



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

**DG** Dirección General  
de Investigación  
Universidad de San Carlos de Guatemala

---

## **Informe final de Proyecto de Investigación**

**DIGI-PUI-004**

**Informe final de proyecto de investigación**

**Universidad de San Carlos de Guatemala**

**Dirección General de Investigación**

**Programa Universitario de Investigación en Recursos Naturales y Ambiente -PUIRNA-**

**Caracterización de hongos micorrízicos arbusculares en suelos cultivados con *Elaeis guineensis***

**Jacq. en el caserío Santa Rosa, Sayaxché, Petén, Guatemala.**

**Unidad avaladora: Centro Universitario de Petén (CUDEP).**

**Partida presupuestaria 4.8.67.2.01**

**Nombre del coordinador: Dr. Marco Antonio Martínez Cuestas**

**Santa Elena de la Cruz, Flores, Petén, 08 de enero 2026**



## Informe final de Proyecto de Investigación

### Autoridades de la Dirección General de Investigación

Dra. Alice Patricia Burgos Paniagua

Directora General de Investigación

MSc. Inga. Andrea Rodas Morán

Coordinadora del Programa Universitario de Investigación (PUIRNA)

### Equipo de investigación

Dr. Marco Antonio Martínez Cuestas (Coordinador), Registro de personal: 20090803

Ing. Marvin Enrique Rosales Peche (Investigador), Registro de Personal: 20091168

Madeline Rusell De León López (Auxiliar de investigación I), Registro de Personal: 20250638

Bryan Rolando Morales Requena (Auxiliar de investigación I), Registro de Personal: 20250640

Marlon Obdulio Sánchez Pérez (Auxiliar de investigación I), Registro de Personal: 20250637

Edgar René Garrido Morales (Auxiliar de investigación I), Registro de Personal: 20250641

Reny Aparicio Alvarado Pérez (Auxiliar de investigación I), Registro de Personal: 20250639

Dr. Nicolás González Cortés (Colaborador) Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), México

Dra. Ana Laura Luna Jiménez (Colaboradora) Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), México

Dr. Román Jiménez Vera (Colaborador) Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), México.

El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la DIGI de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria número: 4.8.67.2.01 en el Programa Universitario de Investigación en Recursos Naturales y Ambiente (PUIRNA).

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.

**Este informe está licenciado bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).**

Puede copiarse, distribuirse y adaptarse con la condición de dar crédito a los autores, no usarlo con fines comerciales y compartir cualquier obra derivada bajo la misma licencia.

Para más información, visite: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>



## Informe final de Proyecto de Investigación

### Índice general

Índice de tablas .....	3
Índice de figuras .....	4
Resumen .....	6
Abstract.....	7
1. Introducción.....	7
2. Contexto de la investigación.....	8
3. Revisión de literatura.....	10
3.1. Generalidades sobre el cultivo de palma de aceite ( <i>Eleais guineensis</i> Jacq.) .....	10
3.2. La palma aceitera: Producción y consumo .....	11
3.3. Principios generales de la fertilización en palma de aceite .....	11
3.4. Producción y consumo de aceite de palma en Guatemala.....	12
3.5. Importancia de las micorrízicos arbusculares en agricultura.....	13
3.6. Beneficios de las micorrízicos en el cultivo de palma de aceite .....	14
3.7. Colonización de raíces por hongos micorrízicos.....	15
3.8. Metodologías para la evaluación de la colonización micorrizica.....	15
3.9. Estudios sobre simbiosis micorrizica con palma de aceite.....	16
4. Planteamiento del problema .....	17
5. Objetivos.....	19
6. Hipótesis (si aplica) .....	19
7. Método.....	19
7.1. Tipo de investigación.....	19
7.2. Enfoque y alcance de la investigación.....	20
7.3. Diseño de la investigación.....	20
7.4. Población, muestra y muestreo.....	20
7.5. Técnicas.....	21
7.6. Resumen de las variables o unidades de análisis.....	32
7.7. Procesamiento y análisis de la información.....	34
8. Aspectos éticos y legales .....	35
9. Resultados.....	35



## **Informe final de Proyecto de Investigación**

9.1. Propiedades físico-químicas del suelo.....	35
9.2. Propágulos micorrízicos en raíz de palma de aceite.....	37
9.3. Esporas de HMA en suelo de palma de aceite.....	38
9.4. Incremento de esporas de HMA nativos en planta trampa.....	39
9.4.1 Infectividad en plantas trampa de maíz ( <i>Zea mays</i> L).....	39
9.4.2 Densidad de esporas en plantas trampa de maíz ( <i>Zea mays</i> L).....	41
9.5. Caracterización de géneros de HMA.....	44
9.5.1 Identificación y validación de géneros de HMA.....	45
9.5.2 Diversidad y abundancia de géneros de HMA.....	46
9.5.3 Esporas de HMA identificadas.....	48
10. Discusión de resultados.....	48
10.1. Análisis de suelo de palma de aceite.....	48
10.2. Infectividad de Propágulos micorrízicos en raíz de palma de aceite.....	49
10.3. Densidad de esporas de HMA en suelo de palma de aceite.....	50
10.4. Infectividad de esporas de HMA en plantas trampa.....	50
10.5. Determinación de la densidad de esporas en plantas trampa.....	51
10.6. Identificación de géneros de HMA.....	52
10.7. Determinación de la Diversidad de géneros de HMA.....	52
10.8. Géneros de esporas de HMA identificadas.....	53
11. Propiedad intelectual.....	54
12. Beneficiarios directos e indirectos.....	55
13. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.....	56
14. Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND).....	57
15. Otras contribuciones del proyecto al desarrollo.....	57
16. Vinculación.....	57
17. Conclusiones.....	58
18. Recomendaciones.....	59
Referencias.....	60
Apéndice.....	68



## Informe final de Proyecto de Investigación

### Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Condiciones climáticas para el desarrollo de palma de aceite.....	10
<b>Tabla 2.</b> Identificación visual de estratos para muestreo. ....	21
<b>Tabla 3.</b> Equipos, materiales, herramientas y reactivos.....	31
<b>Tabla 4.</b> Objetivos, variable, instrumentos y unidad de medida o cualificación. ....	32
<b>Tabla 5.</b> Resumen del análisis fisicoquímico de suelo. ....	36
<b>Tabla 6.</b> Media de infectividad por estrato en raíz de palma de aceite (%). ....	37
<b>Tabla 7.</b> Media de infectividad por estrato en raíz de planta de <i>Zea mays</i> (%). ....	39
<b>Tabla 8.</b> Análisis de varianza para infectividad de propágulos en raíz de maíz (%). ....	41
<b>Tabla 9.</b> Prueba de medias de Tukey para la infectividad en raíz de maíz (%). ....	41
<b>Tabla 10.</b> Densidad media de esporas en suelo de plantas trampa en maíz.....	42
<b>Tabla 11.</b> Análisis de varianza para la densidad de esporas en maíz. ....	43
<b>Tabla 12.</b> Prueba de medias de Tukey para la densidad de esporas. ....	44
<b>Tabla 13.</b> Beneficiarios directos e indirectos de la investigación.....	55
<b>Tabla 14.</b> Estrategias de divulgación y difusión.....	56



## Informe final de Proyecto de Investigación Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Localización geográfica del área de estudio .....	9
<b>Figura 2.</b> Recomendaciones de fertilización localizada .....	11
<b>Figura 3.</b> Producción de palma de aceite en Guatemala.....	13
<b>Figura 4a.</b> Selección de los puntos de muestreo.....	22
<b>Figura 4b.</b> Obtención de submuestras .....	22
<b>Figura 5a.</b> Pesado de muestra suelo .....	23
<b>Figura 5b.</b> Tamizado de solución del suelo.....	23
<b>Figura 6b.</b> Centrifugación diferencial .....	24
<b>Figura 6a.</b> Preparación de sacarosa .....	24
<b>Figura 7a.</b> Recuperación de esporas.....	24
<b>Figura 7b.</b> Observación de estructuras .....	24
<b>Figura 8a.</b> Preparación del área.....	26
<b>Figura 8b.</b> Plantas trampa con maíz .....	26
<b>Figura 9a.</b> Esterilización de arena .....	27
<b>Figura 9b.</b> Mezclado de arena y suelo.....	27
<b>Figura 10a.</b> Desinfección de macetas.....	27
<b>Figura 10b.</b> Siembra de maíz ( <i>Zea mays</i> L) .....	27
<b>Figura 11a.</b> Plantas trampa a los 90 DDS.....	28
<b>Figura 11b.</b> Desarrollo Radicular a los 90 DDS.....	28
<b>Figura 12a.</b> Esporas de HMA en suelo de palma de aceite .....	29
<b>Figura 12b.</b> Infectividad en raíz de maíz.....	29
<b>Figura 13a.</b> Capacitación a comunitarios .....	30
<b>Figura 13b.</b> Capacitación empresarios REPSA.....	30
<b>Figura 14.</b> Infectividad de propágulos en raíces de palma de aceite .....	38
<b>Figura 15.</b> Densidad de esporas de HMA en suelo de palma de aceite.....	38
<b>Figura 16.</b> Normalidad de infectividad de HMA en cultivo trampa de maíz .....	40
<b>Figura 17.</b> Homogeneidad para la infectividad de HMA en maíz.....	40
<b>Figura 18.</b> Normalidad para la densidad de HMA en cultivo trampa de maíz .....	42
<b>Figura 19.</b> Homogeneidad para la densidad de esporas de HMA en maíz.....	43



---

### **Informe final de Proyecto de Investigación**

<b>Figura 20.</b> Diagrama de triangulación de datos.....	44
<b>Figura 21.</b> Diagrama de identificación y validación de géneros de HMA .....	46
<b>Figura 22.</b> Número de esporas por gramo de suelo por estrato .....	47
<b>Figura 23.</b> Índice de diversidad de Simpson .....	47
<b>Figura 24.</b> Esporas de hongos micorrízicos arbusculares nativas identificadas .....	48



## Informe final de Proyecto de Investigación

### Resumen

En Guatemala el cultivo de *Elaeis guineensis* es una actividad económica de importancia. Sin embargo, para incrementar los rendimientos se requieren altas dosis de fertilizantes, que afectan el medioambiente y la biodiversidad del suelo. La aplicación biotecnológica de simbiontes fúngicos, es una opción que beneficia la salud de las plantas, mejora la fertilidad del suelos y vida de los agroecosistemas. Esta investigación permite caracterizar los hongos micorrízicos arbusculares nativos, mediante el aislamiento e identificación de especies presentes en suelos de *Elaeis guineensis*, para la producción sostenible en cultivos trampa bajo condiciones controladas, mediante un enfoque cuantitativo, utilizando el método hipotético-deductivo, para concluir, a través de análisis edáficos, aislamiento e identificación de HMA y conocer la diversidad, riqueza y potencialidad para nutrir de manera sustentable la producción agrícola. La metodología aplicada incluye muestreo de suelo, análisis fisicoquímicos y evaluación morfológica, así como cuantificación de HMA. Los datos fueron analizados mediante un diseño completamente al azar, complementado con el índice de Simpson para conocer la diversidad fúngica, con ello, se generó nuevo conocimiento sobre los HMA nativos y su rol en la fertilidad, que permitió transferir tecnología a comunitarios, empresarios, estudiantes e investigadores, mediante la divulgación de los resultados obtenidos por medios audiovisuales, entrevistas, talleres, congresos y redes académicas, contribuyendo a estrategias ecológicas en la agricultura palmera. La investigación se realizó con la participación de auxiliares de investigación formados por estudiantes del Centro Universitario de Petén y la colaboración de investigadores mexicanos quienes apoyaron en la extracción y validación de los géneros.

### Palabras clave

1. Palma aceitera	2. Hongos micorrízicos arbusculares	3. Nutrición vegetal	4. Agricultura ecológica	5. Desarrollo sostenible
-------------------	-------------------------------------	----------------------	--------------------------	--------------------------



## Informe final de Proyecto de Investigación

### Abstract

In Guatemala, the cultivation of *Elaeis guineensis* is an important economic activity. However, increasing yields requires high doses of fertilizers, which negatively impact the environment and soil biodiversity. The biotechnological application of fungal symbionts is an option that benefits plant health, improves soil fertility, and enhances the life of agroecosystems. This research characterizes native arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) by isolating and identifying species present in *Elaeis guineensis* soils. The aim is to promote sustainable production in trap crops under controlled conditions using a quantitative approach and the hypothetico-deductive method. Through soil analysis, isolation, and identification of AMF, the research concludes that the diversity, richness, and potential of these fungi to sustainably nourish agricultural production are significant. The methodology includes soil sampling, physicochemical analysis, morphological evaluation, and AMF quantification. The data were analyzed using a completely randomized design, complemented by the Simpson index to determine fungal diversity. This generated new knowledge about native arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and their role in fertility, enabling technology transfer to community members, entrepreneurs, students, and researchers. The results were disseminated through audiovisual media, interviews, workshops, conferences, and academic networks, contributing to ecological strategies in oil palm cultivation. The research was conducted with the participation of research assistants trained by students from the University Center of Petén and the collaboration of Mexican researchers who supported the extraction and validation of the genera.

### Keywords

1. Oil palm	2. Arbuscular mycorrhizal fungi	3. Plant nutrition	4. Organic farming	5. Sustainable development
-------------	---------------------------------	--------------------	--------------------	----------------------------

### 1. Introducción

El cultivo de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) requiere altas dosis de fertilizantes químicos, los cuales a largo plazo repercuten en el medio ambiente y la degradación de los suelos.

Según datos de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO, 2024), la demanda mundial de nitrógeno seguirá variando considerablemente entre los continentes. En la agricultura intensiva se utilizan grandes cantidades de fertilizantes y otros agroquímicos para aumentar el rendimiento y satisfacer la creciente demanda de alimentos, pero su uso puede afectar negativamente la calidad y la productividad (Frioni, 2005).

Por tanto, el uso de microorganismos benéficos constituye una alternativa que puede sustituir o reducir el uso de la fertilización química. Además de las ya conocidas bacterias fijadoras de nitrógeno (A), se han aislado cepas de bacterias (*Pseudomonas fluorescens*) y hongos capaces de solubilizar fósforo (*Paecilomyces lilacinus*), movilizar potasio (*Trichoderma harzianum*) y azufre (*Bacillus* sp). De tal forma que sí se incorpora la relación



## **Informe final de Proyecto de Investigación**

planta-microorganismo puede disminuir la degradación del suelo y mejorar la recuperación de energía para los sistemas de producción (Ramos-Alegría y Velázquez-Gurrola, 2015)

Según Schalamuk et al. (2013) existe una necesidad potencial de continuar con investigaciones aplicadas ‘In situ’ para comprender como las prácticas agrícolas influyen en la biodiversidad y abundancia de hongos formadores de micorrizas en diferentes entornos. Dado que las interacciones entre los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y las condiciones edáficas pueden variar significativamente según el contexto agroclimático, se vuelve crucial estudiar estas comunidades en lugares específicos donde el cultivo de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) es predominante. Por ello, el objetivo de esta investigación es caracterizar los hongos micorrízicos arbusculares en suelos cultivados con palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) bajo las condiciones agroclimáticas del caserío Santa Rosa, Sayaxché, Petén, Guatemala.

El diseño metodológico considera un análisis de suelos, aislamiento e identificación de géneros micorrízicos arbusculares, pruebas de inoculación y análisis estadístico, el cual permitió identificar las propiedades fisicoquímicas asociadas a los HMA nativos pertenecientes al phylum Glomeromycota, que son cruciales para la protección del medio ambiente, la biotecnología o la agricultura sostenible.

En la presente investigación, se obtuvieron resultados favorables, pudiendo mencionar principalmente que las raíces de palma de aceite presentaron categorías de infectividad de estructuras de HMA media (34.8% a 48.0%) en campo directo, mientras que al momento de incrementarlas las estructuras en cultivo de planta trampa con maíz (*Zea mays* L), se mostró un incremento en los estratos III, IV y V a categoría alta (52.0%, 61.2% y 50.4% respectivamente) según la escala de Nicholson and Schenck ,1979; citado por Restrepo et al. (2019).

Por otro lado, la densidad se presentó entre los rangos de 0.40 a 1.40 esporas/g de suelo en palma de aceite, mostrando un notable incremento al realizarse la propagación poliesporica en plantas trampa de maíz (1.6 a 3.4 esporas/g de suelo). De estas esporas, se identificaron y validaron los géneros *Glomus* sp., *Acaulospora* sp. y *Gigaspora* sp., mostrando un índice de riqueza de Simpson igual a 0.37 lo cual refleja mayor diversidad de hongos micorrízicos, pudiendo influir en la salud y funcionalidad del ecosistema del suelo y con mejor capacidad de adaptación, resistencia a sequías y otros fenómenos abióticos.

### **2. Contexto de la investigación**

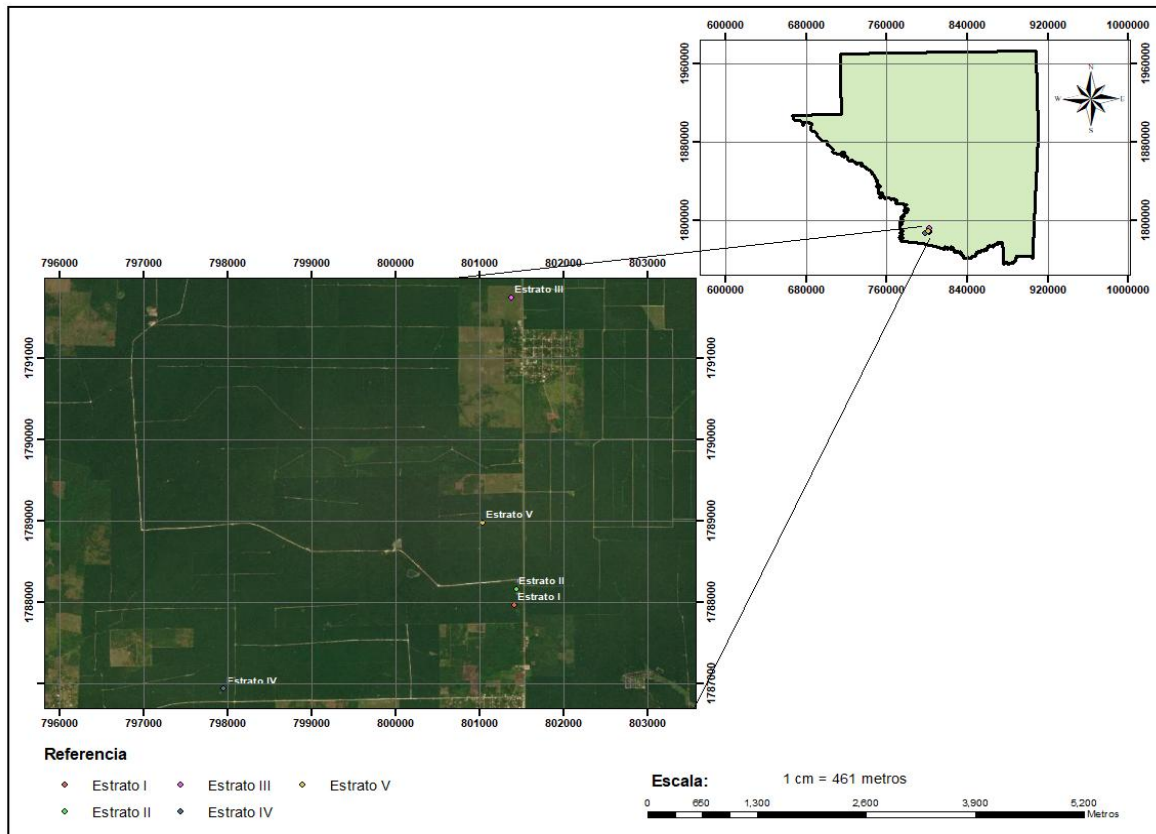
El estudio se realizó en la comunidad de Santa Rosa, Sayaxché, Petén al Norte de Guatemala. Esta zona del país se caracteriza por su clima muy húmedo subtropical cálido y biodiversidad natural asociada a los bosques, debido a sus condiciones y características, el uso más apropiado del suelo es forestal, y no agrícolas, por ello, se desarrollan diversas actividades de manejo silvopastoriles, y algunas partes agroforestales (Secretaría General de

## Informe final de Proyecto de Investigación

Planificación de la Presidencia [SEGEPLAN], 2013). En la Figura 1 se logra apreciar la localización geográfica del área de estudio dentro del departamento de Petén.

**Figura 1**

Localización geográfica del área de estudio



La agricultura de subsistencia y la recolección de productos forestales fueron las principales fuentes de ingresos en el pasado por los comunitarios. En las últimas décadas, se ha dado un fuerte impulso al monocultivo de palma de aceite para la industrialización y exportación. Actualmente, esta industria representa el 24.26% del Producto Interno Bruto del país y se ha convertido en una de las principales actividades económicas del departamento de Petén (GREPALMA, 2023).

No obstante, el deterioro de la fertilidad edáfica representa un desafío fundamental asociado a los sistemas agrícolas, a menudo subestimado tanto por los empresarios del sector como por la sociedad en su conjunto. Los procesos de degradación del suelo están generando una reducción de la capacidad productiva en diversas regiones del mundo. Se estima que más del 20% de las tierras agrícolas se encuentran afectadas, mientras que un 30% de los bosques y un 10% de los pastizales han experimentado una pérdida significativa de su aptitud debido



### Informe final de Proyecto de Investigación

a la erosión y el empobrecimiento del suelo (FAO, 2008). En el contexto de Guatemala, se ha documentado que el departamento de Petén ocupa el segundo lugar en términos de erosión, con una estimación de 48.58 millones de toneladas de suelo erosionado anualmente (MAGA, 2024).

