que los tratamientos 9, 10, 4 y 5 promovieron un mayor crecimiento en altura de las plántulas de maíz en comparación con los demás tratamientos. Por otro lado, los tratamientos 1 y 11 presentaron las alturas más bajas con valores promedio de  $0.8 \pm 0.2$  y  $0.9 \pm 0.1$ , respectivamente. Estos resultados sugieren que los tratamientos 1 y 11 tuvieron un efecto negativo en el crecimiento de las plántulas.

Tabla 9.3. Efecto de los tratamientos estudiados en el desarrollo morfológico de las plantas de maíz

Tratamiento	Inóculo	Dosis de FM (%)	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Unidades SPAD
1	Testigo	0	$0.8 \pm 0.2$ g	$7.3 \pm 0.8$ d	$20 \pm 2.1$ bcd
2	Testigo	25	$1.7 \pm 0.2$ cd	$11.7 \pm 1.6$ bc	$19.4 \pm 0.0$ d
3	Testigo	50	$1.8 \pm 2.0$ bcd	$11.0 \pm 0.5$ c	$26.9 \pm 0.7$ abc
4	Testigo	75	$1.9 \pm 0.2$ abc	$11.7 \pm 2.2$ bc	$25.6 \pm 1.8$ abcd
5	Testigo	100	$1.9 \pm 0.2$ abcd	$15.6 \pm 0.6$ a	$30.2 \pm 3.5$ a
6	Consorcio HMA	0	$1.1 \pm 0.2$ fg	$7.7 \pm 2.3$ d	$19.6 \pm 2.2$ cd
7	Consorcio HMA	25	$1.5 \pm 0.0$ de	$11.3 \pm 0.5$ c	$23.0 \pm 4.9$ bcd
8	Consorcio HMA	50	$2.1 \pm 0.1$ ab	$14.0 \pm 0.2$ ab	$22.2 \pm 2.9$ bcd
9	Consorcio HMA	75	$2.2 \pm 0.0$ a	$14.4 \pm 2.3$ a	$32.0 \pm 7.8$ a
10	Consorcio HMA	100	$1.3 \pm 0.0$ ef	$11.4 \pm 0.1$ c	$31.7 \pm 6.2$ a
11	<i>R. Irregularis</i>	0	$0.9 \pm 0.1$ g	$7.8 \pm 1.3$ d	$21.7 \pm 1.3$ bcd
12	<i>R. Irregularis</i>	25	$1.8 \pm 0.2$ cd	$11.8 \pm 1.3$ bc	$20.2 \pm 2.9$ bcd
13	<i>R. Irregularis</i>	50	$1.9 \pm 0.2$ abcd	$10.7 \pm 1.0$ c	$27.2 \pm 2.3$ ab
14	<i>R. Irregularis</i>	75	$1.8 \pm 0.2$ bcd	$11.3 \pm 2.1$ c	$31.4 \pm 3.4$ a
15	<i>R. Irregularis</i>	100	$1.8 \pm 0.1$ bcd	$14.7 \pm 1.3$ a	$30.1 \pm 2.4$ a

Nota: Los valores son medias  $\pm$  desviación estándar. Diferentes letras en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variable analizada ( $\leq 0.05$ ). Fm: Fertilización mineral, HMA: Hongos Micorrízicos Arbusculares, R: Rhizophagus.

Fuente: Elaboración propia.

Al considerar trabajos previos similares, en un estudio realizado por Zulueta-Rodríguez et al. (2020) se encontró que la inoculación de semillas de maíz con una cepa específica de rizobacterias indujo un mayor crecimiento en altura de las plántulas en comparación con el control no tratado. Estos hallazgos respaldan nuestros resultados, donde los tratamientos 9, 10, 4 y 5 podrían estar relacionados con la inoculación de otros similares.

