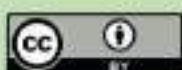




Esta obra está bajo una
[Licencia Creative Commons
Atribución - 4.0 Internacional \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
Vea una copia de esta licencia en
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>





FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA

Tesis

Características físico-químicas del suelo sobre el potencial simbiótico de hongos micorrízicos arbusculares en plántulas de *Coffea arabica* L., Tarapoto

Para optar el título profesional de Ingeniero Agrónomo

Autor:

Maycol German Orosco
<https://orcid.org/0000-0001-8068-485X>

Asesor:

Ing. M. Sc. Mike Anderson Corazon Guivin
<https://orcid.org/0000-0001-6027-4255>

Coasesor:

Ing. María Nelly Pezo Torres
<https://orcid.org/0000-0002-9584-2686>

Tarapoto, Perú

2024



FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA

Tesis



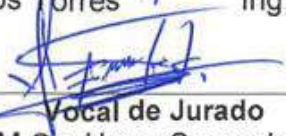

Características físico-químicas del suelo sobre el potencial simbiótico de hongos micorrízicos arbusculares en plántulas de *Coffea arabica* L., Tarapoto

Para optar el título profesional de Ingeniero Agrónomo

Presentado por

Maycol German Oroscó

Sustentado y aprobado el 01 de febrero del 2024, por los siguientes jurados:

 _____ Presidente de Jurado Dr. Geomar Vallejos Torres	 _____ Secretario de Jurado Ing. M.Sc. Jose Carlos Rojas García
 _____ Vocal de Jurado Ing. M.Sc. Harry Saavedra Alva	
 _____ Asesor Ing. M.Sc. Mike Anderson Corazon Guivin	 _____ Co-asesor Ing. María Nelly Pezo Torres

Tarapoto, Perú

2024



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN CONDUCENTES A
GRADOS Y TÍTULOS N° 004-2024**

Jurado reconocido con Resolución de Consejo de Facultad N° 027-2022-UNSM/FCA/CF

A las 10:06 horas, del día jueves del mes febrero del 2024, Auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias- Ciudad Universitaria, inicio el acto público de sustentación del trabajo de investigación "**Características fisico-químicas del suelo sobre el potencial simbiótico de hongos micorrízicos arbusculares en plántulas de Coffea arabica, Tarapoto.**" para optar el título profesional de **INGENIERO AGRÓNOMO**, presentado por el bachiller **MAYCOL GERMAN OROSCO**.

Instalada la Mesa Directiva conformada por el Dr. Geomar Vallejos Torres (presidente del jurado), Ing. M. Sc. José Carlos Rojas García (secretario), Ing. M. Sc. Harry Saavedra (vocal), acompañado por Ing. M. Sc. Mike Anderson Corazón Guivin (asesor) y por la Ing. María Nelly Pezo Torres (co-asesor); el presidente de jurado dirigió brevemente unas palabras y a continuación el secretario dio lectura a la **Resolución de Consejo de Facultad N° 065-2022-UNSM-T/FCA/CF**.

Seguidamente el autor expuso el trabajo de investigación y el jurado evaluador realizó las preguntas pertinentes, respondidas por el sustentante y eventualmente, con la venia del jurado, por el asesor.

Una vez terminada la ronda de preguntas, el jurado procedió a deliberar para determinar la calificación final, para lo cual dispuso un receso de quince (15) minutos, con participación del asesor con voz, pero sin voto, sin la presencia del sustentante y otros participantes del acto público.

Luego de aplicar los criterios de calificación con estricta observancia del principio de objetividad y de acuerdo con los puntajes en escala vigesimal (de 0 a 20), según el Anexo 4.2 del RG - CTI, la nota de sustentación otorgada resultante del promedio aritmético de los calificativos emitidos por cada uno de los miembros del jurado fue quince (15).

De acuerdo con el Artículo 40° del RG - CTI, la nota obtenida es quince y correspondiente a la calificación de Buena. Leído este resultado en presencia de todos los participantes del acto de sustentación, el secretario dio lectura a las observaciones subsanables al informe final que el autor deberá corregir y alcanzar al jurado en un plazo máximo de treinta (30) días calendario.