En este contexto, la investigación desarrolla una alternativa basada en la simbiosis microbiana que permitan una producción sostenible de palma aceitera en armonía con los ecosistemas locales. Mediante el aislamiento e identificación de hongos micorrízicos, se genera información valiosa sobre la biodiversidad edáfica y su potencial para fortalecer la productividad y resiliencia de este monocultivo.

Esta investigación beneficia a las comunidades locales, productores, empresarios y académicos al ofrecer conocimientos sobre métodos de cultivo rentables y respetuosos con el medio ambiente. Estos métodos pueden aplicarse a diversos cultivos en la región, contribuyendo a la seguridad alimentaria y al manejo sostenible de los recursos naturales. A nivel regional, este estudio fomenta un desarrollo de la agricultura de palma aceitera social y ecológicamente responsable a largo plazo.

### 3. Revisión de literatura

#### 3.1. Generalidades sobre el cultivo de palma de aceite (*Eleais guineensis* Jacq.)

La palma aceitera es un tipo de palma que se caracteriza por producir grandes cantidades de aceite de palma, el cual tiene diversos usos alimentarios. Esto le ha permitido posicionarse significativamente en el mercado y generar beneficios socioeconómicos en las regiones donde se cultiva (Magaña y Vidal, 2022). En la Tabla 1 se muestra las condiciones adecuadas para el establecimiento y desarrollo del cultivo.

**Tabla 1**

Condiciones climáticas para el desarrollo de palma de aceite

Parámetro	Valor ideal
Precipitación anual	2000-2500 mm
Déficit de agua anual	Menos de 200 mm
Brillo solar	Más de 1500 h
Temperatura media	22-31°C
Humedad relativa	75-85%

Nota. Paramanathan, 2003.

Según Rivera et al. (2014), la clasificación de la palma de aceite en variedades se basa principalmente en la forma, color y composición del fruto, así como en la forma de la hoja. Entre las partes que componen este fruto son: estigma, exocarpo, mesocarpo o pulpa, endocarpo o cuesco, endospermo o almendra y embrión.

## Informe final de Proyecto de Investigación

### 3.2. La palma aceitera: Producción y consumo

Según la FAO (2020), la superficie cultivada con palma aceitera en Latinoamérica creció un 150% entre 2001 y 2019, pasando de 443,000 ha en 2001 a 1,105,000 ha en 2019. Los países con mayor expansión del cultivo en la región. fueron: Colombia (Incremento de 75,000 ha en 2001 a 458,000 ha en 2019), Ecuador (Incremento de 16,000 ha en 2001 a 183,000 ha en 2019) y Guatemala (incremento de 29,000 ha en 2001 a 138,000 ha en 2019).

En Centroamérica las extensiones de palma aceitera registradas oficialmente superan las 370.000 hectáreas, y esta cifra está creciendo debido a la agresiva expansión por la demanda mundial de aceite de palma. El aceite de palma representa el 51% del consumo total de aceite vegetal en todo el mundo. Según el sitio web del Movimiento Mundial por los Bosques Tropicales (WRM), México, Estados Unidos de América y Europa son los principales países a los que exporta Centroamérica.

### 3.3. Principios generales de la fertilización en palma de aceite

Algunos de los aspectos edáficos que inciden directamente en el rendimiento y aprovechamiento de los fertilizantes son las propiedades físicas del suelo, especialmente aquellas relacionadas con su dureza, permeabilidad, aireación y profundidad funcional. A su vez, dichas condiciones del suelo limitan que los fertilizantes modifiquen de manera eficiente el volumen de suelo aprovechado por el sistema radicular (Munévar, 2001). Las palmeras en etapa adulta presentan una biomasa radicular absorbente que se distribuye incrementándose progresivamente en círculos alrededor del estipe, alcanzando su máxima extensión a radios de 3.50 a 4.50 metros. La mayor concentración de raíces se presenta en los primeros 15 a 30 centímetros del perfil edáfico, las cuales manifiestan un crecimiento positivo en dirección a zonas del suelo con mayores niveles de disponibilidad hídrica y nutricional (Cristancho et al., 2007). La Figura 2 representa el proceso de fertilización edáfica para palmas productivas.

**Figura 2**

Recomendaciones de fertilización localizada

Fertilizantes	Edad de la palma (Años después de plantado)			
	0 - 3	4 - 6	7 - 10	> 10
<b>N (Ureas, AS, CAN)</b>	Circulo desmalezado	Circulo desmalezado	Circulo desmalezado	Fuera del circulo
<b>P (Roca fosfórica)</b>	Circulo desmalezado	Alrededor del circulo	Alrededor del circulo	Fuera del circulo
<b>K (KCL)</b>	Circulo desmalezado	Circulo desmalezado	Alrededor del circulo	Fuera del circulo
<b>Mg (Sulfato de magnesio)</b>	Circulo desmalezado	Circulo desmalezado	Alrededor del circulo	Alrededor del circulo
<b>Mg (Dolomita)</b>	----	Alrededor del circulo	Fuera del circulo	Fuera del circulo
<b>B (Borato)</b>	Circulo desmalezado	Circulo desmalezado	Circulo desmalezado	Circulo desmalezado



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

Nota. Diagrama elaborado de información de la empresa Yara, 2020; donde se presenta un plan de fertilización formado los principales fertilizantes para una adecuada nutrición vegetal, enfocados en cuatro etapas fenológicas del cultivo de palma de aceite.

#### **3.4. Producción y consumo de aceite de palma en Guatemala**

De acuerdo con un estudio reciente realizado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala (MAGA), la superficie territorial total del país es de 10,888,900 ha, del cual, el 45.51% corresponde a territorio agrícola que equivale a 4,955,878 ha (MAGA, 2020).

Del mismo modo, según datos de la Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgos (DIGEGR, 2020), el cultivo de palma aceitera, ocupó una extensión de 183,748 ha, equivalente al 1.69% del territorio nacional, otro cultivo con amplia extensión territorial, es la caña de azúcar que ocupa 323,689 ha (2.97%), luego el café con 539,712 ha (4.96%) y los granos básicos como maíz (*Zea mays* L) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L) que abarcaron 1,160,351 hectáreas, representando el 10.66% del área total del país.

Guatemala es el país que más aceite de palma produce por hectárea en el mundo, con 6.23 Ton/ha/año y 26 Ton/racimos de fruta fresca/ha/año. Esto significa que las actividades de este sector se enfocan en producir más por hectárea, en lugar de aumentar el área cultivada (GREPALMA, 2020).

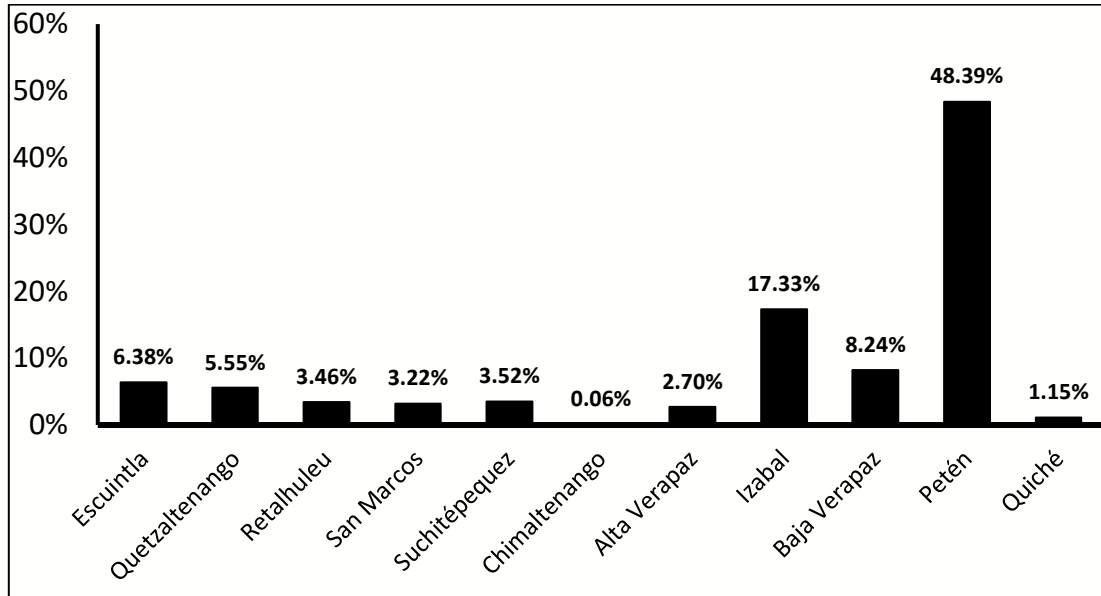
Por otro lado, el número de cultivos registrados por la Asociación de Cultivadores de Palma de Guatemala (GREPALMA) fue de 171,451.81 ha de plantaciones de palma aceitera al cierre del año de 2019. Ese mismo año, con base en registros históricos, información proporcionada por productores y agricultores de aceite de palma, y utilizando imágenes de radar y satélites ópticos, la organización Satelligence comenzó a monitorear 37,770 km<sup>2</sup> de Guatemala.

Los departamentos con mayor expansión de palma de aceite, que se han registrado son Petén, Izabal y Baja Verapaz, según estudios de GREPALMA (2021). Estas regiones concentran la mayor producción nacional debido a ventajas climáticas y disponibilidad de tierras. El caso del departamento de Petén es especialmente relevante. En las últimas dos décadas la superficie sembrada aumentó exponencialmente, de acuerdo con Roda et al. (2021). En la Figura 3 se observa la distribución porcentual de producción de palma de aceite por cada departamento de Guatemala.

## Informe final de Proyecto de Investigación

**Figura 3**

Producción de palma de aceite en Guatemala



Nota. Los datos presentados en la gráfica se obtuvieron del documento en línea de la Gremial de Palmicultores de Guatemala. Estadísticas socioeconómicas al año 2021. Agroindustria sostenible de Aceite de Palma en Guatemala.

Esta expansión obedece al potencial agroexportador que ofrece el cultivo. Sin embargo, también genera preocupaciones respecto al impacto social y ambiental que es necesario monitorear (Roda et al., 2021).

### 3.5. Importancia de las micorrizas arbusculares en agricultura

Los hongos establecieron asociaciones de beneficio mutuo con las raíces vegetales, mediante intercambio nutricional que resultan ventajosos para ambos simbioses (Carrillo-Saucedo et al., 2022), representan un papel importante en los ecosistemas al formar esta relación mutualista (Canchani, et al., 2018). Los hongos micorrizcos arbusculares son las especies más comunes y están asociados con la mayoría de las plantas de interés agrícola (Cuenca et al., 2007). En la simbiosis, el hongo forma estructuras llamadas arbusculos en las raíces, donde se da el intercambio de nutrientes como carbono y fósforo entre ambos organismos (Guzmán-González y Farías-Larios, 2005). Esto constituye una práctica sostenible y agroecológica, pues permite fertilizar de forma orgánica las plantaciones a través de la absorción y transferencia de elementos esenciales por parte del hongo a la planta huésped. En conjunto, la micorriza mejora la nutrición y sanidad de las plantas, y contribuye a un manejo sostenible del suelo y el ambiente (Sánchez et al., 2009); lo cual representa un



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

criterio diferenciador para la productividad de cultivos que dependen estrictamente de la nutrición (Posada, 2001). Aprovechar las micorrizas en la agricultura contribuye a reforzar la seguridad alimentaria, y generar mayor resiliencia frente al cambio climático, mediante el incremento de los rendimientos agrícolas de manera natural. Además, facilita la asimilación de nutrientes en suelos degradados o de baja fertilidad, lo que posibilita ampliar las zonas dedicadas a cultivos. Esto es un beneficio debido a la creciente demanda de alimentos.

#### **3.6. Beneficios de las micorrízicos en el cultivo de palma de aceite**

La asociación micorrízica es fundamental para el desarrollo de la palma aceitera, ofreciendo potencial para un mejor crecimiento y una menor necesidad de fertilizantes sintéticos (Shahidan et al., 2023).

Mohamed et al. (2018) encontraron mayor colonización y diversidad micorrízica en palma orgánica, lo que resalta la importancia de estas asociaciones para la sostenibilidad del cultivo. De igual forma, Paredes (2019) determinó que la inoculación micorrízica promueve el crecimiento y desarrollo de plántulas, lo cual concuerda con hallazgos previos de Motta y Munévar (2005).

Por otro lado, Garza et al. (2016) establecieron que los hongos endomicorrízicos son una alternativa viable en vivero, permitiendo disminuir insumos y generar plantas robustas. Esto cobra relevancia ante el objetivo de minimizar el impacto ambiental de la agroindustria palmera.

En otro estudio reciente, realizado por Rini et al. (2023) en Indonesia, sobre las poblaciones de hongos micorrízicos arbusculares en la rizosfera de palma aceitera plantada en cuatro tipos de suelos, se observó que donde se utilizan mayores cantidades de fertilizantes químicos, y poseen alto contenido de arcilla (textura franco arcillosa) y fósforo disponible, así como, un CIC más elevado, presentaron mayores poblaciones de HMA que en suelos de suelos arenosos y con poca disponibilidad de fósforo (2.23 – 1.83 esporas/g de suelo y 1.07 - 0.54 esporas/g de suelo respectivamente).

Los resultados coinciden en resaltar los beneficios de las micorrizas para la palma de aceite, mejorando su producción y calidad. No obstante, se requieren mayores investigaciones para desarrollar inóculos adaptados a diferentes regiones agroecológicas, a fin de impulsar la sostenibilidad de este importante cultivo a nivel mundial de manera rentable.

En resumen, los numerosos estudios realizados reflejan el interés creciente por comprender y aprovechar la simbiosis micorrízica en el cultivo de palma aceitera, aprovechando como fuente natural de fertilización.



## Informe final de Proyecto de Investigación

### 3.7. Colonización de raíces por hongos micorrízicos

La colonización es un proceso clave en la relación simbiótica entre los hongos micorrízicos y las plantas. Inicia con la interacción directa del hongo con las raíces de la planta huésped, donde se forma una estructura especializada llamada apresorio. Esta estructura facilita la penetración de las hifas del hongo en las células corticales de la raíz, dando lugar a la formación de los arbusculos. Estos arbusculos son esenciales para aumentar significativamente el área de contacto entre la planta y el hongo, lo que a su vez permite una buena absorción de nutrientes para el crecimiento y desarrollo de la planta (Rivera et al., 2014).

Este proceso de colonización es crucial para la nutrición de la planta, ya que los arbusculos permiten tener una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes como nitrógeno, potasio, calcio, magnesio, boro, hierro y especialmente fosfato. La formación de estos arbusculos fortalece la asociación beneficiosa entre la planta y el hongo micorrízico, contribuyendo así al crecimiento saludable de la planta en diversas condiciones ambientales.

Cervantes-Gámez et al. (2021) llevaron a cabo un estudio en Sinaloa, México, centrado en la diversidad de hongos micorrízicos arbusculares asociados a plantas voluntarias de maíz (*Zea mays* L) en suelos de transición entre ecosistemas naturales y usos agrícolas. En este estudio, se registró un nivel de colonización entre 0.16 y 0.39 esporas por gramo de suelo, la cual fue considerado bajo, debido a la etapa fenológica de la planta en el momento del muestreo.

Por otro lado, Ritaqwin y Maulana (2021), identificaron hongos micorrízicos arbusculares en el cultivo de palma de aceite establecido en la provincia de Aceh, Indonesia; donde los resultados mostraron que los géneros de hongos micorrízicos dominantes fueron del tipo *Glomus*, mientras que las esporas encontradas en el cultivo de trampas fueron *Glomus*, *Acaulospora* y *Gigaspora*, verificando que la planta hospedante que produjo la mayor cantidad de esporas fue el sorgo, mientras que la mayor colonización de HMA de las tres plantas hospedantes se encontró en las raíces de plantas de maíz (78%), con criterios muy altos.

### 3.8. Metodologías para la evaluación de la colonización micorrizica

Actualmente, se han establecido diversos procedimientos estandarizados y validados para estudiar la presencia de hongos micorrízicos en el suelo y en las raíces de las plantas. Entre estos, los métodos más utilizados en las ciencias aplicadas al suelo son la reacción en cadena de la polimerasa cuantitativa (PCR) y los análisis morfológicos basados en claves taxonómicas estructurales.

La cuantificación con PCR se puede realizar mediante dos métodos: cuantificación relativa y cuantificación absoluta. En la cuantificación relativa, el gen de estudio se normaliza con



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

otro de referencia. Por otro lado, la cuantificación absoluta implica el uso de una curva estándar, para la cual se diluye en serie el ADN de referencia (Ramírez et al., 2023).

Ambos métodos poseen ventajas y desventajas en su aplicación, en el caso de la extracción de ácidos nucleicos (DNA), representa una etapa fundamental en la aplicación de los métodos moleculares por lo que es importante extraer DNA de alta calidad que pueda ser utilizado para subsiguientes estudios. En general, los estudios implican la amplificación de genes o regiones del DNA ribosomal por medio de la reacción en cadena de la Polimerasa. Sin embargo, si durante la rutina de extracción de DNA las trazas de humus del suelo, del cual los HMA son colectados, no son eficientemente removidas, la actividad de la enzima Polimerasa puede ser inhibida y la reacción de amplificación podría no funcionar (Covacevich y Consolo, 2014).

Por otro lado, los estudios taxonómicos y sistemáticos de los HMA se basan principalmente en las características morfológicas de las esporas y esporocarpos (Salmerón-Santiago et al., 2015), sin embargo, su producción y maduración está condicionada por distintos factores ambientales como la temperatura, humedad, pH, estación del año y características del hospedante, que pueden modificar el número de paredes, su espesor, coloración, entre otros aspectos, asimismo, las esporas recolectadas directamente de los ambientes naturales pueden estar degradadas o parasitadas por otros microorganismos alterando así su morfo-anatomía (Covacevich y Consolo, 2014).

los estudios morfológicos emplean protocolos de extracción de estructuras mediante el método de tamizado en húmedo. Este procedimiento comienza con el uso de tamices de malla fina (130  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 53  $\mu\text{m}$ , 45  $\mu\text{m}$ , entre otros) para procesar muestras de suelo o inoculantes sólidos, mediante la preparación de soluciones de sacarosa a concentraciones que pueden variar de 45%, 50% y/o 60%, para poder someter las muestras al proceso de centrifugación, con la finalidad de obtener la separación de las esporas de la sacarosa y el material circundante del suelo (Covacevich y Consolo, 2014).

### **3.9. Estudios sobre simbiosis micorrizica con palma de aceite**

Debido a los fenómenos ambientales, el desarrollo y crecimiento del cultivo de palma de aceite, los suelos son cada vez más afectados en cuanto a la reducción de su capacidad nutricional, por lo cual, existe una búsqueda constante de nuevas alternativas que permita mejorar su capacidad nutricional, siendo una alternativa el uso simbiótico de los hongos micorrizicos en el cultivo.

En un estudio realizado en Ecuador sobre la importancia de los microorganismos cultivados con palma de aceite, se demostró que el cultivo presentó afinidad simbiótica con hongos micorrizicos del género *Glomus* y *Acaulospora*, permitiendo un incremento en el área foliar y el contenido de fosforo, aumentando la tolerancia de las plantas a la sequía, salinidad y metales pesados (Aviles, 2022).



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

Por otro lado, Paredes (2019), en el estudio realizado sobre el comportamiento agronómico de *Elaeis guineensis* Jacq y la simbiosis con organismos eficientes del suelo, encontró diferencias significativas con la implementación en previvero de *Azotobacter* y *Azospirillum* micorrízicos, presentando un 16.5% de superioridad de altura de planta, 45.5% más en el desarrollo radicular y un 20.4% de mayor diámetro de tallo en comparación con el testigo absoluto.

López y Montalvo (2019), realizaron un estudio sobre la caracterización de micorrizas arbusculares arbustivas en diferentes materiales genéticos de palma aceitera, con la finalidad de evaluar la influencia del material genético de la planta, sobre el comportamiento micorrízico, teniendo como resultado que no existieron diferencias significativas entre las cinco tipos de palma aceite (Taisha x Calabar, Taisha x Angola, Coarí x La Mé, *Elaeis guineensis* INIAP y *Elaeis guineensis* ilegítima), por otro lado, las poblaciones de micorrizas mostraron relación con algunas propiedades del suelo como: el potasio ( $r=0,738$ ,  $P < 0,001$ ), conductividad eléctrica ( $r = 0,7018$ ,  $P < 0,001$ ) y porcentaje de limo ( $r = 0,653$ ,  $P < 0,001$ ) y negativa con porcentaje de arena ( $r = - 0,664$ ,  $P < 0,001$ ) y pH ( $r = - 0,682$ ,  $P < 0,001$ ), y sin correlación con fósforo, nitrógeno, porcentaje de arcilla y materia orgánica.

Además, es fundamental destacar que las micorrizas aportan beneficios significativos a través de su interacción, ya sea natural o inducida, con otros microorganismos del suelo. Este aspecto se evidencia en el estudio realizado en Indonesia por Sembiring et al. (2018), que evaluó la inoculación de micorrizas con *Talaromyces pinophilus* para mejorar el crecimiento y la absorción de fósforo en plántulas de palma de aceite. Los resultados revelaron que esta asociación incrementó el crecimiento de las plantas hasta un 55.5% y la absorción de fósforo alcanzó niveles de 69.3%.