En cuanto al diámetro del tallo, los tratamientos 9, 10, 14 y 15 exhibieron los mayores valores promedio, lo que indica un mayor grosor del tallo en comparación con los demás tratamientos. Estos resultados sugieren que dichos procedimientos favorecieron el desarrollo y la fortaleza del tallo de las plántulas de maíz. Por otro lado, los tratamientos 1, 6 y 11 mostraron los diámetros de tallo más bajos en comparación con los demás tratamientos, lo que indica una menor fortaleza estructural.

Sánchez-Roque et al. (2022) investigaron el efecto de la inoculación con hongos micorrízicos en el crecimiento y desarrollo del maíz. Los resultados revelaron que la inoculación con ciertas especies de hongos promovió un mayor diámetro del tallo en comparación con el control. Estos resultados son consistentes con nuestros hallazgos, donde los tratamientos 9, 10, 14 y 15, que mostraron los diámetros de tallo más grandes, podrían estar relacionados con la inoculación de tratamientos similares.

En cuanto a las unidades SPAD, los tratamientos 9, 10, 14 y 15 exhibieron los valores más altos, lo que señala una mayor concentración de clorofila y una mejor salud de las plántulas de maíz. Estos resultados sugieren que dichos tratamientos favorecieron una mejor fotosíntesis y un mayor rendimiento de las plantas. Por otro lado, los tratamientos 1, 2 y 6 mostraron los valores más bajos de unidades SPAD, lo que indica una menor concentración de clorofila y posiblemente una menor capacidad fotosintética.

En un estudio realizado por Zhou et al. (2022), se encontró que la aplicación de un fertilizante orgánico en el suelo reveló una mayor concentración de clorofila en las hojas de las plantas de maíz. Estos resultados respaldan nuestros hallazgos, donde los tratamientos 9, 10, 14 y 15 señalaron las unidades SPAD más altas que podrían estar relacionados con tratamientos similares que mejoran la salud y la fotosíntesis de las plántulas de maíz. Por lo tanto, ciertos tratamientos de inoculación y fertilización pueden mejorar el crecimiento y la salud de las plántulas de maíz.

## Plántulas inoculadas de frijol

Los tratamientos 10, 5 y 15 revelaron las alturas más altas con valores promedio de  $0.68 \pm 0.5$ ,  $0.53 \pm 0.0$  y  $0.54 \pm 7.0$ , respectivamente (tabla 9.4).

Tabla 9.4. Efecto de los tratamientos estudiados en el desarrollo morfológico de las plantas de frijol

Tratamiento	Inóculo	Dosis de FM (%)	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Unidades SPAD
1	Testigo	0	49.0 ± 7.9bcd	3.3 ± 0.3 fg	31.2 ± 1.7 ab
2	Testigo	25	45.7 ± 2.5 d	3.7 ± 0.5 defg	31.4 ± 2.1 ab
3	Testigo	50	37.0 ± 0.0e	4.9 ± 0.4 abcd	34.9 ± 0.8 ab
4	Testigo	75	48.0 ± 2.0bcd	4.8 ± 0.3 abcde	34.3 ± 3.9 ab
5	Testigo	100	53.0 ± 3.0 bc	5.1 ± 1.3 abc	36.8 ± 0.8 a
6	Consorcio HMA/ <i>rhizobium</i>	0	27.3 ± 3.1 f	3.5 ± 0.3 efg	29.3 ± 4.7 ab
7	Consorcio HMA/ <i>rhizobium</i>	25	34.0 ± 3.6 e	4.6 ± 0.4 bcdef	32.3 ± 8.2 ab
8	Consorcio HMA/ <i>rhizobium</i>	50	35.0 ± 2.0 e	5.0 ± 0.5 abc	33.2 ± 2.2 ab
9	Consorcio HMA/ <i>rhizobium</i>	75	44.5 ± 2.5 d	5.4 ± 0.7 ab	36.5 ± 2.5 ab
10	Consorcio HMA/ <i>rhizobium</i>	100	68.0 ± 5.0 a	6.0 ± 0.6 a	33.2 ± 2.2 ab
11	<i>R. Irregularis</i> / <i>rhizobium</i>	0	22.0 ± 1.0 f	3.0 ± 0.2 g	28.5 ± 5.4 c
12	<i>R. Irregularis</i> / <i>rhizobium</i>	25	23.0 ± 1.0 f	4.0 ± 0.2 cdefg	29.5 ± 5.4 ab
13	<i>R. Irregularis</i> / <i>rhizobium</i>	50	27.0 ± 3.0 f	4.6 ± 0.5 bcde	32.6 ± 1.5 ab
14	<i>R. Irregularis</i> / <i>rhizobium</i>	75	46.3 ± 5.7 cd	5.0 ± 1.5 abc	37.4 ± 0.8 a
15	<i>R. Irregularis</i> / <i>rhizobium</i>	100	54.3 ± 7.0 b	5.0 ± 1.0 abc	32.3 ± 8.2 ab