Se deja constancia que la presente acta se inscribe en el Libro de Sustentaciones N° 001-2024, de la Escuela profesional de Agronomía

Firman los integrantes de la Mesa Directiva y el autor del trabajo de investigación en señal de conformidad, dando por concluido el acto a las 11:50 horas, el mismo día 01 de febrero de 2024



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN MARTIN**

**FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS**

"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

.....
Dr. Geomar Vallejos Torres
PRESIDENTE

.....
Ing. M. Sc. José Carlos Rojas García
SECRETARIO

.....
Ing. M. Sc. Harry Saavedra Alva
VOCAL

.....
Bach. Maycol German Orosco
AUTOR

.....
Ing. M. Sc. Mike A. Corazon Gulvin
ASESOR

.....
Ing. Maria Nelly Pezo Torres
CO-ASESOR

Declaratoria de autenticidad

Maycol German Orosco, con DNI N° **73221970**, egresado de la Escuela Profesional de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de San Martín, autor de la tesis titulada: **Características físico- químicas del suelo sobre el potencial simbiótico de Hongos Micorrízicos Arbusculares en plántulas de *Coffea arabica* L., Tarapoto.**

Declaramos bajo juramento que:

1. La tesis presentada es de mi autoría.
2. La redacción fue realizada respetando las citas y referencia de las fuentes bibliográficas consultadas, siguiendo las normas APA actuales
3. Toda información que contiene la tesis no ha sido plagiada;
4. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido alterados ni copiados, por tanto, la información de esta investigación debe considerarse como aporte a la realidad investigada.

Por lo antes mencionado, asumo bajo responsabilidad las consecuencias que deriven de mi accionar, sometiéndome a las leyes de nuestro país y normas vigentes de la Universidad Nacional de San Martín.

Tarapoto, 01 febrero del 2024



Maycol German Orosco
DNI N° 73221970

Ficha de identificación

<p>Título del proyecto Características físico- químicas del suelo sobre el potencial simbiótico de Hongos Micorrízicos Arbusculares en plántulas de <i>Coffea arabica</i> L., Tarapoto.</p>	<p>Área de investigación: Ciencias Agrarias Línea de investigación: Gestión integral y sostenible de los recursos naturales Sublínea de investigación: Manejo y conservación de la biodiversidad Grupo de investigación: Genética, biodiversidad y biotecnología. R.D. N°041-2022 Tipo de investigación: Básica <input checked="" type="checkbox"/>, Aplicada <input type="checkbox"/>, Desarrollo experimental <input type="checkbox"/></p>
<p>Autor: Maycol German Orosco</p>	<p>Facultad de Ciencias Agrarias Escuela Profesional de Agronomía https://orcid.org/0000-0001-8068-485X</p>
<p>Asesor: Ing. M. Sc. Mike Anderson Corazón Guivin</p>	<p>Dependencia local de soporte: Facultad de Ciencias Agrarias Escuela Profesional de Agronomía Unidad o Laboratorio Agronomía https://orcid.org/0000-0001-6027-4255</p>
<p>Coasesor: Ing. María Nelly Pezo Torres</p>	<p>Contraparte científica: Facultad o Institución: Universidad Nacional de San Martín Unidad o Laboratorio: Biología y Genética Molecular País: Perú https://orcid.org/0000-0002-9584-2686</p>

Dedicatoria

A dios por darme la vida y la salud.

A mis padres Luis marino y Palmira por los valores, el amor y el apoyo incondicional que me brindan, por ser la base de todos mis logros y porque son un ejemplo de superación y sacrificio.

A mis hermanas Mary y Luz Gemita quienes me motivan y se preocupan por mi para ser una mejor persona.

Agradecimiento

Al Instituto de investigación y desarrollo de la UNSM - T, por el financiamiento para la ejecución de mi proyecto de investigación, mediante el concurso de proyectos de tesis, periodo 2022, con resolución N° 065- 2022-UNSM/FCA/CF.

Al Ing. M. Sc. Mike Anderson Corazon Guivin por su apoyo permanente, por la enseñanza y los valores éticos profesionales transmitidos, y por acompañarme en todo el proceso de ejecución de mi tesis.

A la Universidad Nacional de San Martín por los conocimientos brindados durante los años de estudio.