#### **4. Planteamiento del problema**

América Latina depende cada vez más de la importación de fertilizantes basados principalmente en nitrógeno, fósforo y potasio. El uso excesivo de estos agroquímicos puede comprometer la calidad y productividad de los suelos, contaminar las fuentes de agua superficial y subterránea, así como generar daños significativos en los ecosistemas del suelo (Frioni, 2005). Esta problemática se agudiza en el contexto de la producción de palma de aceite, un cultivo en expansión en Guatemala, donde los departamentos de Petén e Izabal lideran la producción nacional con un 66% del total (GREPALMA, 2021).

Por otro lado, la producción de palma de aceite genera un impacto social y económico relevante para la región, considerando que el departamento de Petén representa el principal productor, con rendimientos promedios de 25 Tm/Ha y donde el sector emplea directamente 70,000 personas aproximadamente (GREPALMA, 2021), lo que subraya la importancia económica de este cultivo y la necesidad de abordar sus desafíos ambientales de manera integral.



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

La causa principal de esta dependencia radica en la búsqueda de maximizar los rendimientos de producción para satisfacer la creciente demanda de aceite a nivel global. Sin embargo, la intensificación de la agricultura, impulsada por la necesidad de obtener altos volúmenes de producción, ha desestabilizado los ciclos de nutrientes esenciales en los suelos. Esto, a su vez, ha llevado a un uso cada vez mayor de fertilizantes químicos, que, si bien pueden ofrecer soluciones a corto plazo, generan efectos perjudiciales a largo plazo.

En este contexto, la incorporación de agentes microbianos en programas de fertilización se propone como una alternativa viable para la producción agrícola intensiva y la mitigación de los efectos adversos sobre los ecosistemas y la biodiversidad del suelo. Estudios previos han demostrado que los hongos micorrízicos arbusculares, especialmente los géneros *Glomus* y *Acaulospora*, establecen asociaciones simbióticas con la palma de aceite que mejoran significativamente la absorción de nutrientes por las raíces. Esta mejora permite reducir la necesidad de aplicaciones de fertilizantes químicos (Corley y Tinker, 2003; Galindo y Romero, 2010).

Además, se ha comprobado que la inoculación de HMA aumenta el rendimiento de las plantaciones en suelos y disminuye los costos de fertilización fosforada hasta en un 5.7% (Galindo y Romero, 2010). Así, la implementación de HMA no solo contribuye a la sostenibilidad agrícola, sino que también representa una estrategia eficaz para mitigar la dependencia de fertilizantes químicos en la región. Sin embargo, en Guatemala se tiene poca información sobre el efecto y contribución de las poblaciones nativas de HMA a la agricultura sostenible en diferentes agroecosistemas.

Considerando lo anterior, existe la necesidad de generar conocimientos sobre la dinámica de estas poblaciones de HMA nativos en fincas con suelos cultivados con este cultivo en la comunidad de Santa Rosa del municipio de Sayaxché, Petén, Guatemala, que se encuentren en etapa reproductiva durante los meses de marzo a diciembre del año 2025, esto permitirá explorar opciones de fertilización sustentables.

Bajo este contexto, surgen las siguientes preguntas de investigación:

¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas de los suelos con cultivo de palma de aceite en el caserío Santa Rosa, Sayaxché, departamento de Petén en Guatemala?

¿Cuál es la tasa de infectividad y densidad de esporas fúngicas aisladas sobre la rizosfera de la palma de aceite en el departamento de Petén, Guatemala?

¿Cuáles son los géneros hongos micorrízicos arbusculares nativos que se encuentran presentes en la rizosfera de la palma de aceite de la comunidad de Santa Rosa, Sayaxché, Guatemala?



## Informe final de Proyecto de Investigación

### 5. Objetivos

Objetivo general:

Caracterizar los hongos micorrízicos arbusculares nativos, mediante el aislamiento e identificación de especies presentes en suelos de *Elaeis guineensis* Jacq., para la producción sostenible en cultivos trampa bajo condiciones controladas en el caserío Santa Rosa la del municipio de Sayaxché, Petén, Guatemala.

Objetivos específicos:

- Analizar el contenido de macro y micronutrientes, materia orgánica, CIC, pH, bases intercambiables y textura en suelos cultivados con palma aceitera en la comunidad de Santa Rosa del municipio de Sayaxché, Petén, Guatemala.
- Aislar hongos micorrízicos arbusculares nativos presentes en la rizosfera de la palma de aceite de la comunidad de Santa Rosa del municipio de Sayaxché en Guatemala para conocer su diversidad ecológica en el suelo.
- Identificar los géneros de hongos micorrízicos arbusculares nativos que se encuentran presentes en la rizosfera de la palma de aceite de la comunidad de Santa Rosa, Sayaxché, Petén.
- Cuantificar abundancia y diversidad de propágulos de hongos micorrízicos arbusculares y el porcentaje de colonización en la rizosfera de la palma aceitera.
- Transferir conocimiento y técnicas a empresarios y comunitarios en la producción de hongos micorrízicos arbusculares aislados de palma de aceite en cultivos trampa bajo condiciones controladas del caserío Santa Rosa, Sayaxché, Petén.

### 6. Hipótesis (si aplica)

En los suelos cultivados con *Elaeis guineensis* Jacq. en el caserío Santa Rosa, Sayaxché, Petén, Guatemala, se encuentra una diversidad de hongos micorrízicos arbusculares, lo que se reflejará en la presencia de múltiples cepas nativas en los cultivos trampa bajo condiciones controladas.

### 7. Método

#### 7.1. Tipo de investigación.

El tipo de investigación es aplicada debido a que permite generar nuevos conocimientos, dirigida fundamentalmente hacia un objetivo práctico; los resultados serán aplicables en productos, operaciones, métodos o sistemas (OCDE, 2015).



## **Informe final de Proyecto de Investigación**

### **7.2. Enfoque y alcance de la investigación.**

La investigación adopta un enfoque cuantitativo con un alcance de tipo exploratorio, que permite describir una serie de etapas que posibilitan precisar los atributos del tema en análisis, con el fin de obtener datos para medir de forma agregada los aspectos de mayor relevancia, logrando una caracterización de manera objetiva para comprender la interrelación de los diferentes componentes involucrados (Hernández et al., 2014).

El estudio exploratorio permitió investigar un tema poco explorado en el departamento de Petén en Guatemala, del cual se tiene un conocimiento limitado, dada la necesidad de comprender el fenómeno estudiado, permitiendo identificar patrones, tendencias y posibles relaciones que pueden servir de base para investigaciones más exhaustivas en el futuro.

### **7.3. Diseño de la investigación.**

El diseño de la investigación es de tipo experimental, en donde, primeramente se realizó un muestreo de suelos para obtener los análisis realizados en el laboratorio de Soluciones Analíticas, S.A. en la ciudad capital, de igual forma los procesos de preparación de muestras fueron realizados en el laboratorio del Centro Universitario de Petén (CUDEP) de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con la colaboración de expertos del laboratorio de suelos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División de Los Ríos, México; mediante el cuerpo académico “Desarrollo Sustentable”, quienes forma parte del equipo de investigadores que colaboran en el proyecto.

Con los análisis de laboratorio se realizó una nueva fase de campo, mediante la inoculación de las esporas hongos micorrízicos arbusculares nativos, a plantas trampa establecidas en macetas, mediante un diseño experimental completamente al azar con 10 repeticiones y 5 tratamientos (estratos de producción de palma de aceite). Como establece Ortega (2021), este diseño es recomendado en experimentos de laboratorio, invernadero, almacigo y establos, en los que el material experimental (macetas, bandejas, almacigos, animales, otros) es muy homogéneo por prepararse en forma provisional, y permite que el experimento se conduce en condiciones ambientales controladas y uniformes para todas las unidades experimentales.

Por otro lado, para las variables que presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, se realizaron las respectivas pruebas de medias mediante el método de Diferencias Honestamente Significativas (DHS) de Tukey, con un nivel de confianza del 95% (Ortega, 2021).

### **7.4. Población, muestra y muestreo.**

La población objeto de estudio está conformada por las áreas dedicadas a la producción de palma aceitera del municipio de Sayaxché en el departamento de Petén, debido a presenta la mayor superficie de producción de palma de aceite con un 74.02% (66,039 hectáreas) de todo el departamento.

### Informe final de Proyecto de Investigación

Por otro lado, la muestra utilizada fue de 210.03 ha y de tipo incidental, esto debido al acceso a las fincas con producción de palma de aceite en la jurisdicción de la comunidad de Santa Rosa del municipio de Sayaxché, conformada por cinco estratos con características específicas. Este tipo de muestreo tiene como limitante no ser probabilístico y, por lo tanto, no se tiene una selección aleatoria de las unidades de muestreo, pero este factor no afecta la investigación, debido a ser áreas específicas y de interés con producción de palma de aceite. En la Tabla 2 se observa la descripción de los estratos identificados en campo, resaltando características que fueron observadas de manera visual para la selección de los puntos de muestreo.

**Tabla 2**

Identificación visual de estratos para muestreo.

Descripción	Estratos				
	I	II	III	IV	V
Finca	El Mirador I	El Mirador I	El Mirador II	Canaleña	España
Lote	15	1	1	3	4
Extensión (Ha)	40.63	33.80	45.11	71.24	19.25
Uso anterior	Pastoreo	Pastoreo	Pastoreo	Pastoreo	Pastoreo
Edad de planta (años)	18	19	17	14	11
Año de siembra	2006	2005	2007	2010	2013
Color del suelo	10YR 5/4	7.5YR 4/2	7.5YR 3/2	10YR 3/4	10YR 3/4
Pendiente	2%	5%	15%	5%	2%
Tipo de manejo	Químico	Químico	Químico	Orgánico	Químico
Fecha	10/04/2025	10/04/2025	11/04/2025	11/04/2025	11/04/2025
Longitud	801415	801443	801385	797952	801039
Latitud	1787966	1788163	1791749	1786933	1788977

Nota. En el apéndice A se puede observar la caracterización visual de los estratos (determinación del color del suelo mediante el uso de la tabla Munssel).

En la Tabla 2 se aprecia en particular que las plantaciones de palma de aceite seleccionadas poseen diferentes edades de desarrollo, las cuales van de plantaciones jóvenes (11 años), hasta edad adulta (19 años). Por otro lado, todas las unidades de muestreo poseen un manejo químico, excepto el estrato IV, el cual ha sido manejado de forma orgánica, sin utilización de fertilizantes sintéticos y con la aplicación de materia orgánica una vez por año.

#### 7.5. Técnicas.

- Muestreo de suelo: Se realizó un muestreo estratificado, con la finalidad de separar en segmentos en clases o grupos (estratos) homogéneos con respecto a las características de

### Informe final de Proyecto de Investigación

interés en el estudio, y luego 20 muestras de forma aleatoria seleccionadas de cada segmento (estrato). Las submuestras seleccionadas de los diversos estratos se combinan en una sola muestra compuesta (Porrás, 2017).

Las muestras compuestas de suelo y raíces de las fincas localizadas en la comunidad de Santa Rosa con presencia del cultivo de palma de aceite en etapa fenológica productiva, se obtuvieron utilizando sondas barrenas de suelo tipo cilindro, mediante un patrón de muestreo de zig-zag, considerando 10 muestras por estrato a una profundidad de 30 centímetros para análisis fisicoquímico, asimismo, otras 10 muestras a una profundidad de 10 centímetros para análisis microbiológico de extracción de las estructuras de hongos micorrízicos arbusculares.

El muestreo se realizó por cada uno de los estratos (cuatro con manejo convencional y uno con manejo orgánico) para un total de 100 muestras recolectadas, con 4 submuestras en cada planta seleccionada mediante la extracción en los cuatro puntos cardinales (Apéndice B), las cuales fueron homogenizadas y colocadas en bolsas de polietileno debidamente rotuladas y acomodadas en hieleras de duroport, para su traslado al laboratorio de suelos. En la Figura 4 se observa el proceso de obtención de las submuestras en el área de estudio.

**Figura 4a**

Selección de los puntos de muestreo



**Figura 4b**

Obtención de submuestras



Análisis fisicoquímico de suelo: Este tipo de análisis consiste en una herramienta fundamental en la gestión agrícola, permite conocer los niveles de disponibilidad de nutrientes para las plantas (Castellanos, 2010). A través de este proceso, se analizaron las características físicas y la composición química del suelo para determinar su capacidad de soporte de cultivos, su papel en la dinámica de los ecosistemas y su susceptibilidad a la contaminación.

### Informe final de Proyecto de Investigación

Las 50 muestras de suelo extraídas (10 muestras por estrato) a una profundidad de 30 centímetros, fueron trasladadas al laboratorio del Centro Universitario de Petén, se dejaron 24 horas en secado al aire bajo sombra, posteriormente se pasaron a través de un tamiz de 2 mm, para separar la fracción de suelo y fueron identificadas en bolsas de nylon para ser enviadas al laboratorio certificado, que se encuentra en la ciudad capital de Guatemala (Soluciones Analítica, S.A.).

Los análisis completos realizados por la empresa Soluciones Analíticas, S.A; que incluyó la determinación del contenido de macro y micronutrientes, materia orgánica, CIC, pH, bases intercambiables y textura, fue realizado mediante la metodología de Miller et al., 2005; método EPA 6010D, Revisión 5, Julio 2018; Miller, et al., 2013; Sikora, et al., 2014 y Gavlak et al., 2005.

Procesamiento de las muestras de hongos micorrízicos arbusculares (Apéndice C): Para la extracción de esporas desde el suelo se utilizó la adaptación y estandarización de la técnica de sedimentación húmedo y tamizado propuesta por Gerderman y Nicholson en 1963 citado por Gómez y Hernández (2023) que consiste en tomar 50 g de cada muestra y diluirla en 500 mL de agua. La muestra se deja reposar durante 10 min, para que los sólidos sedimenten. Luego el sobrenadante se pasa a través de tamices de tamaño de poro 90, 63 y 45 micras, este paso permitió separar fracciones de diferente tamaño y retener organismos en los tamices más finos para finalmente recuperar 40 mL de los últimos dos tamices. En las Figuras 5 se observa el proceso de preparación del suelo.

**Figura 5a**

Pesado de muestra suelo



**Figura 5b**

amizado de solución del suelo



Centrifugación diferencial: Del tamiz de 45 micras se tomaron aproximadamente un cm<sup>3</sup> de residuo, el cual se distribuyó en tubos de centrifuga que contenían previamente dos gradientes de sacarosa al 20 y 60% según el procedimiento de Daniels y Skipper (1982) citado por Gómez y Hernández, (2023). La centrifugación se efectuó a 2500 rpm durante 3 min. Debido a la diferencia de densidades, los organismos flotaron mientras que las partículas pesadas se sedimentaron, permitiendo su separación (Hooper et al., 2005). En la

### Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 6 se observa la preparación de las gradientes de sacarosa al 20% y al 60%, asimismo, la preparación de la sacarosa y la centrifugación diferencial para iniciar con la separación de partículas de suelo y estructuras de HMA.

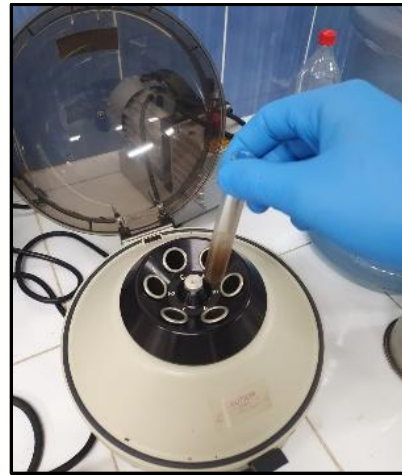
**Figura 6a**

Preparación de sacarosa



**Figura 6b**

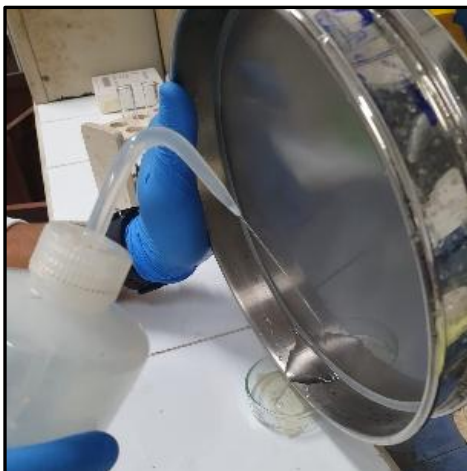
Centrifugación diferencial



Recuperación y observación: El sobrenadante de los tubos fue recuperado mediante un tamiz de 45 micras y enjuagado abundantemente con agua desmineralizada para eliminar restos de sacarosa, ya que esta puede dañar las estructuras celulares. Finalmente, el material retenido se transfirió a cajas de Petri y se examinó bajo un estereoscopio y microscopio para la caracterización e identificación de hongos micorrízicos arbusculares presentes en el suelo. En la Figura 7 se observa el proceso de recuperación del sobrante en el tamiz de 45 micras, conteniendo esporas de hongos micorrízicos arbusculares, para su observación en equipo de estereoscopio y microscopio.

**Figura 7a**

Recuperación de esporas



**Figura 7b**

Observación de estructuras





### **Informe final de Proyecto de Investigación**

**Identificación de HMA:** Para la actividad se observaron alícuotas de 5 mL (hasta completar 40 mL) bajo el microscopio estereoscópico con lente de 10X y 40X, donde se apreciaron esporas de diferentes géneros de hongos HMA. La identificación se realizó utilizando claves taxonómicas provistas por la colección International Culture Collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAM, 2021).

**Validación de esporas de HMA:** La validación de géneros de hongos micorrízicos arbusculares se llevó a cabo mediante un enfoque de triangulación de datos, lo que implica la integración de múltiples fuentes y métodos de análisis para corroborar los resultados obtenidos. Este proceso, inicio con la obtención de las esporas de HMA que fueron tratadas y analizadas en el laboratorio del Centro Universitario de Petén (CUDEP). Durante esta fase, se realizó una identificación de los géneros presentes en las muestras. Este análisis inicial proporcionó una base para la validación al establecer los primeros hallazgos donde se determinó la presencia de cuatro géneros de HMA.

**Envío a Referencias Externas:** La validación de los géneros de HMA se llevó a cabo mediante análisis realizados de manera remota por el laboratorio del Instituto Tecnológico Nacional de México (TecNM) campus Zona Olmeca donde se identificaron cinco géneros, adicionalmente, se enviaron al laboratorio de Agro-expertos en la ciudad de Guatemala logrando determinar la presencia de tres géneros.

Este enfoque se basa en métodos morfológicos, donde el material enviado consistió exclusivamente en micrografías digitales. Los sistemas de clasificación actuales utilizan la inspección visual como base fundamental para la identificación taxonómica, respaldados por estudios recientes que abogan por el desarrollo de metodologías que permitan mejorar la identificación automática de HMA en imágenes adquiridas (Soto et al., 2022). Este proceso permitió la verificación de los géneros identificados inicialmente por laboratorios externos, aumentando la robustez de los resultados, asegurando que las identificaciones fueran consistentes y confiables.

La triangulación de datos, que involucra el análisis de diferentes laboratorios, fortalece la confiabilidad de los resultados al minimizar sesgos y errores potenciales. Se consideran confiables aquellos géneros identificados de manera común en al menos dos de los tres laboratorios, utilizando el índice de Jaccard, que evalúa la cantidad de géneros compartidos en relación con el total de géneros identificados. Además, se calcularon coeficientes de correlación ( $r$ ) para evaluar la concordancia entre las identificaciones de los distintos laboratorios, excluyendo finalmente aquellos géneros que no mostraron coincidencia en las tres fuentes.

**Multiplicación de HMA en cultivos trampa:** La multiplicación de hongos micorrízicos arbusculares en cultivos trampa es una técnica ampliamente utilizada para aumentar la cantidad y calidad de inóculo fúngico en el suelo. Se realizaron los bioensayos en macetas con siembra de maíz (*Zea mays* L.), debido a ser uno de los cultivos trampa más efectivos

### Informe final de Proyecto de Investigación

por su alta capacidad de formar asociaciones micorrízicas y producir abundantes esporas. Durante el cultivo, las raíces del maíz facilitan la proliferación de las hifas y la formación de esporas de HMA. Para multiplicar los consorcios nativos, se establecieron 50 plantas trampa de maíz (*Zea mays* L), de la siguiente forma:

- Preparación del área: Se construyeron bancas, se colocó sarán como cubierta y se realizó limpieza manual para crear un ambiente controlado. En la Figura 8 se observa el proceso de limpieza y preparación del área donde se establecieron las plantas trampas, para la inducción de crecimiento de hongos micorrízicos arbusculares nativos del suelo de palma de aceite mediante la producción poliespórica en macetas mediante un medio del cultivo de maíz.

**Figura 8a**

Preparación del área



**Figura 8b**

Plantas trampa con maíz



Se puede apreciar en la Figura 9, como se distribuyeron las 50 unidades experimentales (macetas) de forma aleatoria conservando las 10 repeticiones por estrato evaluado.

- Preparación del sustrato: El suelo de cada estrato se tamizó y mezcló con arena previamente esterilizada mediante la utilización de una autoclave durante 15 minutos a una temperatura de 120 °C y una presión de 15 PSI (Apéndice D), la mezcla se realizó en una proporción 1:1 (suelo de palma de aceite: arena estéril). En la Figura 9 se observa el proceso de esterilizado de la arena mediante la utilización de la autoclave y el proceso de homogenización manual del suelo obtenido de palma de aceite más la arena esterilizada.