Nota: Los valores son medias ± desviación estándar. Diferentes letras en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variable analizada ( $p \leq 0.05$ ). Fm: Fertilización mineral, HMA: Hongos Micorrízicos Arbusculares, R: Rhizopagus.

Fuente: Elaboración propia.

Dichos resultados indican que estos tratamientos promovieron un mayor crecimiento en altura de las plántulas de frijol en comparación con los demás tratamientos. Por otro lado, los tratamientos 6, 11 y 12 presentaron

las alturas más bajas, con valores promedio de  $0.27 \pm 0.0$ ,  $0.22 \pm 1.0$  y  $0.23 \pm 1.0$ , respectivamente. Estos resultados sugieren que tales tratamientos tuvieron un efecto negativo en el crecimiento de las plántulas. Al considerar trabajos previos similares, en un estudio realizado por Chalk et al. (2006), examinaron el efecto de diferentes inoculantes en el crecimiento de plántulas de leguminosas. Los resultados señalaron que la inoculación con una cepa específica de rizobacterias provocó un mayor crecimiento en altura de las plántulas de frijol en comparación con el control no tratado. Estos hallazgos respaldan nuestros resultados, donde los tratamientos 10, 5 y 15, que mostraron las alturas más altas, podrían estar relacionados con la inoculación de tratamientos similares.

En cuanto al diámetro del tallo, los tratamientos 10, 9 y 15 exhibieron los mayores valores promedio, lo que indica un mayor grosor del tallo en comparación con los demás tratamientos. Estos resultados sugieren que estos tratamientos favorecieron el desarrollo y la fortaleza del tallo de las plántulas de frijol. Por otro lado, los tratamientos 1, 2 y 11 mostraron los diámetros de tallo más bajos en comparación con los demás tratamientos, lo que indica una menor fortaleza estructural.

Lynch et al. (1991) investigaron el efecto de la inoculación con hongos micorrízicos en el crecimiento y desarrollo del frijol. Los resultados revelaron que la inoculación con ciertas especies de hongos propició un mayor diámetro del tallo en comparación con el control. Estos resultados son consistentes con nuestros hallazgos, donde los tratamientos 10, 9 y 15, que mostraron los diámetros de tallo más grandes, podrían estar relacionados con la inoculación de tratamientos similares.

En cuanto a las unidades SPAD, los tratamientos 5, 9 y 10 exhibieron los valores más altos, lo que indica una mayor concentración de clorofila y una mejor salud de las plántulas de frijol. Estos resultados sugieren que dichos tratamientos promovieron una mejor fotosíntesis y un mayor rendimiento de las plantas. Por otro lado, los tratamientos 11 y 12 mostraron las unidades SPAD más bajas, lo que indica una menor capacidad fotosintética.

Un estudio realizado por Liu et al. (2019), evaluaron el efecto de diferentes tratamientos de fertilización en la concentración de clorofila en diferentes cultivos. Los resultados señalaron que ciertos tratamientos de fertilización favorecieron una mayor concentración de clorofila en comparación

con el control. Estos hallazgos respaldan nuestros resultados, donde los tratamientos 5, 9 y 10, que mostraron las unidades SPAD más altas, podrían estar relacionados con tratamientos similares que mejoran la salud y la fotosíntesis de las plántulas de frijol.