## Informe final de Proyecto de Investigación

**Figura 9a**

Esterilización de arena



**Figura 9b**

Mezclado de arena y suelo



• Siembra: Se sembraron cuatro semillas de maíz (*Zea mays* L) previamente desinfectadas (Apéndice E) por maceta, con la aplicación de 3 mL de cloro por litro de agua expuestas durante 3 minutos. En la Figura 10 se observan las macetas que, a pesar de ser nuevas fueron desinfectadas con la aplicación de 5 mL de cloro por litro de agua durante 15 minutos para colocarlas en el área del ensayo y realizar la siembra de maíz (*Zea mays* L).

**Figura 10a**

Desinfección de macetas



**Figura 10b**

Siembra de maíz (*Zea mays* L)



Las plantas sembradas, se llevaron hasta producir un estrés hídrico en ella, logrando la producción extensiva del sistema radicular, lo cual permitió obtener mayor exposición de biomasa para la producción de estructuras de HMA. El número de esporas de cada aislamiento se contabilizaron a los 90 días mediante la técnica de Gerderman y Nicholson

### Informe final de Proyecto de Investigación

(1963), para posteriormente someter los resultados a un análisis de varianza mediante un diseño experimental completamente al azar. En la Figura 11 se observan las plantas de maíz (*Zea mays* L) desarrolladas a los 90 días después de la siembra (Apéndice F), bajo condiciones de estrés hídrico y ambiental, con un alto desarrollo radicular dentro de las macetas.

**Figura 11a**

Plantas trampa a los 90 DDS



**Figura 11b**

Desarrollo Radicular a los 90 DDS

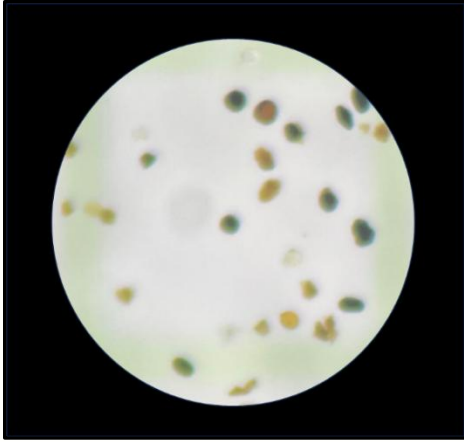


- Conteo de esporas y porcentaje de colonización de HMA en raíces de maíz (*Zea mays* L): Para evaluar el número de esporas de hongos micorrízicos por gramo de suelo húmedo se realizó un análisis morfológico (forma, color y tamaño), mientras que para evaluar el porcentaje de colonización micorrízica se consideraron los segmentos colonizados y los no colonizados (infectividad). Se logró obtener la relación del total de segmentos colonizados con respecto a los totales evaluados, además, se contabilizaron la colonización total por arbuscúlos y/o por vesículas. Para evaluar el nivel de colonización, se clasificó en tres categorías: baja (0-20%), media (20.1-50%) y alta (> 50%) según lo indicado por Nicholson y Schenck (1979), en un estudio mencionado por Restrepo et al. (2019). En la Figura 12 se puede ver la presencia de esporas de HMA en el suelo a nivel de microscopio compuesto 40X, así como la infectividad de estructuras en el sistema radicular de las plantas, mediante el estereomicroscopio.

## Informe final de Proyecto de Investigación

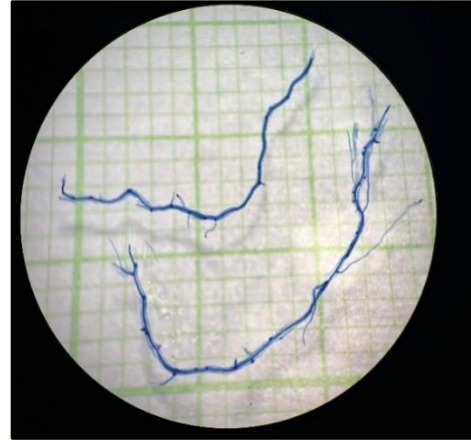
**Figura 12a**

Esporas de HMA en suelo de palma de aceite



**Figura 12b**

Infectividad en raíz de maíz



- Plan de capacitación: Se implementó un plan de transferencia de tecnología basado en la falta de conocimiento sobre los micro-organismos benéficos existentes en el suelo del cultivo de palma de aceite que pueden ser utilizados para la elaboración de biofertilizantes. En este plan, la empresa REPSA, S.A. definió los temas a tratar. Se capacitaron a empresarios y comunitarios locales, así como estudiantes, investigadores y académicos, sobre las características físicas y biológicas de los suelos, y la extracción y manejo de hongos micorrízicos arbusculares nativos. El curso fue impartido por el coordinador del proyecto y los auxiliares de investigación I del Centro Universitario de Petén.

Se utilizó un procedimiento guía para la extracción e identificación de hongos micorrízicos, promoviendo su integración en prácticas agrícolas sostenibles, con énfasis en los beneficios en términos de crecimiento vegetal y rendimiento.

Las capacitaciones permitieron fortalecer las capacidades y aumentado la comprensión sobre la importancia de estos hongos para la salud del suelo y la productividad agrícola. En la Figura 13 se observa el proceso de capacitación brindado a líderes comunitarios del caserío Santa Rosa, Sayaxché, Petén, y al personal directivo y de campo de la empresa Reforestadora de Palma de Aceite (REPSA, S.A.) en las instalaciones de dicha empresa.

## Informe final de Proyecto de Investigación

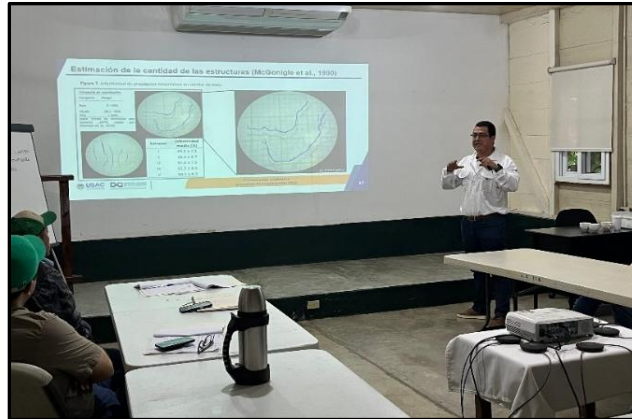
**Figura 13a**

Capacitación a comunitarios



**Figura 13b**

Capacitación empresarios REPSA



Todas las actividades realizadas en el presente estudio se llevaron a cabo mediante la utilización de equipos, materiales, herramientas y reactivos específicos, esenciales para garantizar la precisión y validez de los resultados obtenidos. Estos elementos, que son fundamentales para el desarrollo de los procedimientos experimentales, incluyen instrumentos de medición, herramientas, materiales de laboratorio y reactivos químicos. La correcta selección y manejo de estos recursos no solo contribuye a la eficacia de las metodologías empleadas, sino que también aseguran el cumplimiento de los estándares técnicos y científicos necesarios para la investigación. En la Tabla 3 se mencionan los equipos, materiales y reactivos utilizados durante todo el proceso de la investigación.



### Informe final de Proyecto de Investigación

**Tabla 3**

Equipos, materiales, herramientas y reactivos.

Actividad	Equipos	Materiales	Herramientas	Reactivos
Muestreo de suelos		Alcohol Bolsas de polietileno de 2 kg Flexómetro Guantes de látex Marcadores indelebles Cubeta (20 L)	Machete Sonda barrena Navaja	
Infectividad en raíz	Microscopio	Raíces	Bisturí	Hidróxido de potasio (KOH) 10%
	Estereoscopio	Agua desmineralizada		Ácido clorhídrico (HCL) 10%
		Cajas Petri de 8.5 cm de diámetro		Azul de tripano al 0.05%
		Agujas de disección de punta delgada		Lacto-glicerol
		Vasos de precipitado de 50 mL		
Extracción de esporas HMA		Pinza de disección de punta fina		
		Pisetas de 250 mL		
	Microscopio	Tubos para centrifuga de 10 mL		Sacarosa al 60%
	Estereoscopio	Tamices de abertura 90 µm, 63 µm y 45 µm.		Sacarosa al 20%
	Centrifugadora	Agitadores de vidrio		
	Balanza analítica	Agua desmineralizada		
		Matraces Erlenmeyer de 2 L		
Planta trampa de maíz ( <i>Zea mays</i> L)	Autoclave	Semilla de maíz ( <i>Zea mays</i> L) Macetas de plástico Suelo de palma de aceite Cedazo		Hipoclorito de sodio (NaClO)

## Informe final de Proyecto de Investigación

Sarán (80%)

### 7.6. Resumen de las variables o unidades de análisis.

**Tabla 4**

Objetivos, variable, instrumentos y unidad de medida o cualificación.

Objetivo específico	Variable	Instrumentos	Unidad de medida o cualificación
Analizar el contenido de macro y micronutrientes, materia orgánica, CIC, pH, bases intercambiables y textura en suelos cultivados con palma aceitera en la comunidad de Santa Rosa del municipio de Sayaxché, Petén, Guatemala.	Contenido de macro-nutrientes. Contenido de micro-nutrientes. Materia Orgánica. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). pH. Bases Intercambiables. Textura.	Espectrofotómetro de absorción atómica, Kit de reactivos Walkley-Black, Equipos de absorción de amonio acetato 1N, potenciómetro, Método de la probeta.	Porcentaje Meq 100 g <sup>-1</sup> Unidades pH Meq kg <sup>-1</sup> Porcentaje de arena, limo y arcilla
Aislar hongos micorrízicos arbusculares nativos presentes en la rizosfera de la palma de aceite de la comunidad de Santa Rosa del municipio de Sayaxché en Guatemala para conocer la diversidad ecológica en el suelo.	Cantidad de aislamientos fúngicos obtenidos	Microscopio de contraste de fases, Microscopio óptico/estereoscópico, Medios selectivos: Aislamiento propágulos del suelo.	Número de colonias aisladas.  Porcentaje de infectividad.
Identificar los géneros hongos micorrízicos	Géneros fúngicos identificados y validados (HMA)		



**Informe final de Proyecto de Investigación**

<p>arbusculares nativos que se encuentran presentes en la rizosfera de la palma de aceite de la comunidad de Santa Rosa, Sayaxché, Guatemala.</p>		<p>Clave de identificación morfológica [The International Collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAM)] Validación de laboratorios (Tecnológico de México, Campus Zona Olmeca) y Agro-expertos, Ciudad Guatemala.</p>	<p>Número de géneros identificados.  Número de géneros validados.</p>
<p>Cuantificar abundancia y diversidad de propágulos de hongos micorrízicos arbusculares y el porcentaje de colonización en la rizosfera de la palma aceitera.</p>	<p>Densidad de Hongos Micorrízicos Arbusculares del suelo (HMA)</p>	<p>Microscopio de contraste de fases, Microscopio óptico/estereoscópico, Medios selectivos: Aislamiento propágulos del suelo.</p>	<p>Número de esporas g<sup>-1</sup> de suelo  Índice de Simpson</p>
<p>Capacitar empresarios de palma de aceite y comunitarios y del caserío Santa Rosa en la producción de hongos micorrízicos arbusculares aislados en cultivos trampa bajo condiciones controladas.</p>	<p>Nivel de conocimiento adquirido y habilidad desarrolladas sobre la técnica.</p>	<p>Cuestionario de evaluación para determinar brechas.</p>	<p>Porcentaje del aprendizaje  Número de participantes</p>



## Informe final de Proyecto de Investigación

### 7.7. Procesamiento y análisis de la información.

Para el análisis estadístico del bioensayo, se establecieron 10 macetas (replicas) por cada uno de los 5 tratamientos evaluados que fueron previamente identificados en campo, por sus características visuales como: edad de la plantación, coloración del suelo, porcentaje de pendiente, tipo de manejo, entre otros, para un total de 50 unidades experimentales. Como lo recomienda Ortega (2021), para un diseño completamente al azar se deben de considerar un número de repeticiones mayor a ocho.

Las macetas se distribuyeron de manera aleatoria en el sitio experimental. Pasado el periodo de crecimiento de las plantas trampa (90 días después de siembra), se realizó la extracción, identificación, cuantificación y caracterización de las estructuras que formaron simbiosis del suelo de palma de aceite con raíz de las plantas de maíz (*Zea mays* L).

Con los datos obtenidos, se efectuaron pruebas de validez de los supuestos estadísticos. Primero se verificó, la no violación de la normalidad de los datos, mediante la utilización de gráficos QQ-plot (Gráfico cuartil-cuartil), el cual permite medir el grado de ajuste de los residuos obtenidos versus los cuantiles teóricos de una distribución normal, asimismo, se analizó la homogeneidad de varianzas a través de la gráfica de regresión lineal, donde busca determinar la correlación entre los residuos de los datos y sus predichos (InfoStat, 2008).

Posteriormente, al determinar la no violación de los supuestos estadísticos, que permiten garantizar la validez y precisión de los resultados, se procedió a realizar un análisis de varianza mediante un diseño completamente aleatorio, utilizando el software estadístico Infostat versión 2020I. El modelo estadístico es el siguiente (Ortega, 2021):

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$ : Infectividad de propágulos y densidad de esporas en rizosfera de plantas trampa de maíz (*Zea mays* L), en suelo cultivado con palma de aceite del caserío Santa Rosa, Sayaxché, Petén, Guatemala.

$\mu$ : Media general de la infectividad de propágulos y densidad de esporas en rizosfera de plantas trampa de maíz (*Zea mays* L), en suelo cultivado con palma de aceite del caserío Santa Rosa, Sayaxché, Petén, Guatemala.

$T_i$ : Efecto del  $i$ -ésimo estrato evaluado en suelo cultivado con palma de aceite del caserío Santa Rosa, Sayaxché, Petén, Guatemala.

$\varepsilon_{ij}$ : Error experimental asociado a la  $ij$ -ésima planta trampa de maíz (*Zea mays* L) evaluada.

$i$ : 1, 2, 3, 4 y 5 estratos.

$j$ : 1, 2, 3...8, 9 y 10 plantas trampa con cultivo de maíz (*Zea mays* L).

Ante la presencia de diferencias significativas entre los tratamientos analizados (estratos), se llevó a cabo una prueba de comparación múltiple de medias con el test de Tukey ( $\alpha=0.05$ ),



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

para identificar los grupos estadísticamente distintos y aquellos que mostraron una superioridad en los resultados obtenidos.

Adicionalmente se determinó el índice de riqueza de Simpson, el cual permitió establecer la probabilidad de que dos aislamientos tomados al azar de una misma muestra pertenezcan a al mismo género (Villareal et al., 2006), proporcionando con ello, una medida de riqueza y abundancia de los géneros presentes. El modelo estadístico propuesto por Edward Simpson en el año 1949 es el siguiente:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S \frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)}$$

Donde:

$n_i$ : Es el número de individuos de cada género de HMA identificados.

$N$ : Número de total de individuos de cada género encontrados por estrato.

Al complementar el análisis de varianza con el índice de riqueza de Simpson, se obtuvo información adicional sobre la estructura de la comunidad microbiana o de los organismos estudiados. Este índice no solo refleja la presencia y riqueza de los diferentes géneros, sino que también toma en cuenta su abundancia relativa, lo que puede ser relevante para entender la dominancia de ciertos géneros en la muestra.

## **8. Aspectos éticos y legales**

La investigación realizada se centra en los hongos micorrízicos del suelo, un componente esencial para la salud y funcionamiento de los ecosistemas, y no implica la recolección de especies en peligro o la alteración de hábitats protegidos. Por lo tanto, no se requiere permisos respectivos, debido a haberse realizado la recolección de las muestras de manera responsable y sin afectar áreas reguladas. Además, se ha seguido un enfoque que prioriza la conservación y el respeto por el entorno natural.

Por otro lado, es importante señalar que, dado que el material compartido para la validación de géneros de HMA del área de estudio al laboratorio de México, es únicamente digital y no involucra el traslado de organismos vivos o suelo, no existe riesgo fitosanitario asociado al envío. Por lo tanto, no es necesario requerir permisos por parte del país importador. Esta práctica se alinea con las regulaciones fitosanitarias vigentes que exigen permisos solo en casos donde se transporten muestras físicas que puedan afectar la sanidad vegetal.

## **9. Resultados**

### **9.1. Propiedades físico-químicas del suelo**

El análisis de suelo permite determinar las principales propiedades físicas y químicas que están relacionadas con la presencia, desarrollo, riqueza y abundancia de hongos micorrízicos arbusculares nativos en la rizosfera de la palma de aceite. En la Tabla 5 se observan los

### Informe final de Proyecto de Investigación

resultados obtenidos del análisis fisicoquímico de cada muestra de suelo por estrato establecido con palma de aceite para el estudio.

**Tabla 5**

Resumen del análisis fisicoquímico de suelo.

Análisis	Rango		Estratos				
	Límite inferior	Límite superior	I	II	III	IV	V
pH (Unidades)	5.6	7.2	5.1	5.3	5.4	5.3	5.2
Materia Orgánica (%)	2	4	2.4	2.4	2.0	1.8	2.3
CICe (Meq 100 g <sup>-1</sup> )	5	15	14.5	11.4	38.8	7.5	13.7
Fósforo (mg kg <sup>-1</sup> )	20	75	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9
Potasio (mg kg <sup>-1</sup> )	156	312	179.8	178.5	304.8	69.5	114.7
Calcio (mg kg <sup>-1</sup> )	1000	2000	2237	1772.3	5000	1152.9	2238.5
Magnesio (mg kg <sup>-1</sup> )	96	240	343.6	247.6	736.3	185	261.4
Azufre (mg kg <sup>-1</sup> )	30	250	11.3	12.5	10.2	15	8.4
Boro (mg kg <sup>-1</sup> )	1	5	0.2	0.7	1	0.2	0.2
Cobre (mg kg <sup>-1</sup> )	1	10	0.9	0.7	1.9	0.8	1.2
Hierro (mg kg <sup>-1</sup> )	40	250	191.4	150.6	122.3	124.3	182.2
Manganeso (mg kg <sup>-1</sup> )	10	250	22.1	44.5	54.8	67.5	24.5
Zinc (mg kg <sup>-1</sup> )	2	25	1.3	1.4	1.4	1.3	1.7
Sodio (mg kg <sup>-1</sup> )	--	460	16.7	18.7	26.7	16.2	16.2
Acidez Intercambiable (Meq 100 g <sup>-1</sup> )	--	2	0.5	0.4	0.1	0.5	0.3
Arcilla (%)			12.6	10.4	42.2	13.5	21.5
Arena (%)			55.1	62.1	24.7	62.3	44.5
Limo (%)			32.3	27.6	33.1	24.1	34.0
Clase textural			Arcilloso	Franco	Franco arcilloso	Franco arenoso	Franco arenoso

Nota. Resultados obtenidos del laboratorio de Soluciones Analíticas, S.A., localizado en la ciudad de Guatemala. Los valores de rango inferior y superior los establece el laboratorio basándose en la interpretación agronómica y las necesidades específicas del cultivo, utilizando rangos de referencia que indican deficiencia,

### Informe final de Proyecto de Investigación

óptimo y exceso, con estándares que varían por nutriente para optimizar la fertilidad y productividad del suelo, aunque los valores exactos se derivan de guías agronómicas y la experiencia propia del laboratorio.

Se puede observar en la Tabla 5 que los resultados de suelos realizado en los cinco estratos revelan similitud principalmente en cuanto a concentración de pH, contenido de materia orgánica y concentración de fósforo.

#### 9.2. Propágulos micorrízicos en raíz de palma de aceite

La infectividad de propágulos en las raicillas de palma de aceite incluye a todas las estructuras determinadas a nivel de laboratorio, mediante la metodología de McGonigle et al. (1990) citado por Gómez y Hernández, (2023), la cual, incluye esporas, hifas, arbuscúlos y vesículas.

El nivel de infectividad de hongos micorrízicos arbusculares en la raíz de las plantas se determinó en porcentaje. Los resultados se categorizan de acuerdo con los rangos definidos por Nicholson y Schenck en 1979, tal como es citado por Restrepo et al. (2019). Las categorías de colonización de raíces son: baja (0 - 20%), media (20.1 - 50%) y alta (> 50%). Con los rangos establecidos, fue posible determinar la categoría de infectividad para cada estrato estudiado en la investigación. En la Tabla 6 se presentan los porcentajes de infectividad media por cada estrato, así como, la categorización según la escala de Nicholson and Schenck (1979).

**Tabla 6**

Media de infectividad por estrato en raíz de palma de aceite (%).

Estratos	Infectividad media (%)	Intervalos de confianza		Categoría
		LI (95%)	LS (95%)	
I	37.2 ± 5.0	33.62	40.78	Media
II	34.8 ± 10.0	27.66	41.94	Media
III	42.8 ± 7.8	37.23	48.37	Media
IV	48.0 ± 10.8	40.25	55.75	Media
V	36.0 ± 3.3	33.66	38.34	Media

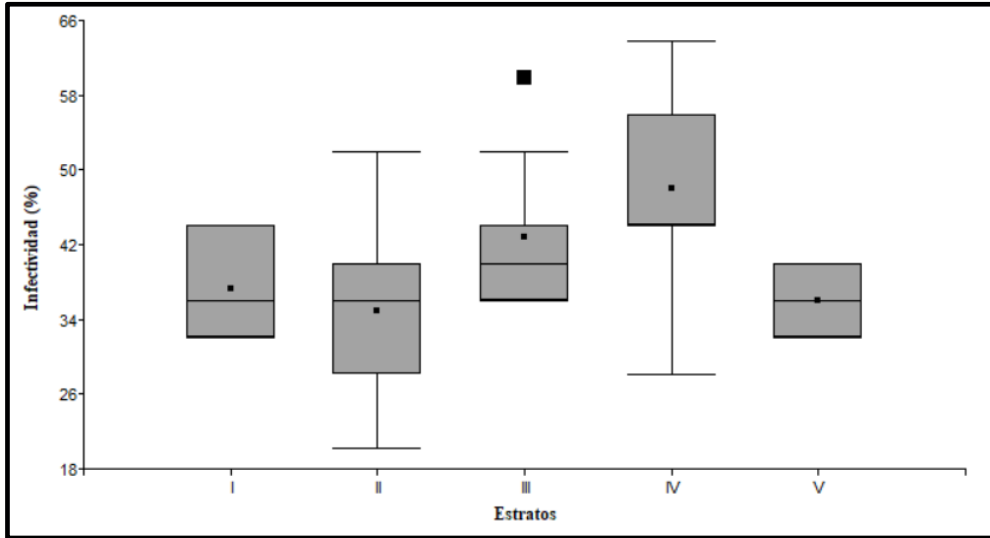
Nota. Categoría según escala de Nicholson and Schenck ,1979; citado por Restrepo et al., 2019.

En la Figura 14 se presenta la distribución de la totalidad de los datos proporcionados por la infectividad de propágulos de HMA en las raicillas de palma de aceite, para poder analizar la distribución general de los mismos.

## Informe final de Proyecto de Investigación

**Figura 14**

Infectividad de propágulos en raíces de palma de aceite

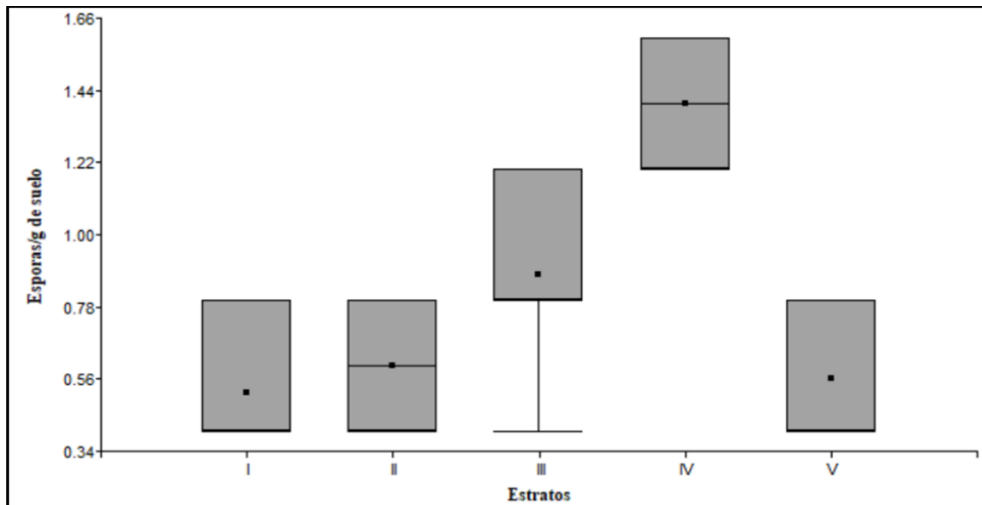


### 9.3. Esporas de HMA en suelo de palma de aceite

Luego de haberse procesado y analizado las 50 muestras de suelo extraído en los cinco estratos con plantaciones de palma de aceite, mediante la metodología descrita de tamizado húmedo y decantación (Gerdemann y Nicolson, 1963; citado por Gómez y Hernández, 2023) y flotación en azúcar (Daniels y Skipper, 1982; citado por Gómez y Hernández, 2023), se registró 542 esporas de hongos micorrízicos arbusculares nativos en todo el estudio. En la Figura 15 se presenta la distribución cuartílica de la densidad de esporas de HMA en el suelo de palma de aceite para cada uno de los estratos evaluados.

**Figura 15**

Densidad de esporas de HMA en suelo de palma de aceite



## Informe final de Proyecto de Investigación

### 9.4. Incremento de esporas de HMA nativos en planta trampa

Paralelamente al proceso de estudios de las muestras para análisis físico-químico y de estudio de la extracción directamente de la rizosfera de cada estrato con plantaciones en producción de palma de aceite del caserío Santa Rosa, Sayaxché, Petén; se estableció el proceso de incremento de cultivo de esporas de HMA nativos en plantas trampa con maíz (*Zea mays* L), esto con la finalidad de obtener una alta producción de la colonia de esporas en el suelo y evaluar el efecto de los estratos que presentan diferentes características de suelo y manejo del cultivo.

El proceso de plantas trampa, duro en campo 90 días, donde posteriormente se analizaron los datos sometidos a exploración para el análisis de varianza de las dos variables en estudio: infectividad de propágulos en las raicillas y densidad de esporas presentes en el suelo de las plantas trampa de maíz (*Zea mays* L) respectivamente.

#### 9.4.1 Infectividad en plantas trampa de maíz (*Zea mays* L)

En las raicillas de las plantas trampas del cultivo de maíz (*Zea mays* L) con suelo de palma de aceite, se determinó inicialmente la infectividad de propágulos en el laboratorio, mediante la metodología descrita anteriormente. En la Tabla 7 se observan los valores categorizados según los rangos de infectividad, establecidas por Nicholson and Schenck (1979); citado por Restrepo et al. (2019).

**Tabla 7**

Media de infectividad por estrato en raíz de planta de *Zea mays* (%).

Estratos	Infectividad media (%)	Intervalos de confianza		Categoría
		LI (95%)	LS (95%)	
I	49.2 ± 7.1	44.14	54.26	Media
II	46.4 ± 8.7	40.19	52.61	Media
III	52.0 ± 7.5	46.60	57.40	Alta
IV	61.2 ± 7.5	55.47	66.93	Alta
V	50.4 ± 8.2	44.49	56.31	Alta

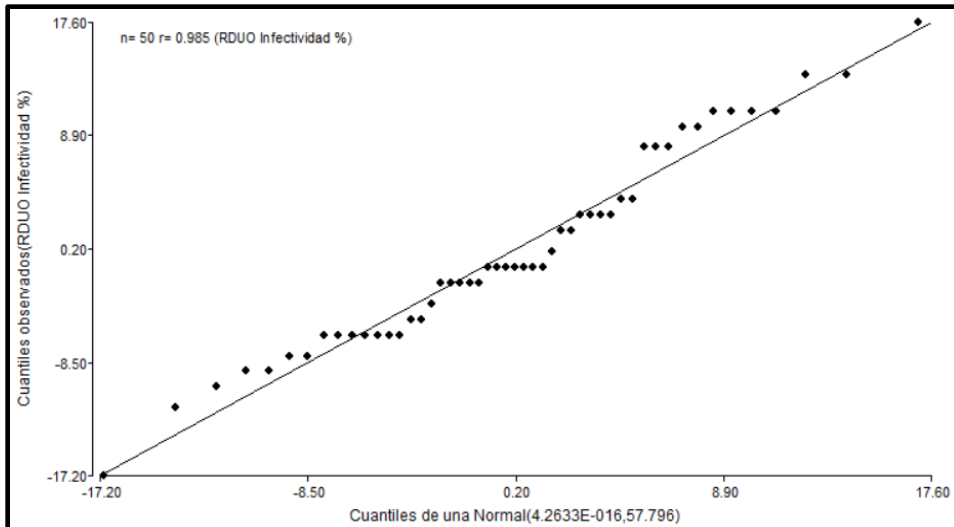
Nota. Categoría según escala de Nicholson and Schenck ,1979; citado por Restrepo et al., 2019.

Por otro lado, para someter a análisis de varianza los datos obtenidos en cada estrato, se procedió a la validación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza. En la Figura 16 se puede observar la validación del supuesto de normalidad de los datos, mediante el uso de la regresión lineal simple entre los cuartiles observados de los datos de infectividad y los cuartiles de una distribución normal teórica.

## Informe final de Proyecto de Investigación

**Figura 16**

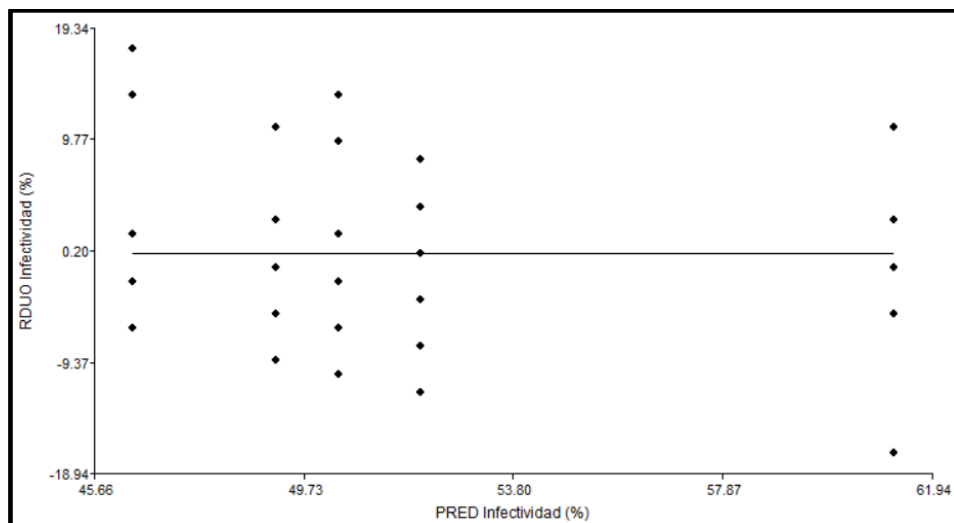
Normalidad de infectividad de HMA en cultivo trampa de maíz



Asimismo, en el proceso de validación de datos, se realizó el análisis de homogeneidad de varianzas, esto se refiere a la igualdad o uniformidad de la varianza en una población o entre grupos (Westfall & Henning, 2013). En términos formales, la homogeneidad supone que "la varianza de los errores es la misma en todas las observaciones" (García & Núñez, 2003, p. 253). En la Figura 17 se tiene el análisis de homogeneidad de varianzas de los datos, con la finalidad de tener la confiabilidad de los resultados estadísticos realizados.

**Figura 17**

Homogeneidad para la infectividad de HMA en maíz



### Informe final de Proyecto de Investigación

En la Tabla 8 se observa el análisis de varianza realizado para la variable de infectividad de propágulos en cultivo de plantas trampa con maíz (*Zea mays* L), utilizando como sustrato el suelo de palma de aceite extraído del caserío Santa Rosa, Sayaxché, Petén.

**Tabla 8**

Análisis de varianza para infectividad de propágulos en raíz de maíz (%).

F.V.	S.C.	G.L.	C.M.	F	P-Valor	SIG.
Estratos	1262.72	4	315.68	5.016	0.002	* *
Residuos	2832.00	45	62.93			
Total	4094.72	49				

Nota: \*\*Diferencias altamente significativas.  
Coeficiente de variación: 15.30%.

Debido a determinarse diferencias significativas se procedió a realizar una prueba de medias. En la Tabla 9 se aprecia la prueba de Tukey realizada a la variable de infectividad de propágulos respectivamente para las plantas trampa en maíz (*Zea mays* L).

**Tabla 9**

Prueba de medias de Tukey para la infectividad en raíz de maíz (%).

Estratos	Medias (%)	n	Grupos
IV	61.2 ± 8.0	10	A
III	52.0 ± 7.5	10	A B
V	50.4 ± 8.3	10	B
I	49.2 ± 7.1	10	B
II	46.4 ± 8.7	10	B

Nota: Medias con letra común no son estadísticamente diferentes ( $p > 0.05$ ).

#### 9.4.2 Densidad de esporas en plantas trampa de maíz (*Zea mays* L)

Para el análisis de la densidad de esporas en el suelo del cultivo trampa con maíz (*Zea mays* L), se utilizó como indicador el número de esporas por gramo de suelo que se encontraban presentes en cada unidad experimental asociada a los estratos evaluados, mediante la metodología de tamizado húmedo y decantación (Gerdemann y Nicolson, 1963; citado por Gómez y Hernández, 2023) y flotación en azúcar (Daniels y Skipper, 1982; citado por Gómez y Hernández, 2023), como se describe en la metodología. En la Tabla 10 se observa

### Informe final de Proyecto de Investigación

la densidad de esporas por gramo de suelo en suelo de plantas trampa con maíz (*Zea mays* L).

**Tabla 10**

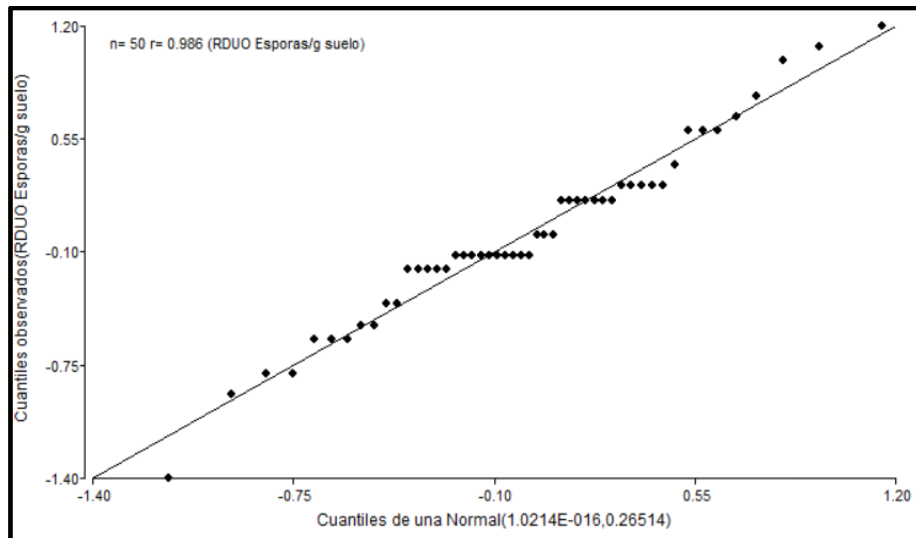
Densidad media de esporas en suelo de plantas trampa en maíz.

Estrato	Esporas g <sup>-1</sup> suelo	Intervalos LI (95%)	de confianza LS (95%)
I	2.1 ± 0.6	1.69	2.55
II	2.5 ± 0.2	2.38	2.66
III	3.0 ± 0.6	2.57	3.43
IV	3.4 ± 0.5	3.04	3.76
V	1.6 ± 0.6	1.13	2.07

Para someter a análisis de varianza los datos obtenidos, se procedió a la validación de los supuestos estadísticos para esta variable. En la Figura 18 se observa la validación del supuesto de normalidad de los datos.

**Figura 18**

Normalidad para la densidad de HMA en cultivo trampa de maíz

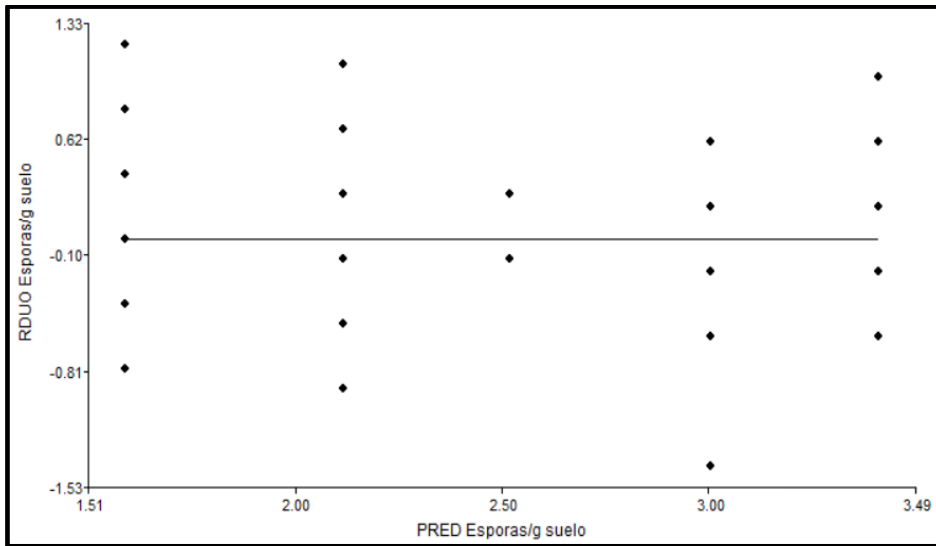


En la Figura 18 se puede apreciar la distribución cuartílica de la densidad de esporas de HMA en suelo de las plantas trampa evaluadas, mediante la gráfica QQ-plot, con un valor alto de r (0.986). En la Figura 19 se tiene el análisis de homogeneidad de varianzas, la cual permite tener confiabilidad de los resultados estadísticos obtenidos.

**Informe final de Proyecto de Investigación**

**Figura 19**

Homogeneidad para la densidad de esporas de HMA en maíz



En la Tabla 11 se muestra el respectivo análisis de varianza para en número de esporas por gramo de suelo en las plantas trampa.

**Tabla 11**

Análisis de varianza para la densidad de esporas en maíz.

F.V.	S.C.	G.L.	C.M.	F	P-Valor	SIG.
Estratos	20.11	4	5.03	17.413	0.000	* *
Residuos	12.99	45	0.29			
Total	33.1	49				

Nota. \*\*Diferencias altamente significativas.  
Coeficiente de variación: 21.25%

Debido a encontrarse diferencias altamente estadísticas entre los estratos, se procedió a realizar una prueba de medias utilizando el test de Tukey (HSD). En la Tabla 12 se aprecia la prueba de Tukey realizada a la variable en estudio.

## Informe final de Proyecto de Investigación

**Tabla 12**

Prueba de medias de Tukey para la densidad de esporas.

Estratos	Medias (Esporas g <sup>-1</sup> suelo)	n	Grupos
IV	3.4 ± 0.6	10	A
III	3.0 ± 0.2	10	A B
II	2.5 ± 0.6	10	B C
I	2.1 ± 0.5	10	C D
V	1.6 ± 0.7	10	D

Nota. Medias con letra común no son estadísticamente diferentes ( $p > 0.05$ ).

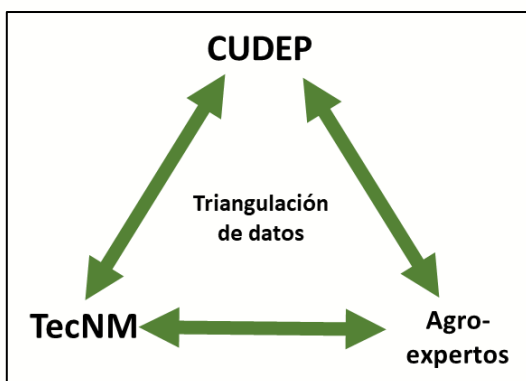
### 9.5. Caracterización de géneros de HMA

Para la caracterización de los géneros de hongos micorrízicos arbusculares nativos, se procedió a realizarse en dos fases, la primera fue la identificación de los géneros a partir de claves taxonómicas en línea, esto se realizó en conjunto con el equipo de auxiliares de investigación a nivel morfológico.

La segunda fase consistió en realizar una validación remota con las muestras extraídas del suelo de palma de aceite y el envío de micrografías digitales en forma simultánea al laboratorio de biotecnología del Tecnológico Nacional de México (TecNM) del campus zona Olmeca y al laboratorio de diagnóstico, investigación y tecnología Agro-expertos en la ciudad de Guatemala, esto con la finalidad de poder realizar una triangulación de datos para incrementar y fortalecer la confiabilidad de los géneros identificados, con lo cual se busca evitar sesgos o errores que pudieran invalidar los resultados. En la Figura 20 se aprecia el diagrama general de triangulación de datos para la identificación de los géneros de hongos micorrízicos arbusculares.

**Figura 20**

Diagrama de triangulación de datos





## Informe final de Proyecto de Investigación

En la Figura 20 se observa la identificación inicial realizada en el laboratorio del Centro Universitario de Petén (CUDEP) con la clave de INVAM, así como, el proceso de doble vía entre los laboratorios del tecnológico de México (TecNM) y la ciudad de Guatemala (Agro-expertos).

### 9.5.1 Identificación y validación de géneros de HMA

El proceso de caracterización de HMA inicio con la identificación en el laboratorio del Centro Universitario de Petén, mediante un proceso morfológico basado en características como el tamaño, forma y color, para ello, se extrajeron del suelo 542 esporas de HMA y mediante la utilización de la clave taxonómica The International Collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAM), se identificaron cuatro géneros (*Glomus* sp., *Acaulospora* sp., *Gigaspora* sp. y *Diversispora* sp.), asimismo, se obtuvo un 11% de esporas que no pudieron ser identificadas, debido a tener poco desarrollo de sus estructuras morfológicas, por lo cual, se evitó incurrir en una identificación incorrecta o dudosa.