En cuanto al área foliar, los tratamientos 8, 5 y 14 presentaron los mayores valores promedio, lo que indica un mayor desarrollo y expansión del área foliar en comparación con los demás tratamientos. Dichos resultados sugieren que estos tratamientos favorecieron el crecimiento de las hojas y la captación de luz para la fotosíntesis. Por otro lado, los tratamientos 1, 11 y 12 mostraron las áreas foliares más bajas en comparación con los demás tratamientos, lo que indica un menor desarrollo foliar.

En un estudio previo, Martínez et al. (2017) examinaron el efecto de diferentes tratamientos de riego en el desarrollo del área foliar de las plantas de frijol. Los resultados indicaron que ciertos tratamientos de riego favorecieron un mayor desarrollo del área foliar en comparación con el control. Estos hallazgos son consistentes con nuestros resultados, donde los tratamientos 8, 5 y 14, que mostraron las áreas foliares más grandes, podrían estar relacionados con tratamientos similares que promueven el desarrollo foliar en las plántulas de frijol.

## Conclusiones

La formación de consorcios microbianos impulsa la actividad biológica en el suelo, facilitando la descomposición de materia orgánica, la mineralización de nutrientes y la fijación de nitrógeno atmosférico. Estas actividades microbianas contribuyen a mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas y, por lo tanto, favorecen el crecimiento y desarrollo de los cultivos. En los sistemas de producción agrícola sostenible, el uso de consorcios microbianos se ha convertido en una estrategia importante para reducir la dependencia de fertilizantes químicos y pesticidas al promover la salud del suelo y la conservación del medio ambiente. El hecho de fomentar la diversidad microbiana y establecer interacciones beneficiosas puede lograr una considerable eficiencia en la utilización de nutrientes, una resistencia superior a enfermedades y una mayor productividad agrícola. Además, es-

tas mejoras en la salud del suelo fortalecen la resiliencia del sistema productivo frente a los efectos del cambio climático, contribuyendo tanto a la adaptación como a la mitigación.

## Referencias

- Albino, G. (2014). *El sistema agroforestal Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF): productividad y optimización económica del maíz y frijol* [Tesis de doctorado, Colegio de Postgraduados].
- Andrade-Torres, A. (2010). Micorrizas: antigua interacción entre plantas y hongos. *Ciencia*, 61, 84-90.
- Boege, E. (2008). *El patrimonio biocultural de los pueblos indígenas de México: hacia la conservación in situ de la biodiversidad y agrodiversidad en los territorios indígenas*. Instituto Nacional de Antropología e Historia / Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas.
- Bolan, N. (1991). A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. *Journal Plant and Soil*, 134, 189-207.
- Brussaard, L., y Faassen, H. van (1994). Effects of compaction on soil biota and soil biological processes. En B. D. Soane y C. van Ouwerkerk (Eds.), *Soil compaction in crop production* [Vol. 11, pp. 215-235]. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444882868500180>
- Bünemann, E., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R., Deyn, G. de, Goede, R. de, Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., Groenigen, J. van, y Brussaard, L. (2018). Soil quality: A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125.
- Cadena-Iñiguez, P., Camas-Gómez, R., López-Báez, W., López-Gómez, H., y González-Cifuentes, J. (2018). El MIAF, una alternativa viable para laderas en áreas marginadas del sureste de México: caso de estudio en Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(7), 1351-1361.
- Chalk, P., Souza, R., Urquiaga, S., Alves, B., y Boddey, R. (2006). The role of arbuscular mycorrhiza in legume symbiotic performance. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 2944-2951.
- Cortés, F., y Isabel, J. (2005). *Manual para el establecimiento y manejo del sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en laderas*. Colegio de Postgraduados.
- Das, S., Deb, S., Sahoo, S., y Sahoo, U. (2023). Soil microbial biomass carbon stock and its relation with climatic and other environmental factors in forest ecosystems: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 43(6), 933-945. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2022.12.007>
- Diagne, N., Ngom, M., Djighaly, P., Fall, D., Hoher, V., y Svistoonoff, S. (2020). Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and performance: Importance in biotic and abiotic stressed regulation. *Diversity*, 12(10).

- Duché-García, T., Ocampo-Fletes, I., Cruz-Hernández, J., Hernández-Guzmán, J., Macías-López, A., Jiménez-García, D., y Hernández-Romero, E. (2021). Microbial groups in a milpa agroecosystem interclassified with fruit trees in high valleys of Puebla, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(2), 1-17.
- Ellis, F. (1998). Household strategies and rural livelihood diversification. *The Journal of Development Studies*, 35(1), 1-38.
- Espinosa, J., y Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de suelos*. International Plant Nutrition Institute.
- Fitter, A., y Garbaye, J. (1994). Interactions between mycorrhizal fungi and other soil organisms. *Plant and Soil*, 159, 123-133.
- Guo, X., Gao, Q., Yuan, M., Wang, G., Zhou, X., Feng, J., Shi, Z., Hale, L., Wu, L., Zhou, A., Tian, R., Liu, F., Wu, B., Chen, L., Jung, C., Niu, S., Li, D., Xu, X., Jiang, L., y Zhou, J. (2020). Gene-informed decomposition model predicts lower soil carbon loss due to persistent microbial adaptation to warming. *Nature Communications*, 11(1).
- Hergoualc'h, K., y Verchot, L. V. (2014). Stocks and flows of carbon and greenhouse gases in tropical agroforestry systems. *Advances in Agroforestry* (pp. 1-28). Springer.
- aizme-Vega, M., y Rodríguez-Romero, A. (2008). Integración de microorganismos benéficos (Hongos micorrízicos y bacterias rizosféricas) en agrosistemas de las Islas Canarias. *Agroecología*, 3, 33-39.
- Kouadio, A., Nandjui, J., Krou, S., Séry, D., Nelson, P. N., y Zézé, A. (2017). A native arbuscular mycorrhizal fungus inoculant outcompetes an exotic commercial species under two contrasting yam field conditions. *Rhizosphere*, 4, 112-118.
- Lara-Capistrán, L., Hernández-Montiel, L. G., Reyes-Pérez, J. J., Zulueta-Rodríguez, R., Jazayeri, S. M., y Villamar-Torres, R. O. (2021). Diversity and Ecology of Arbuscular Mycorrhization Fungi. En: N. R. Maddela y L. C. García (Eds), *Innovations in Biotechnology for a Sustainable Future* [pp. 185-201]. Springer.
- Lasco, R. D., Pulhin, J. E., y de Guia, L. D. C. (2014). Climate change adaptation and mitigation in agroforestry systems in the Philippines: A review. *Agroforestry Systems*, 88(4), 717-730.
- Linn, D., y Doran, J. (1984). Effect of Water Filled Pore Space on Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Production in Tilled and Non-Tilled Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 48, 1267-1272.
- Liu, C., Liu, Y., Lu, Y., Liao, Y., Nie, J., Yuan, X., y Chen, F. (2019). Use of a leaf chlorophyll content index to improve the prediction of above-ground biomass and productivity. *PeerJ*, 6.
- Lynch, J., Läuchli, A., y Epstein, E. (1991). Vegetative growth of the common bean in response to phosphorus nutrition. *Crop Science*, 31(2), 380-387.
- Martínez, S., Rodríguez, L., y Torres, M. (2017). Effect of irrigation treatments on leaf area development in bean plants. *Irrigation Science*, 35(4), 345-356.
- Moreno-Calles, A., Galicia-Luna, V., Casas, A., Toledo, V., Vallejo-Ramos, M., Santos-Fita, D., y Camou-Guerrero, A. (2014). Etnoagroforestería: El estudio de los sistemas agroforestales tradicionales de México. *Etnobiología*, 12(3), 1-16.