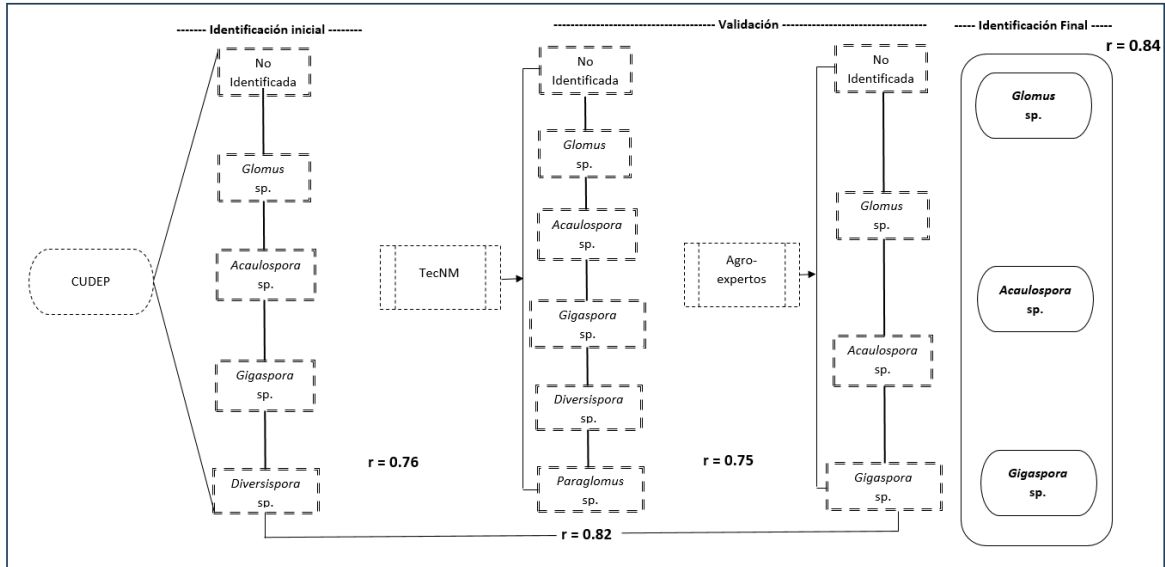
Las micrografías digitales por estrato fueron trasladadas al laboratorio de biotecnología del Tecnológico Nacional de México (TecNM) del campus zona Olmeca donde fue posible la identificación de cinco géneros de HMA, siempre a nivel morfológico siendo ellos: *Glomus* sp., *Acaulospora* sp., *Gigaspora* sp., *Diversispora* sp. y *Paraglomus* sp. y con un 5% de géneros que no fue posible su identificación debido a lo poco desarrolladas las estructuras. Por último, el laboratorio de diagnóstico, investigación y tecnología Agro-expertos en la ciudad de Guatemala, logró identificar morfológicamente tres géneros de hongos (*Glomus* sp., *Acaulospora* sp. y *Gigaspora* sp.) y un 1% de géneros que de igual forma no fueron posibles su identificación.

A partir de la información recopilada durante el proceso de identificación y validación de los géneros, se procedió a organizar los datos en una matriz con el fin de explorar tanto aquellos géneros no identificados como los que mostraron consistencia en al menos dos de las tres fuentes de investigación. Se calculó el índice de Jaccard al analizar el número de géneros compartidos entre los tres laboratorios en relación con el total de géneros identificados, obteniendo un alto valor de similitud (0.7). En la Figura 21 se presenta el diagrama del proceso de identificación y validación de los géneros de HMA.

## Informe final de Proyecto de Investigación

**Figura 21**

Diagrama de identificación y validación de géneros de HMA



En la Figura 22 se observa el proceso en el cual, después de la identificación inicial realizada en el Centro Universitario de Petén (CUDEP), y la validación, se llegó a determinar la mayor presencia de los géneros *Glomus sp.*, *Acaulospora sp.* y *Gigaspora sp.* con una correlación fuerte entre los tres laboratorios.

Al mismo tiempo, se determinaron las correlaciones parciales entre cada par de laboratorios, obteniendo coeficientes con fuerte correlación entre: CUDEP/TecNM, CUDEP/Agro-expertos y TecNM/Agro-Expertos.

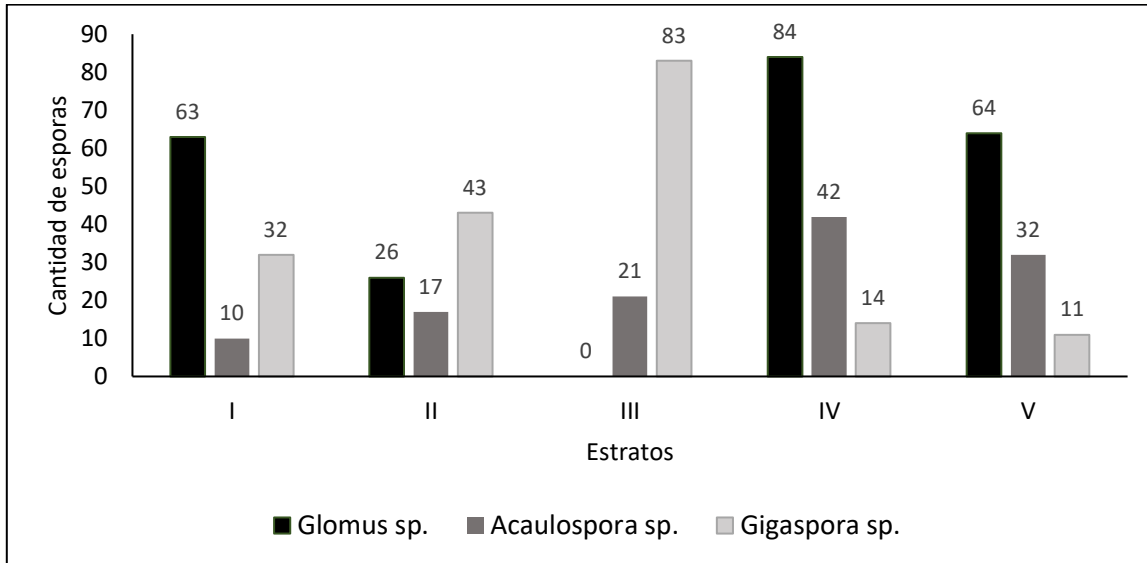
### 9.5.2 Diversidad y abundancia de géneros de HMA

Con el proceso de identificación y validación del asocio simbiótico de géneros de HMA nativos, se determinó la presencia de 542 esporas distribuida en los tres géneros representativos en la rizosfera. En la Figura 22 se puede observar la distribución de esporas por gramo de suelo en cada estrato.

## Informe final de Proyecto de Investigación

**Figura 22**

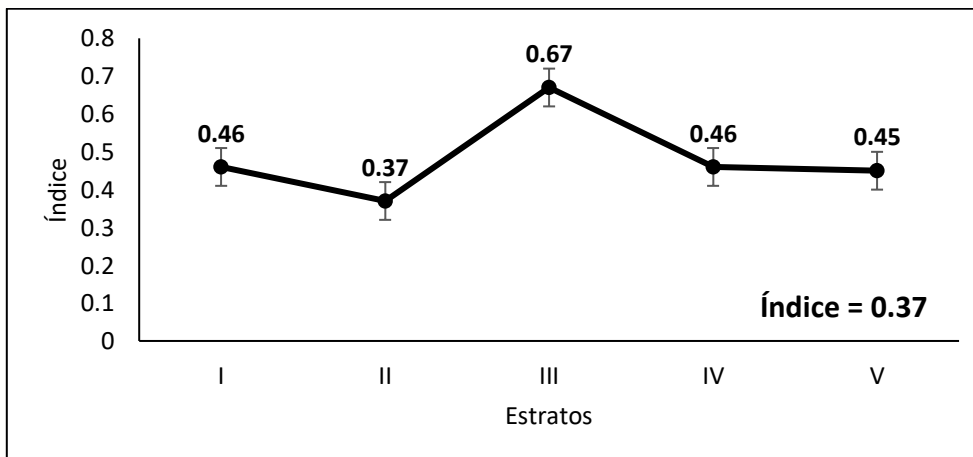
Número de esporas por gramo de suelo por estrato



Para obtener la diversidad y dominancia estadística de los géneros, se procedió a determinar el índice de riqueza de Simpson. En la Figura 23 se observan los valores del índice para cada estrato, así como, de manera global para la investigación.

**Figura 23**

Índice de diversidad de Simpson



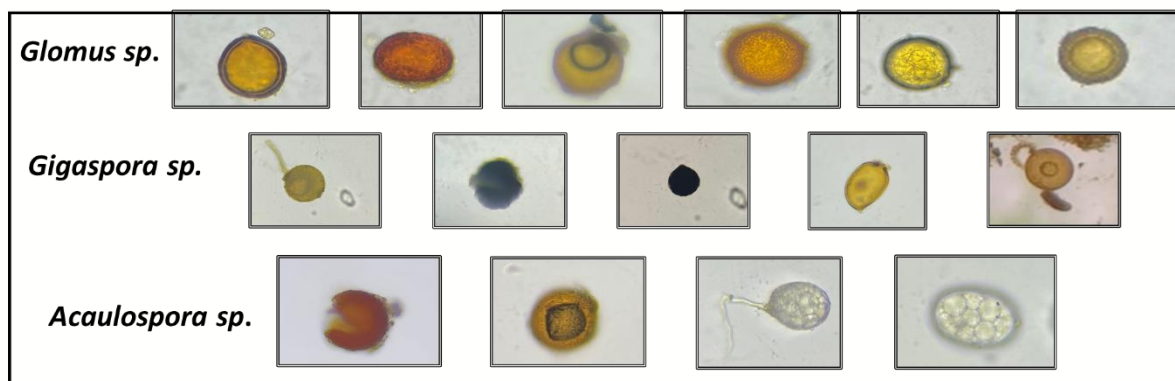
## Informe final de Proyecto de Investigación

### 9.5.3 Esporas de HMA identificadas

Como resultados finales se establecieron los montaje de esporas en preparaciones fijas (modificado de Koske y Tessier 1983 y de Brundett et al., 1996), identificando de manera morfológica por el grupo de Investigación del centro Universitario de Petén (CUDEP) de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) con la validación del laboratorio de biotecnología del Tecnológico Nacional de México/Campus Zona Olmeca y el laboratorio de Diagnostico, Investigación y Tecnología Agro-expertos, de la ciudad de Guatemala. En la Figura 24 se aprecia las imágenes obtenidas a nivel de microscopio 40X de los géneros identificados y validados de esporas de HMA en la rizosfera del suelo cultivado con palma de Aceite en el caserío Santa Rosa, Sayaxché, Petén.

#### Figura 24

Esporas de hongos micorrízicos arbusculares nativas identificadas



Los resultados obtenidos de la identificación morfológica de esporas de hongos micorrízicos arbusculares son fundamentales para comprender la diversidad y funcionalidad de estos microorganismos en el contexto del cultivo de palma de aceite en la región.

## 10. Discusión de resultados

### 10.1. Análisis de suelo de palma de aceite

Se estableció como objetivo específico analizar el contenido de macro y micronutrientes, materia orgánica, CIC, pH, bases intercambiables y textura en suelos cultivados con palma aceitera en la comunidad de Santa Rosa del municipio de Sayaxché, Petén, Guatemala. Según estudios realizados por Sharma et al., (2009), mencionan que la presencia de hongos micorrízicos arbusculares está influenciada por el pH del suelo, inclusive más que por el fósforo y las especies vegetativas, por otro lado, Bolaños et al., (2000), afirman que los valores de contenido de fósforo en el suelo, puede considerarse principalmente como un indicador de la mayor o menor presencia de hongos micorrízicos arbusculares, por ello, las



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

concentraciones bajas de este elemento en los suelos de palma de aceite en el caserío Santa Rosa, Sayaxché, Petén; benefician el crecimiento de los microorganismos en estudio.

Esta situación respalda lo establecido por Blanco y Salas en 1997, quienes indicaron que el principal beneficio que las plantas obtienen de los hongos micorrízicos arbusculares, es el aumento en la absorción de fósforo, especialmente en situaciones donde este nutriente es limitante, como se observa en el presente estudio. Por el contrario, en condiciones donde el fósforo no es un factor limitante, el aporte de los HMA es nulo o significativamente reducido. Esto lleva a la conclusión de que altos niveles de fósforo pueden inhibir la efectividad de la simbiosis micorrízica, restringiendo así los beneficios potenciales de esta asociación.

Asimismo, es interesante notar que el estrato IV, a pesar de estar bajo manejo orgánico, presentó el menor contenido de materia orgánica (1.8%) en comparación con los otros estratos. Además, fue el único que se ubicó por debajo del límite inferior sugerido por el laboratorio. Esta situación puede atribuirse a diversas causas. Según Brechelt (2004), si la materia orgánica utilizada consiste en residuos vegetales con un largo tiempo de descomposición, la aplicación y la integración al suelo debe hacerse con suficiente anticipación, ya que los efectos positivos se manifiestan a más largo plazo. Esto podría explicar por qué los resultados no se reflejan en el análisis de suelo, a diferencia de lo que ocurre en sistemas de manejo convencional.

Por otro lado, es esencial realizar un análisis integral de los resultados, ya que, a pesar del bajo contenido de materia orgánica, el estrato IV muestra un mejor equilibrio en los macro y microelementos. Esta dinámica sugiere que, aunque la materia orgánica se refleje de manera limitada en el análisis, la interacción entre los nutrientes puede contribuir a una mejor salud del suelo y a un potencial rendimiento de las plantas.

#### **10.2. Infectividad de Propágulos micorrízicos en raíz de palma de aceite**

En lo que respecta a la infectividad por estrato en raíz de palma de aceite, se puede observar que existe alta variabilidad entre cada porcentaje de infectividad dentro de los estratos principalmente del II y IV con desviaciones estándares de 10.0 y 10.8 respectivamente, mientras que el estrato V, presentó la menor variabilidad, concentrándose los datos muy cerca de la media y la mediana. El comportamiento general de los propágulos de los hongos micorrízicos arbusculares en la rizosfera del suelo, se presentaron en un rango de infectividad que varía entre el 20% y el 64%. Los estratos III y IV se destacan con niveles de 52% y 64% respectivamente, evidenciando la influencia de las características del suelo en el rendimiento del estrato IV (orgánico). Este último también mostró una mayor dispersión en los datos en comparación con los estratos I y V. Cabe destacar que el estrato III presenta valores atípicos, ya que una de las muestras analizadas alcanzó un nivel de infectividad del 60%. Por otro lado, el estrato II registró el porcentaje más bajo de infectividad, con un 20%.



## Informe final de Proyecto de Investigación

### 10.3. Densidad de esporas de HMA en suelo de palma de aceite

Los rangos de densidad de esporas, se presentaron en medias que van de 0.40 a 1.40 esporas  $g^{-1}$  de suelo. Es importante resaltar que el estrado IV manejado de manera orgánica por la empresa REPSA, mostro un mayor promedio de esporas ( $1.40 \pm 0.21$  esporas  $g^{-1}$  de suelo). Se puede observar la distribución del conjunto de datos analizados en la investigación. Los estratos I, II y V presentan los valores más bajos de esporas (0.4) a diferencia del estrato III y IV quienes presentaron valores más altos de 1.20 y 1.60 respectivamente. también es necesario mencionar que el estrato III presentó mayor variabilidad entre el número de esporas por gramo de suelo, localizados en el primero y segundo cuartil de la distribución, pero a pesar de ello y de manera general, se logra apreciar bastante estabilidad y normalidad en los datos.

Estos resultados hacen referencia a los obtenidos por Rini et al. (2023) en Indonesia, sobre las poblaciones de HMA en la rizosfera de palma aceitera, donde observó que, a mayores cantidades de fertilizantes químicos, y alto contenido de arcilla (textura franco-arcillosa) y fósforo disponible, así como, un CIC más elevado, presentaron mayores poblaciones de HMA, como el caso del estrato III que posee un suelo franco arcilloso y con un CIC más elevado que los otros estratos.

### 10.4. Infectividad de esporas de HMA en plantas trampa

Los estratos presentaron incremento en el porcentaje de infectividad comparado con la proporción encontrada de forma directa en el suelo de palma de aceite, a tal grado, que los estratos III, IV y V, pasaron de una categoría media a alta, esto responde a las condiciones de estrés hídrico y abiótico sometido bajo las condiciones de plantas trampa, y al efecto del uso de una especie vegetal como el maíz (*Zea mays* L).

Estos resultados se asemejan a los obtenidos por Ritaqwin y Maulana (2021), donde identificaron hongos micorrízicos arbusculares en el cultivo de palma de aceite establecido en la provincia de Aceh, Indonesia, verificando que la planta hospedante que produjo mayor colonización de HMA de las tres evaluadas fue el maíz (*Zea mays* L) con un 78% de infectividad, colocándolo en una categoría alta, en similares condiciones a los estratos III, IV y V del presente estudio.

Estos datos fueron sometidos a la validez del cumplimiento de normalidad para la infectividad de HMA en la raíz de las plantas trampa de maíz (*Zea mays* L), esto permite establecer confianza en los datos para el proceso de estadística experimental basada en análisis de varianza. Asimismo, se observó que cumple con el supuesto de homogeneidad de varianzas, debido a no observar ningún patrón establecido en los datos preparados para análisis.



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

En los resultados del análisis de varianza se puede observar que existió diferencias altamente significativas entre los estratos evaluados para la variable de infectividad de HMA nativos en las plantas trampa establecidas con el cultivo de maíz (*Zea mays* L) con un nivel de confianza del 95%, por ello, se procedió a realizar una prueba de medias utilizando el test de Diferencias Honestamente Significativas de Tukey (HSD), donde se presentó la formación de dos grupos estadísticos, donde, el estrato IV y III, presentaron la mejor infectividad de HMA nativos en las raíces del cultivo de maíz (*Zea mays* L), no mostrando diferencias significativas entre sus respectivas medias. No obstante, es importante resaltar que el segundo grupo quedo establecido por los estratos III, V, I y II con medias que no difieren estadísticamente.

#### **10.5. Determinación de la densidad de esporas en plantas trampa**

Los estratos presentaron incremento en el número de esporas por gramo de suelo en comparación con los encontrados en las muestras de suelo con plantaciones de palma de aceite directamente en campo. Asimismo, se puede ver que la esporulación y producción de micelio promedio fue superior en los cultivos trampa para los estratos III y IV.

Los resultados fueron superiores a los obtenidos por Cervantes-Gámez et al., (2021), en un estudio realizado en Sinaloa, México, sobre la diversidad de hongos micorrízicos arbusculares asociados a plantas voluntarias de maíz (*Zea mays* L), donde se determinó un nivel de colonización entre 0.16 a 0.39 esporas g<sup>-1</sup> de suelo, pero como los autores lo expresan, este nivel fue considerado bajo debido a la etapa fenológica de la planta al momento del muestreo, a diferencia de la investigación realizada que se esperó a que completara el ciclo completo el cultivo de maíz (*Zea mays* L).

Antes de llevar a cabo el análisis de varianza, es fundamental validar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. En este estudio, se confirma que los datos se ajustan a una distribución normal y se satisfacen las condiciones de homogeneidad de varianzas con un nivel de confianza del 95%. Esta validación es crucial, ya que permite avanzar de manera adecuada en el análisis experimental de los datos, asegurando la fiabilidad de los resultados obtenidos.

En el análisis de varianza, se observa que existe diferencias altamente significativas entre los estratos evaluados para la variable de densidad de esporas de HMA nativos en las plantas trampa establecidas con el cultivo de maíz (*Zea mays* L), a un nivel de confianza del 95%, debido a ello, se procedió a realizar una prueba de medias utilizando el test de Tukey (HSD). En la prueba de medias se observa la formación de cuatro grupos estadísticos, asimismo, los estratos IV y III, presentaron la más alta densidad de esporas, no mostrando diferencias significativas entre sus respectivas medias, por otro lado, se aprecia que el estrato III en particular, presentó menor variabilidad entre sus datos, eso genera una mejor consistencia en

### **Informe final de Proyecto de Investigación**

los resultados obtenidos. Mientras que los estratos I y V, fueron los que mostraron la menor densidad de esporas, quedando en el grupo con las medias más bajas.

En resumen, se observa que la infectividad de las raíces con hongos micorrízicos arbusculares nativos y la densidad de esporas por gramo de suelo, presentaron más abundancia en el estrato IV, el cual ha sido manejado orgánicamente por la empresa REPSA, S.A. Este hallazgo respalda lo señalado por Sánchez (2023), que indica que el manejo orgánico promueve una mejor condición y salud del suelo en comparación con métodos convencionales, influyendo positivamente en la abundancia de la biota edáfica.

#### **10.6. Identificación de géneros de HMA**

Los resultados obtenidos en la identificación y validación de géneros de hongos micorrízicos arbusculares, revelan la diversidad de estos organismos en el suelo analizado. La metodología empleada, que incluyó la utilización de claves taxonómicas como INVAM y un enfoque morfológico robusto, demuestra un esfuerzo por asegurar la fiabilidad de los resultados. El cálculo del índice de Jaccard para evaluar las similitudes entre los tres laboratorios (0.7) sugiere una congruencia significativa en las identificaciones realizadas, es decir, una similar composición de géneros (Mendoza, 2013), lo que puede interpretarse como un indicador de la robustez del procedimiento de identificación y la calidad de los datos.

Además, la fuerte correlación ( $r = 0.84$ ) entre los tres laboratorios en la presencia de géneros comunes, como *Glomus* sp., *Acaulospora*, sp. y *Gigaspora* sp., sugiere que estos géneros son predominantes en el área estudiada, lo cual puede tener implicaciones importantes para la salud del suelo y la productividad de los ecosistemas en los que habitan. Por otro lado, las correlaciones parciales observadas entre los laboratorios ( $r = 0.76$  a  $0.82$ ) subrayan la importancia de la colaboración y la compuesta multidisciplinaria en la investigación micológica, permitiendo obtener información clara de la composición del suelo en términos de HMA.