- Navarro-Cetina, F., y Ramos-Zapata, J. (2021). Micorriza arbuscular en plantas de Yuca-tán. *Bioagrocencias*, 14(1).
- Noda, Y. (2009). Las Micorrizas: Una alternativa de fertilización ecológica en los pas-tos. *Pastos y Forrajes*, 32(2).
- Paz-Ferreiro, J., Trasar-Cepeda, C., y Leirós, M. (2010). Effect of management and clima-te on biochemical properties of grassland soils from Galicia (NW Spain). *European Journal of Soil Biology*, 46(2), 136-143.
- Quandt, A., Neufeldt, H., y Gorman, K. (2023). Climate change adaptation through agroforestry: opportunities and gaps. *Current Opinion in Environmental Sustain-ability*, 60, 101244. <http://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101244>
- Rathod, R. V., Kumar, R., VijayKumar, R., Jyothishree, L., y Mubeen, M. (2024). The role of soil microorganisms in carbon sequestration and climate change mitigation in agroecosystems. *Global Agri Vision*, 11(3), 62-69.
- Revanna, A., Bagyaraj, D. J., y Raju, B. M. (2022). Dual inoculation with rhizobia and arbuscular mycorrhizal fungus improves water stress tolerance and productivity in soybean. *Plant Stress*, 4, 100084. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100084>
- Sánchez-Roque, Y., Pérez-Luna, Y., Santos-Espinoza, A., y Gutiérrez-Miceli, F. (2022). Evaluation of the effect of native arbuscular mycorrhizal fungi and vermicompost leachate on the yield and quality of field-grown peanuts. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-15.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2023). *MIAF, un sistema multiobjetivo*. Sader. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/miaf-un-sistema-multiobjetivo>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2016). *Atlas Agroalimentario*. SIAP.
- Stepniewski, W., Glinski, J., y Ball, B. (1994). Chapter 8 - Effects of Compaction on Soil Aeration Properties. En B. D. Soane y C. van Ouwerkerk (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production* (Vol. 11, pp. 167-189). Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B97804444882868500167>
- Torres-Zambrano, J., Cortés Flores, J., Turrent Fernández, A., Hernández Romero, E., y Muratalla Lúa, A. (2008). Rendimiento de fruto y número de ramas principales en árboles de durazno intercalados con milpa. *Terra Latinoamericana*, 26(3), 265-273.
- Torres Zambrano, J. P., Cortés Flores, J. I., Turrent Fernández, A., Volke Haller, V. H., Ortiz Solorio, C. A., y Jiménez López, A. (2021). Caracterización físico-química y clasificación del suelo de ladera manejado bajo el sistema Milpa Intercalada con árboles frutales. *Teknos Revista científica*, 21(2), 35-45. <https://doi.org/10.25044/25392190.1031>
- Torres Zambrano, J., Contreras Hernández, A., y González Amaro, R. (2021). Las milpas y los árboles. *Portal*.
- Yin, S., Liang, G., Wang, C., y Zhou, Z. (2022). Asynchronous seasonal patterns of soil microorganisms and plants across biomes: A global synthesis. *Soil Biology and Bio-chemistry*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108859>
- Zhou, Z., Zhang, S., Jiang, N., Xiu, W., Zhao, J., y Yang, D. (2022). Effects of organic fertili-zer incorporation practices on crops yield, soil quality, and soil fauna feeding activi-ty in the wheat-maize rotation system. *Frontiers in Environmental Science*, 10.

Zulueta-Rodríguez, R., Gómez-Merino, F., Alemán-Chávez, I., Núñez-Camargo, M., y Lara-Capistrán, L. (2020). Respuesta del cultivo de maíz a la bio-inoculación y fertilización química reducida en campo. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 597-612.