#### **10.7. Determinación de la Diversidad de géneros de HMA**

Con los resultados obtenidos se puede apreciar que los tres géneros identificados tienen presencia en todos los estratos, excepto en el estrato III, en el cual no se identificó ninguna espora del género *Glomus* sp., a diferencia de los restantes en los cuales presentó una mayor proporción de esporas, esto conlleva, a valorizar los índices de diversidad de Simpson, los cuales se encuentran en un rango de 0.37 a 0.67 en los estratos, estos muestran variabilidad en la diversidad de especies.

El índice más alto que corresponde al estrato III indica que el género *Gigaspora* sp., es dominante en ese estrato, a diferencia de los estratos I, II, IV y V, que muestran mayor diversidad de los géneros encontrados. De manera general, se observa un índice de 0.37 en



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

todos los estratos, lo cual refleja mayor diversidad de hongos micorrízicos, lo que puede influir en la salud y funcionalidad del ecosistema del suelo. Estratos con mayor diversidad pueden tener mejor capacidad de adaptación y resistencia.

#### **10.8. Géneros de esporas de HMA identificadas**

Las especies identificadas (*Glomus* sp., *Gigaspora* sp. y *Acaulospora* sp.) representan grupos clave en la comunidad de HMA, cada uno contribuyendo de manera única a la salud del ecosistema y a la productividad de los cultivos. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Ritaqwin y Maulana (2021), donde identificaron hongos micorrízicos arbusculares en el cultivo de palma de aceite, establecido en la provincia de Aceh, Indonesia; teniendo como resultados los géneros predominantes de: *Glomus* sp., *Acaulospora* sp. y *Gigaspora* sp. en cultivo trampa.

La presencia del género *Glomus* sp., conocido por su capacidad para formar simbiosis con una gran variedad de plantas, sugiere una potencial alta eficiencia que permite el desarrollo radicular y protege a las plantas de algunas enfermedades fúngicas. Esto se traduce en incrementos en la producción agrícola, reduce los costos relacionados con la aplicación de fertilizantes y una mayor absorción de agua y nutrientes del suelo, como P, K, N, Cu, Zn, B (Minerales Exclusivos, 2021; citado por Fonseca y Calderón-Ricardo, 2021).

Además, *Glomus* sp., produce enzimas que interactúan con los compuestos químicos del suelo aumentando su solubilidad y facilitando su absorción por las plantas. Esta característica resulta beneficiosa en suelos de palma de aceite, donde los nutrientes a menudo son limitados (Flores, 2016).

Las esporas de *Glomus* sp., se producen cerca de la superficie del suelo y se encuentra formada en esporocarpos, las cuales pueden tener un peridio parcial o completo, o bien, aparecen como esporas individuales o en racimos. Estas esporas, que pueden o no presentar oclusiones debido al engrosamiento de la hifa que las sostiene. Las esporas glomoides suelen ser considerablemente grandes (según INVAM, 2021) y pueden tener paredes que son persistentes y coloridas. Algunas de estas esporas grandes y oscuras pueden sobrevivir en el suelo durante años, incluso después de que el organismo haya muerto. La mayoría de las esporas fúngicas grandes, ya sean esféricas u ovoides, son mantenidas por una hifa y se pueden hallar en el registro fósil (Walker et al., 2018).

Por otro lado, el género *Gigaspora* sp. se asocia comúnmente con suelos bien estructurados y ricos en nutrientes, lo que indica un entorno favorable para la actividad biológica. Su identificación, así como los demás géneros encontrados, sugiere un potencial para mejorar la calidad del suelo y promover un mayor crecimiento de las plantas.

Las esporas del género *Gigaspora* sp., se desarrollan inicialmente a partir de un pequeño bulbo que se expande para formar un propágulo más grande. También se pueden encontrar esporas con pequeños bulbos en las hifas subyacentes del sílex de Rhyne. Aunque en los



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

hongos modernos estas esporas suelen ser fácilmente identificables, pueden ser menos frecuentes que los ejemplos típicos. En algunas ocasiones, la base bulbosa no se forma completamente, lo que hace que las esporas adquieran una apariencia glomoide (Walker et al., 2018).

El caso del género *Acaulospora* sp. se caracteriza por su capacidad de resistencia a diversos estreses abióticos, lo que sugiere un notable potencial biotecnológico para su aplicación en actividades agrícolas. Estas especies son capaces de desarrollarse en suelos contaminados y en condiciones extremas, como las que se presentan en suelos salinos. Este rasgo subraya la adaptabilidad de *Acaulospora* sp., y su potencial utilidad en la rehabilitación de suelos degradados, así como en la mejora de la productividad agrícola en ambientes adversos (Da Silva et al., 2022).

La identificación de estas especies de HMA es significativa, ya que estos hongos juegan un papel crucial en la simbiosis, facilitando la absorción de agua y nutrientes, en particular fósforo y nitrógeno, lo que es esencial para la salud de las plantas de palma de aceite.

Además, las interacciones entre estos hongos y las raíces de la palma pueden contribuir a mejorar la resiliencia del cultivo frente a estrés hídrico y enfermedades, factores críticos en el manejo sostenible de la palma de aceite.

Estudios realizados han demostrado la presencia de hongos micorrízicos arbusculares en asociación simbiótica con la palma de aceite, dominando los géneros *Glomus* sp. y *Acaulospora* sp. (Bernal, 2006; Galindo y Romero, 2010). Los HMA mejoran la absorción de nutrientes por las raíces, permitiendo una menor aplicación de fertilizantes químicos (Corley & Tinker, 2003; Galindo y Romero, 2010).

Las esporas del género *Acaulospora* sp., inicialmente forma un sáculo blástico al final de una hifa. Dentro de este sáculo, se forma un propágulo robusto de paredes gruesas, ya sea lateral o terminal y finalmente, el propágulo se desprende. En la mayoría de los casos, debido a su delicadeza, queda poco o ningún rastro del sáculo, excepto, a menudo, como un componente aparente de la pared que rodea la espora. Otro aspecto relevante a destacar es que algunos de estos géneros, a pesar de tener nombres diferentes, son difíciles o incluso imposibles de distinguir únicamente a partir de la evidencia morfológica (Dalpé y Declerck, 2002; citado por Walker et al., 2018).

Los resultados destacan la importancia de considerar la diversidad de HMA en el desarrollo de prácticas agronómicas sostenibles. Fomentar la diversidad microbiana mediante prácticas como la rotación de cultivos, la inclusión de cultivos trampa y la aplicación de enmiendas orgánicas podría potenciar la riqueza de estas comunidades.

### **11. Propiedad intelectual**

Debido a la naturaleza de los hallazgos y productos obtenidos en la investigación, se estableció la siguiente estrategia de protección intelectual:



### Informe final de Proyecto de Investigación

*Derechos de autor:* Todos los contenidos originales generados, como manual, publicaciones, conferencias nacionales e internacionales, material audiovisual, entre otros, quedan protegidos bajo esta figura, citando debidamente la fuente de origen.

*Confidencialidad de información:* Los avances de los resultados fueron manejados con estricta privacidad y fueron publicados al momento de constatar la validez y confiabilidad científica, asimismo, con la previa autorización de la empresa REPSA, S.A.

Esta estrategia busca posicionar los hallazgos de la investigación en el mercado científico y tecnológico, resguardando los intereses de quienes financian el proyecto y todos los involucrados en la misma.

## 12. Beneficiarios directos e indirectos

**Tabla 6**

Beneficiarios directos e indirectos de la investigación.

Resultados, productos o hallazgos	Beneficiarios directos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de Beneficiarios indirectos
Informe técnico de los resultados nutricionales del suelo y recomendaciones generales para la comunidad apoyando la toma de decisiones.	Empresarios de palma de aceite de la comunidad Santa Rosa, Sayaxché, Petén.	15 a 20	Fincas vecinas y productores de la región de Sayaxché, Petén.	350
Manual ilustrado sobre géneros de hongos micorrízicos arbusculares más comunes, con aspectos relevantes para su identificación e importancia agronómica.	Empresarios de palma de aceite y comunitarios de Santa Rosa, Sayaxché, Petén.	25 a 30	Fincas vecinas, empresas y productores de la región de Sayaxché, Petén. Investigadores del suelo. Profesionales de nutrición vegetal. Profesores y estudiantes de carreras afines.	500
Charla/taller práctico de demostración en laboratorio sobre la	Empresarios y productores de palma de aceite de la		Fincas vecinas, empresarios y productores de la	



### Informe final de Proyecto de Investigación

Resultados, productos o hallazgos	Beneficiarios directos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de Beneficiarios indirectos
producción de hongos micorrízicos arbusculares aislados en cultivo de palma de aceite a 20 comunitarios y empresarios de la región.	comunidad Santa Rosa, Sayaxché, Petén.	20	región de Sayaxché, Petén. Investigadores del suelo. Profesionales de nutrición vegetal. Profesores y estudiantes de carreras afines.	100

### 13. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.

**Tabla 7**

Estrategias de divulgación y difusión.

Actividades	Si	No
Presentación TV		X
Entrevistas radiales		X
Podcast		X
Entrevista DIGI		X
Recursos audiovisuales		X
Congresos científicos nacionales o internacionales (Apéndice G)	X	
Talleres	X	
Publicación de libro		X
Publicación de artículo científico	X	
Divulgación por redes sociales institucionales (Apéndice I)	X	
Presentación pública (Apéndice j)	X	
Presentación autoridades USAC (Apéndice j)	X	
Presentación a beneficiarios directos (Apéndice k)	X	
Entrega de resultados	X	
Docencia en grado		X
Docencia postgrado		X
Póster científico		X



### Informe final de Proyecto de Investigación

Actividades	Si	No
Trifoliales		X
Conferencias (Apéndice j)	X	
Otro (describa)		X

Nota. La publicación del artículo científico se encuentra en proceso. La entrega de resultados se realizará al tener aprobado del informe final.

#### 14. Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND)

*Desarrollo agropecuario sostenible e innovación tecnológica:*

- Promueve un modelo de agricultura productivo que fortalece la biodiversidad de los suelos y reduce el uso de insumos externos.
- Genera alternativas biotecnológicas para la nutrición de cultivos a través de simbiosis de agentes benéficos.

*Protección del medio ambiente:*

- Aporta herramientas de manejo edáfico que conservan los servicios ecosistémicos del suelo.
- Promueve sistemas de producción resilientes y de bajo impacto ambiental.
- Mejorar la captura de carbono en el suelo.
- Mitigación al cambio climático.

*Descentralización y desarrollo territorial:*

- Permite impartir capacitaciones tecnológicas a empresarios y grupos locales de comunitarios influenciados por el cultivo.
- Acerca conocimientos científicos a las comunidades rurales.

#### 15. Otras contribuciones del proyecto al desarrollo

No aplica.

#### 16. Vinculación

Entre los principales actores que fueron presentados y discutidos los resultados de la investigación, así como. La vinculación de colaboración interinstitucional se encuentra:

- Grupo empresarial HAME [Reforestadora de Palmas del Petén, S.A. (REPSA)]: empresa que permitió la ejecución del proyecto de investigación en plantaciones de palma de aceite en jurisdicción del caserío Santa Rosa, Sayaxché, Petén Guatemala.



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA): Institución rectora de la política agropecuaria nacional, con la colaboración de algunos materiales y equipo para poder llevar a cabo la presente investigación.
- Instituto de Ciencia y tecnología Agrícola (ICTA): Promueve la innovación e investigación en el departamento de Petén.
- Municipalidades de la región con producción de palma aceitera: Fortalecen las capacidades locales de pequeños, medianos y grandes empresarios.
- ONGs ambientales: Comparten resultados de interés en conservación de suelos y biodiversidad. Como actividad, se realizarán presentaciones y mesas de discusión para evaluar oportunidades de articulación, transferencia y réplica de los avances obtenidos.
- Estudiantes universitarios de agronomía y ciencias a fines.
- Tecnológico Nacional de México/Campus Zona Olmeca: Institución académica, que abrió sus puertas para la validación de los géneros de HMA extraídos de la rizosfera de palma de aceite.
- Laboratorio de Diagnostico, Investigación y Tecnología Agro-expertos, Guatemala: Laboratorio localizado en la ciudad capital, que colaboró en la identificación y caracterización de las micrografías digitales enviadas sobre HMA, como proceso de la validación de los géneros.

### **17. Conclusiones**

1. El análisis de suelo en la comunidad de Santa Rosa, Sayaxché, Petén reveló bajos niveles de fósforo. Esta deficiencia se relacionó con un aumento en la cantidad de esporas de hongos micorrízicos arbusculares en el suelo. Los resultados sugieren una respuesta adaptativa positiva de estos hongos ante la limitación de fósforo. En contraste, se detectaron altos niveles de calcio y magnesio. Estas concentraciones elevadas podrían ejercer efectos tóxicos sobre la biota del suelo. Los hallazgos evidencian la necesidad de un manejo equilibrado de nutrientes para optimizar la salud y funcionalidad del suelo en cultivos de palma aceitera.
2. Se aislaron 497 estructuras micorrízicas (hifas, arbusculos y vesículas) en raíces de *Elaeis guineensis*. En las plantas trampa de maíz (*Zea mays* L) se identificaron 648 estructuras. Además, se cuantificaron 542 esporas de hongos micorrízicos arbusculares del suelo en el caserío Santa Rosa, obteniéndose un índice de Simpson (0.37) el cual indica una diversidad moderada de hongos micorrízicos arbusculares en el área de estudio. El género *Glomus* sp. predominó en la mayoría de los estratos evaluados. Sin embargo, la presencia de *Acaulospora* sp. y *Gigaspora* sp. enriquece la diversidad del ecosistema microbiano. Estos resultados subrayan la importancia de conservar la



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

diversidad de hongos micorrízicos nativos. La variabilidad genética y funcional de estos microorganismos favorece la resiliencia del suelo y su capacidad de adaptación a condiciones ambientales cambiantes.

3. El análisis morfológico de esporas permitió identificar tres géneros de hongos micorrízicos arbusculares nativos en la rizosfera de palma de aceite: *Glomus sp.*, *Acaulospora sp.* y *Gigaspora sp.* Esta identificación valida la hipótesis planteada en la investigación. Los tres géneros identificados son reconocidos por su papel en la formación de simbiosis micorrízicas. Estas asociaciones contribuyen a mejorar la absorción de nutrientes y la salud del suelo en agroecosistemas tropicales.
4. En el estudio se buscó cuantificar la abundancia y diversidad de propágulos de hongos micorrízicos arbusculares. Los resultados obtenidos en las plantas trampa de maíz evidencian que los porcentajes de colonización micorrízica oscilaron entre 46.4% y 61.2%. Estos valores no solo reflejan un nivel de infectividad alto, sino también subrayan la efectividad del método de cultivos trampa en condiciones controladas, lo cual sugiere que la rizosfera presenta un ambiente propicio para el establecimiento de hongos micorrízicos arbusculares nativos de suelos cultivados con palma de aceite.
5. La transferencia de conocimiento y técnicas a empresarios y comunitarios en Santa Rosa, Sayaxché, Petén fue exitosa. Los participantes adquirieron capacidades para producir hongos micorrízicos arbusculares bajo condiciones controladas utilizando cultivos trampa. Este proceso fortaleció las capacidades locales en biotecnología agrícola. Los participantes aumentaron su comprensión sobre la importancia de los hongos micorrízicos para la salud del suelo y la productividad de la palma aceitera. La integración de estas técnicas promueve prácticas agrícolas sostenibles y la conservación de la biodiversidad microbiana en la región.

### **18. Recomendaciones**

1. Se recomienda que los productores utilicen el suelo enriquecido con hongos micorrízicos arbusculares como biofertilizante. La aplicación debe realizarse en las fases de previvero y vivero de plántulas de palma de aceite. Los porcentajes de infectividad obtenidos (46.4% a 61.2%) respaldan esta recomendación. El uso de suelo inoculado facilitará la colonización temprana de las raíces con esporas nativas. Esta estrategia mejorará la capacidad de las plántulas para absorber nutrientes y optimizará su crecimiento inicial en campo.
2. Se recomienda desarrollar protocolos estandarizados de extracción e inoculación para los géneros *Glomus sp.*, *Acaulospora sp.* y *Gigaspora sp.* Estos protocolos deben maximizar la efectividad de los hongos micorrízicos en la rizosfera de palma aceitera. Las investigaciones futuras deben evaluar diferentes concentraciones de inóculos,



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

métodos de aplicación (vivero, sustratos, campo, otros) y condiciones ambientales, estos estudios determinarán las prácticas óptimas para mejorar la salud del suelo y la productividad agrícola de manera sostenible.

3. Se recomienda Implementar un programa de monitoreo a largo plazo para evaluar la diversidad y la dinámica de las comunidades de hongos micorrícicos en la rizosfera de la palma de aceite. Esto puede incluir la recolección periódica de muestras de suelo y rizosfera, junto con análisis moleculares avanzados, como la secuenciación de ADN. Este monitoreo permitirá identificar el impacto de diferentes prácticas de manejo agrícola y condiciones ambientales sobre la diversidad micorrízica. Los resultados orientarán la toma de decisiones para la conservación de hongos micorrícicos nativos.
4. Se recomienda realizar investigaciones complementarias sobre los mecanismos mediante los cuales las asociaciones micorrízicas mejoran la absorción de macro y micro-nutrientes, y resistencia a estreses bióticos, tolerancia a estrés abióticos, efectos sobre rendimiento y calidad de aceite. Se sugiere realizar ensayos en condiciones controladas (invernadero) y en campo abierto. Estos experimentos evaluarán el impacto de los hongos micorrícicos sobre el rendimiento de los cultivos, la salud del suelo y la sostenibilidad del ecosistema agrícola a largo plazo.

### **Referencias**

- Aviles, G. J. (2022). Importancia de los microorganismos en suelos cultivados con palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq) en el Ecuador (*Bachelor's thesis*, BABAHOYO: UTB, 2022).
- Bernal, G. (2006). Micorrizas: Importancia, Producción e investigación en el Ecuador. Centro de Publicaciones Massgráficos. Quito. Ecuador.
- Blanco, F., y Salas, E. (1997). Micorrizas en la agricultura: contexto mundial e investigación realizada en Costa Rica. *Agronomía costarricense*, 21(1), 55-67. <https://www.exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Micorrizas%20y%20nutricion%20mineral.pdf>
- Bolaños, M. M., Rivillas-Osorio, C. A. y Suárez-Vásquez, (2000). Identificación de micorrizas arbusculares en suelos de la zona cafetalera colombiana, *Cenicafe* 51(4):245-262.2000.
- Brechelt, A. (2004). Manejo ecológico del suelo. *Fundación Agricultura y Medio Ambiente*. Red de acción de Plaguicidas y sus alternativas para América Latina.



### Informe final de Proyecto de Investigación

[https://bizibaratzea.eus/storage/liburutegia/dokumentuak/manejo\\_ecologico\\_del\\_suelo.pdf](https://bizibaratzea.eus/storage/liburutegia/dokumentuak/manejo_ecologico_del_suelo.pdf)

- Canchani, A., Espailat, R. & López, J. (2018). El efecto y la aportación de la micorriza en el desarrollo de cultivos agrícolas. *Perspectivas en asuntos ambientales*. Vol. 6, págs 34-42.
- Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S., & Cruz-Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta botánica mexicana*, (129).
- Castellanos, J. Z. (2010). Guía para la interpretación del análisis de suelo y agua. Sitio: [intagri.intagri.com.mx](http://intagri.intagri.com.mx) o [www.intagri.com.mx](http://www.intagri.com.mx), 8-10.
- Cervantes-Gómez, R. G., Peñuelas-Rubio, O., Araujo-Benard, N., Fierro-Coronado, R.A., Trejo-Aguilar, D., Maldonado-Mendoza, I.E. y Cordero-Ramírez, J.E. (2021). Diversidad de hongos micorrízicos arbusculares asociados a plantas voluntarias de maíz en suelos de transición: ecosistema natural - uso agrícola. *SCIENTIAFUNGORUM*. DOI: 10.33885/sf.2021.51.1330. Vol. 51:e1330. Sinaloa, México.
- Corley, R.H.V. & Tinker, P.B. (2003). *The Oil Palm*. Fourth Edition Blackwell Science. 338-339 p.
- Covacevich, F., y Consolo, V.F. (2014). Herramientas para el estudio y manipulación de hongos micorrícicos Arbusculares y Trichoderma. Manual de protocolos, herramientas para el estudio y manipulación de Hongos Micorrícicos Arbusculares y *Trichoderma*. Consolo. - 1a ed. - Mar del Plata: Universidad Nacional de Mar del Plata, 2014. 115 p. ISBN 978-987-544-606-9. CDD 571.592.
- Cristancho, J., Munévar, F., Acosta, A., Santacruz, L. & Torres, M. (2007). Relación de las características edáficas y el desarrollo del sistema de raíces de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq). *PALMAS* Vol. 28 No. 1, págs. 21 – 29.
- Cuenca, G., Cáceres, A., Oirdobro, G., Hasmy, Z., y Urdaneta, C. (2007). Las micorrizas arbusculares como alternativa para una agricultura sustentable en áreas tropicales. *Interciencia*, 32(1), 23–29.
- Da Silva, J. G., Fernandes, A. L., Franco M., Larissa B. A., Bruno T., y Theodoro, R. C. (2022). Phylogenetic Review of Acaulospora (Diversisporales, Glomeromycota) and the Homoplastic Nature of Its Ornamentations. *Journal of Fungi*.
- Dalpé, Y. y Declerck, S., (2002). Development of Acaulospora rehmsii spore and hyphal swellings under root-organ culture. *Mycologia* 94, 850e855.



### Informe final de Proyecto de Investigación

- DIGEGR, (2020). Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgos. Determinación de la cobertura vegetal y uso de la tierra a escala 1:50,000 de la República de Guatemala, año 2020. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. [http://www.maga.gob.gt/downloads/dgegr/2020/Cobertura\\_Vegetal\\_Uso\\_de\\_la\\_Tierra\\_1-50k\\_2020.pdf](http://www.maga.gob.gt/downloads/dgegr/2020/Cobertura_Vegetal_Uso_de_la_Tierra_1-50k_2020.pdf)
- FAO (2020). FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- FAO (2024). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/home/es/>
- FAO. (2008). Aumenta la degradación del suelo. Un cuarto de la población mundial está afectada, según un nuevo estudio. FAO Sala de prensa. <<http://www.fao.org/newsroom/news/2008/1000874>>
- Flores, L. E. (2016). Inducción de *glomus intraradices* en medio de células vegetales en suspensión. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Biológicas. Tesis Doctoral. <http://eprints.uanl.mx/13698/1/1080238063.pdf>
- Fonseca D. K. y Calderón-Ricardo C. A. (2021). Efecto del producto biofertmex (*Glomus* sp) en el desarrollo y producción de un cultivo de espinaca (*Spinacia oleracea*) en Zapaquirá, Cundinamarca. Revista Ciencias Agropecuarias 7(2): 45-58 p.
- Frioni, L. (2005). Microbiología básica, ambiental y agrícola. Montevideo: Departamento de publicaciones de la universidad de la república oriental de Uruguay.
- Galindo, T. & Romero, H.M. (2010), Microbiología del suelo cultivado con palma. Palmas, 31(2), 49–60.
- García, M. & Núñez (2003). Medidas de asociación por células para datos categóricos: homogeneidad, equilibrio y uniformidad. Revista de planificación e inferencia estadística, 117 (2), 253-275. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0378-3758\(02\)00354-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3758(02)00354-6)
- Garza, J.M., Marroquín, F.J., Lerma, J.N., Ley de-Coss, A., Toledo, E., Martínez, M., Villalobos, V. y Aguirre, J.F. (2016). Biofertilizante micorrízico y fertilizante mineral en el crecimiento de *Elaeis guineensis* Jacq en vivero. Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ciencias Agrícolas, Huehuetan, Chiapas, México. Vol. 9. Num. 2, pp. 26-32.
- Gerderman, J; Nicholson, T. (1963). Spores of mycorrhizal endogene species extracted from soil by wet sieving and decanting.
- Gómez, J. F. y Hernández, L. V. (2023). Manual de prácticas para el estudio de la simbiosis micorrízica. Identificación y aplicación de los hongos micorrízicos arbusculares en



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

el trópico húmedo. Facultad Maya de Estudios Agropecuarios. Instituto Tecnológico de Tlajomulco. Universidad Autónoma de Chiapas. México. 01-34 p.

- GREPALMA, (2020). Gremial de Palmicultores de Guatemala. El sector de palma de aceite de Guatemala y sus aportes para la mitigación al cambio climático. Agroindustria sostenible de Aceite de Palma en Guatemala. [https://www.grepalma.org/wp-content/uploads/2020/07/Folleto-Palma-y-mitigacion-al-Cambio-Climatico\\_002.pdf](https://www.grepalma.org/wp-content/uploads/2020/07/Folleto-Palma-y-mitigacion-al-Cambio-Climatico_002.pdf)
- GREPALMA, (2021). Gremial de Palmicultores de Guatemala. Estadísticas socioeconómicas al año 2021. Agroindustria sostenible de Aceite de Palma en Guatemala. <https://www.grepalma.org/wp-content/uploads/2022/05/Anuario-Estadistico-2020-2021-22-5-2022.pdf>
- GREPALMA, (2023). Gremial de Palmicultores de Guatemala. Estadísticas socioeconómicas al año 2023. Estadísticas Socioeconomicas al año 2023. Agroindustria sostenible de Aceite de Palma en Guatemala. <https://www.grepalma.org/wp-content/uploads/2024/05/Estadisticas-socioeconomicas-anio-2023.pdf>
- Guzmán-González, S. & Farías-Larios, J. (2005). Biología y regulación molecular de la micorriza arbuscular. *Avances En Investigación Agropecuaria*, 9(2), 17–31.
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6ta ed.) [E-book]. McGraw-Hill Interamericana.
- Hooper, D. J., Hallmann, J., & Subbotin, S. (2005). Methods for extraction, processing and detection of plant and soil nematodes. In: Luc, M., Sikora, R. A., & Bridge, J. (Eds.), *Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture* (pp. 53–86). CABI Publishing.
- InfoStat (2008). InfoStat, versión 2008. Manual del Usuario. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Primera Edición, Editorial Brujas Argentina. [https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/51/manual\\_infostat\\_esp.pdf](https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/51/manual_infostat_esp.pdf)
- INVAM (2021). The International Collection of Vesicular Arbuscular Mycorrhizal Fungi. The University of Kansas. Kansas Biological Survey & Center for Ecological Research. Higuchi Hall. 2101 Constant Ave. Lawrence, KS 66047. <https://invam.ku.edu/>.
- López, R. M. y Montalvo, O. C. (2019). Caracterización de micorrizas arbustivas en diferentes materiales genéticos de palma aceitera, concordia -ecuador-. *Revista Científica Ecuatoriana*. Vol 6. DOI: <https://doi.org/10.36331/revista.v6i1.68>.



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

- MAGA (2020). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala. Determinación de la cobertura vegetal y uso de la tierra a escala 1:50,000 de la República de Guatemala, año 2020. <http://www.maga.gob.gt/>
- MAGA (2024). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala. Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgos (DIGEGR). Centro de Información Estratégica Agropecuaria. Estudios de Suelos de Guatemala. <https://www.maga.gob.gt/download/informe16-24.pdf>
- Magaña, S. A., y Vidal, V. V. (2022). Impacto de la palma de aceite en México en el ámbito: económico. Publicaciones e investigación, 16(3). <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/publicaciones-e-investigacion/article/view/6604>
- Minerales Exclusivos. Biofert-mex en suspensión. Bogotá 2021. Disponible en <https://mineralesexclusivos.com/biofert-mex-suspension>.
- Mendoza, Z. A. (2013). Guía de métodos para medir la biodiversidad. Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. Carrera de Ingeniería Forestal, Universidad Nacional de Loja. Loja-Ecuador, 37(6), 82. <https://zhofreaguirre.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/03/guia-para-medicic3b3n-de-la-biodiversidad-octubre-7-2011.pdf>
- Mohamed, S. F., Asran, G.A., Mphamed, A.M. y Li. (2018). Diversity and colonization of arbuscular mycorrhizal fungi in organic and conventional oil palm plantations. European Journal of Soil Biology, 86, 98-103. [https://www.researchgate.net/publication/377394953\\_Arbuscular\\_Mycorrhizal\\_Fungi\\_in\\_Organic\\_Versus\\_Conventional\\_Farming](https://www.researchgate.net/publication/377394953_Arbuscular_Mycorrhizal_Fungi_in_Organic_Versus_Conventional_Farming)
- Motta V., D. F., & Munévar M., F. (2005). Respuesta de plántulas de palma de aceite a la micorrización. Palmas, 26(3), 11–20. Recuperado a partir de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1136>.
- Munévar, F. (2001). Fertilización de la palma de aceite para obtener altos rendimientos. Revista Palmas. Vol. 22 No. 4, 2001.
- Nardini, C., Di Salvo, L., García, I. (2011). Micorrizas arbusculares: asociaciones simbióticas e indicadores de calidad ambiental en sistemas de cultivos extensivos. Revista Argentina de Microbiología, vol. 43, núm. 4, p. 311 Asociación Argentina de Microbiología Buenos Aires, Argentina.
- OCDE, (2015). Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos. Manual de Frascati 2015. Guía para la recopilación y presentación de información sobre la investigación y el desarrollo experimental. Medición de las actividades científicas, tecnológicas y de innovación. Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, FECYT, 2018.



### Informe final de Proyecto de Investigación

- Ortega, J. G., Lucio, A. V., Ganchozo, B. I., Piguave, C. C., Tumbaco, M. V., Cobeña, J. A., & Velásquez, R. V. (2021). Diseños experimentales: Teoría y práctica para experimentos agropecuarios (2nd ed.). Universidad Estatal Del Sur de Manabi (UNESUM). Grupo de Capacitación e Investigación Pedagógica (COMPAS). <http://142.93.18.15:8080/jspui/handle/123456789/625>
- Paramanathan, S. (2003). Land Selection for Oil Palm. In: Fairhurst, T. and Hardter, R. (eds.) The Oil Palm. Management for Large and Sustainable Yields. Potash & Phosphate Institute, International Potash Institute, Singapore, pp. 27-57.
- Paredes, Y. J. (2019). Comportamiento agronómico de plántulas de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq) En simbiosis con microorganismos eficientes del suelo (Bachelor's thesis, Babahoyo: UTB, 2019). <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/6143>
- Paredes, Y. J. (2019). Comportamiento agronómico de plántulas de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq) En simbiosis con microorganismos eficientes del suelo (Bachelor's thesis, Babahoyo: UTB, 2019). <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/6143>
- Porras, A. (2017). Tipos de muestreo. Diplomado en Análisis de Información Geoespacial. Centro Público de Investigación CENTROGEO, CONACYT. Derechos Reservados. Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo", A.C. México.
- Posada, R. (2001). Presencia de propágulos de hongos de micorriza arbuscular en muestras de hojarasca alrededor de dos especies arbóreas en un bosque húmedo tropical. Acta biológica, 47-55.
- Ramírez, A.C., Symanczik, S., Gallusser, T. y Bodenhausen, N. (2023). Quantification of arbuscular mycorrhizal fungi root colonization in wheat, tomato, and leek using absolute qPCR. Mycorrhiza (2023) 33:387–397. <https://doi.org/10.1007/s00572-023-01122-8>.
- Ramos-Alegría y Velázquez-Gurrola (2015). Beneficios de microorganismos solubilizadores de P y K en la recuperación y mantenimiento de suelos agrícolas. Applied Biotechnology South America, S.A. de C.V., México. <https://www.studocu.com/gt/u/73086762?sid=01764902160&page=1>
- Restrepo Giraldo, K. J., Montoya Correa, M. I., Henao Jaramillo, P., Gutiérrez, L. A., & Molina Guzmán, L. P. (2019). Caracterización de hongos micorrízicos arbusculares de suelos ganaderos del trópico alto y trópico bajo en Antioquia, Colombia. *Idesia (Arica)*, 37(1), 35-44.
- Rini, M. V., Irvanto, D., & Ardiyanto, A. (2023). Study of Arbuscular Mycorrhizal Fungi population in the rhizosphere of oil palm planted on 4 different soil types in Central



### Informe final de Proyecto de Investigación

- Kalimantan Indonesia. In E3S Web of Conferences (Vol. 373, p. 06005). EDP Sciences.
- Ritaqwin, Z. R., & Maulana, M. (2021). Identification of Arbuscular Mychorizae Fungi on Oil Palm in Bireuen, Aceh: Identification of Arbuscular Mychorizae Fungi on Oil Palm in Bireuen, Aceh. *SEAS (Sustainable Environment Agricultural Science)*, 5(2), 114-121.
- Rivera, Y. D., Galindo, T., Caicedo, A. F., Navia, E. A. y Romero, H. M. (2014). Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) en palma de aceite. *Boletín Técnico No. 35. Centro de Investigación de Palma de Aceite, Cenipalma. Bogotá, Colombia.*
- Rodas, A., Monterroso, I. y Stoian, D. (2021). Dinámicas productivas en torno al cambio de uso del suelo y sus repercusiones en la Reserva de Biósfera Maya (RBM) en Petén, Guatemala. Working Paper 1. Bogor, Indonesia: Centro para la Investigación Forestal Internacional (CIFOR); y Nairobi, Kenia: Centro Internacional de Investigación Agroforestal (ICRAF).
- Salmerón-Santiago, I.A., Pedraza-Santos, M.E., Mendoza-Oviedo, L.S. y Chávez-Bárceñas, A.T. (2015). Cronología de la taxonomía y cladística de los glomeromicetos. *Revista Fitotecnia. Mexico. Vol. 38 (2): 153 – 163.*  
<https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v38n2/v38n2a5.pdf>.
- Sánchez, J. A. (2023). Interacción entre manejo agrícola y nivel de degradación como determinantes de la biota y funcionamiento de suelo. <https://rua.ua.es/server/api/core/bitstreams/281fed14-4b49-4f28-92f6-9f5f9b70c190/content>
- Sánchez, M., Castillo, M., Zabala, F., Sanchez, D., & Vargas, N. (2009). La Micorriza Arbuscular (MA) como Componente de Estabilidad en los Agroecosistemas. *Revista brasilera de agroecologia*, 4324-4327.
- Schalamuk, S., Druille, M., & Cabello, M. (2013). Hongos formadores de micorrizas arbusculares: Influencia de las prácticas agronómicas sobre su diversidad y dinámica de colonización. *Rizósfera, Biodiversidad y Agricultura Sustentable*, 47-71.
- Sembiring, M., Jefri, J., Sakiah, S., & Wahyuni, M. (2018). The inoculation of mycorrhiza and *Talaromyces pinophilus* toward the improvement in growth and phosphorus uptake of oil palm seedlings (*Elaeis guineensis* Jacq) on saline soil media.
- Shahidan, S., Yusof, R. M., Ruslan, N., Hasli, M. A., Amirulhakim, M., & Fadzli, N. M. (2023). Effect of Different Mycorrhiza Treatments on Spore Counts in Oil Palm Topsoil. *Journal of Sustainable Natural Resources*, 4(2), 52-56.



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

- Sharma, D., Kapoor, R., & Bhatnagar, A. K. (2009). Differential growth response of *Curculigo orchioides* to native arbuscular mycorrhizal fungal (AMF) communities varying in number and fungal components. *European Journal of Soil Biology*, 45(4), 328-333.
- Soto, J. E., Pinto, J. E., & Millán, E. E. (2022). Micorrizas arbusculares y las técnicas de visión artificial para su identificación. *TecnoLógicas*, 25(54).[http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-77992022000200302&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-77992022000200302&script=sci_arttext)
- Villareal, H. M., Álvarez, S., Córdoba, F., Escobar, G., Fagua, F., Gast, H., Mendoza, M., Ospina y Umaña, A. M. (2006). Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad. Segunda edición. Programa de Inventarios de Biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. Bogotá, Colombia. 236 p.
- Walker, C., Harper, C.J., Brundrett, M.C. y Krings, M. (2018). Looking for Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Fossil Record: An Illustrated Guide. *Transformative Paleobotany Papers to Commemorate the Life and Legacy of Thomas N. Taylor*. doi.org/10.1016/B978-0-12-813012-4.00020-6. 481-517 p.
- Westfall, P. H. y Henning, K. S. (2013). *Comprender los métodos estadísticos avanzados*. Chapman y Hall/CRC.

## Informe final de Proyecto de Investigación

### Apéndice

#### Apéndice A. Caracterización visual de estratos.

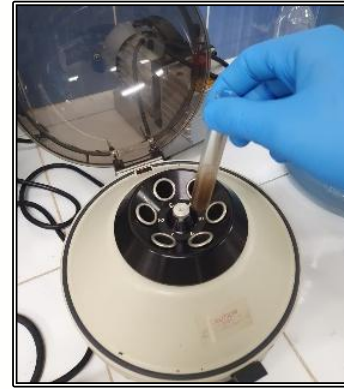


#### Apéndice B. Muestreo de suelos en caserío Santa Rosa, Sayaxché Petén.



## Informe final de Proyecto de Investigación

### Apéndice C. Fase de laboratorio (Procesamiento de las muestras).



## Informe final de Proyecto de Investigación

### Apéndice D. Esterilización de arena para plantas trampa.



### Apéndice E. Preparación de semillas y macetas.



### Apéndice F. Proceso de crecimiento de las plantas trampa de maíz (*Zea mays* L).

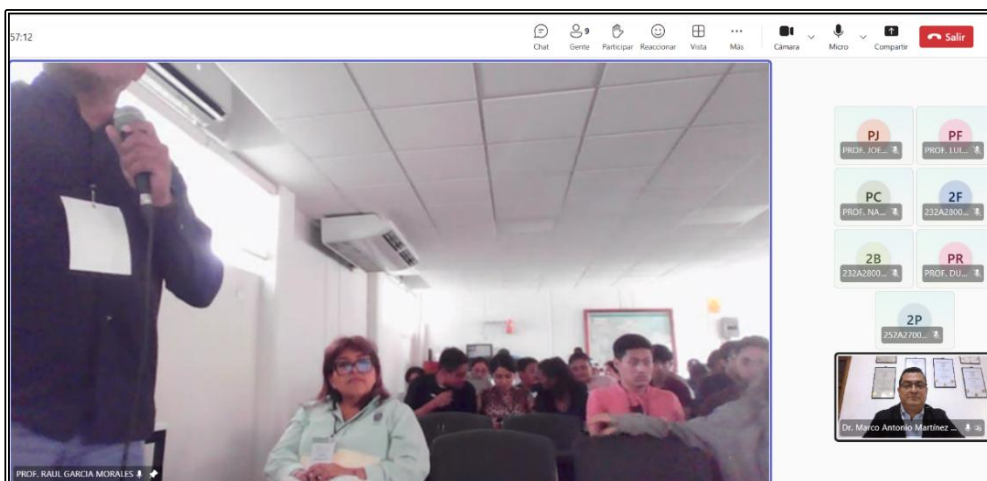




### Informe final de Proyecto de Investigación



### Apéndice G. Difusión y divulgación (Congreso en México).



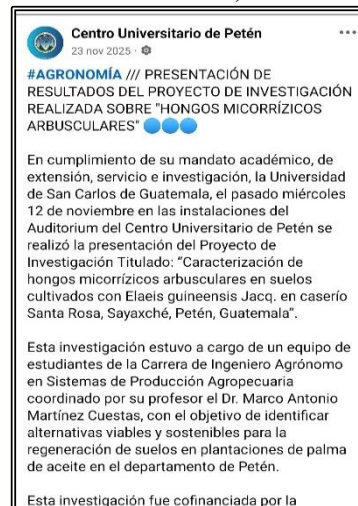
## Informe final de Proyecto de Investigación



### Apéndice H. Difusión y divulgación (taller en caserío Santa Rosa, Sayaxché).



### Apéndice I. Difusión y divulgación (Redes sociales del CUDEP).





### Informe final de Proyecto de Investigación

#### Apéndice j. Difusión y divulgación (Presentación pública y autoridades del CUDEP).

**CENTRO UNIVERSITARIO DE PETÉN**  
**CG-SEP**  
Coordinadora General  
Sistema de Estudios de Postgrado

**PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN TITULADO:**  
"Caracterización de hongos micorrízicos arbusculares en suelos cultivados con *Elaeis guineensis* Jacq. en caserío Santa Rosa, sayaxché, petén, guatemala"

**INVITA:**  
  
**Edy ROMERO**  
DIRECTOR  
Administración 2019-2020

**MIÉRCOLES**  
**12**  
**NOV. 2025**  
**19:00 Hrs**

Investigación cofinanciada por el Fondo de la Dirección General de Investigación (DIGI) de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Lugar: Auditorium del CUDEP

[www.centrouniversitariodepeten.com/eventos](http://www.centrouniversitariodepeten.com/eventos)



#### Apéndice k. Difusión y divulgación (Presentación a directivos de REPSA. S.A.).





## Informe final de Proyecto de Investigación

### Declaración del coordinador (a) del proyecto de investigación

El coordinador (a) de proyecto de investigación con base en el Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación, artículo 20, elaboró este informe en función de los datos recabados en el proyecto.

<b>Dr. Marco Antonio Martínez Cuestas</b>	<b>Firma</b>
Fecha: <b>08/01/2026</b>	

### Aval del director (a) del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 19 del Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación otorgo el aval al presente informe final de las actividades realizadas en el proyecto: “Caracterización de hongos micorrízicos arbusculares en suelos cultivados con *Elaeis guineensis* Jacq en el caserío Santa Rosa, Sayaxché, Petén, Guatemala” en mi calidad de Director del Centro Universitario de Petén, mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

### Declaración del coordinador (a) del proyecto de investigación

El coordinador (a) de proyecto de investigación con base en el Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación, artículo 20, elaboró este informe en función de los datos recabados en el proyecto.

<b>Dr. Marco Antonio Martínez Cuestas</b>	<b>Firma</b>
Fecha: <b>08/01/2026</b>	

### Aval del director (a) del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 19 del Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación otorgo el aval al presente informe final de las actividades realizadas en el proyecto: “Caracterización de hongos



### Informe final de Proyecto de Investigación

micorrízicos arbusculares en suelos cultivados con *Elaeis guineensis* Jacq en el caserío Santa Rosa, Sayaxché, Petén, Guatemala” en mi calidad de Director del Centro Universitario de Petén, mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

<b>M.A. José Rómulo Sánchez Polo</b> <b>Director del Centro Universitario de Petén a.i.</b>	<b>Firma</b>
Fecha: <b>08/01/2026</b>	

### Recepción de la Dirección General de Investigación

<b>Vo.Bo. MSc. Inga. Andrea Rodas Morán</b> <b>Programa Universitario de Investigación en recursos Naturales y Ambiente (PUIRNA)</b>	<b>Firma</b>
Fecha: <b>08/01/2026</b>	