A la Ing. María Nelly Pezo Torres, por contribuirme sus conocimientos y habilidades para concluir de la mejor manera mi tesis.

A mis amigos (as) del LBGM: Elvin, Huber, Jhon Gerly, Nelly, Jhender Paquito, José Maximino, Alexandra, Marlon, Angel, Sofía, Adela, Farlin, Jheyli, Daniel, Anthony y Anaximandro gracias por el apoyo y la motivación brindada durante todo el desarrollo de este trabajo de investigación.

Índice general

Ficha de identificación.....	6
Dedicatoria	7
Agradecimiento	8
Índice general.....	9
Índice de tablas	11
Índice de figuras.....	13
RESUMEN	15
ABSTRACT	16
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN	17
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	19
2.1. Antecedentes de la investigación	19
2.2. Fundamentos teóricos.....	22
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS	28
3.1. Ámbito de la investigación	28
3.1.1. Ubicación de área de estudio.....	28
3.1.2. Periodo de ejecución.....	29
3.1.3. Autorización y permisos	29
3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad.....	30
3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales.....	30
3.2. Sistema de variables.....	30
3.3. Procedimiento de la investigación	31
3.3.1. Evaluar las características físico-químicas de suelos, colectados en plantaciones de <i>Coffea arabica</i> L. bajo diferentes condiciones edafoclimáticas de la región San Martín.....	31
3.3.2. Evaluar el efecto de las características físico-químicas del suelo en la colonización micorrízica de plántulas de <i>Coffea arabica</i> L. inoculadas con diferentes especies de hongos micorrízicos Arbusculares nativos.....	33

3.3.3. Evaluar el efecto de las características físico-químicas del suelo sobre los parámetros morfológicos, fisiológicos y enzimáticos en plántulas de <i>Coffea arabica</i> L., inoculadas con diferentes especies de hongos micorrízicos arbusculares nativos.	37
3.3.4. Diseño experimental.....	44
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1. Evaluación de las características físico-químicas de suelos, colectados en plantaciones de <i>Coffea arabica</i> L. bajo diferentes condiciones edafoclimáticas de la región San Martín	45
4.2. Evaluar el efecto de las características físico-químicas del suelo en la colonización micorrízica de plántulas de <i>Coffea arabica</i> L. inoculadas con diferentes especies de hongos micorrízicos Arbusculares nativos.....	48
4.3. Evaluar el efecto de las características físico-químicas del suelo sobre los parámetros morfológicos, fisiológicos y enzimáticos en plántulas de <i>Coffea arabica</i> L., inoculadas con diferentes especies de hongos micorrízicos arbusculares nativos.....	51
CONCLUSIONES	86
RECOMENDACIONES	87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
ANEXOS.....	99

Índice de tablas

Tabla 1 Ubicación del desarrollo de la investigación	28
Tabla 2 Ubicación política de localidades de muestreo	28
Tabla 3 Resultados de análisis fisicoquímicos de suelo de diferentes puntos de la región San Martín.....	45
Tabla 4 Resultados de porcentaje de colonización.....	48
Tabla 5 Análisis de Varianza de altura de planta	52
Tabla 6 Análisis Post Hoc de Tukey de altura de planta.....	52
Tabla 7 Análisis Post Hoc de Tukey de interacción especie y lugar en la altura de planta	52
Tabla 8 Análisis de Varianza del diámetro del tallo	55
Tabla 9 Análisis Post Hoc de Tukey del diámetro del tallo	55
Tabla 10 Análisis Post Hoc de Tukey de interacción de HMA y lugar del diámetro del tallo	56
Tabla 11 Análisis de Varianza del área foliar	58
Tabla 12 Análisis Post Hoc de Tukey del área foliar.....	58
Tabla 13 Análisis Post Hoc Tukey de la interacción de HMA y tipos de suelo del área foliar.....	59
Tabla 14 Análisis de varianza de conteo de hojas	60
Tabla 15 Análisis Post Hoc de Tukey del conteo de pares hojas	61
Tabla 16 Análisis de varianza de peso fresco aéreo	62
Tabla 17 Análisis de varianza de peso fresco raíz.....	62
Tabla 18 Resultados de peso fresco y seco	63
Tabla 19 Análisis de Varianza de la concentración de clorofila.....	66
Tabla 20 Análisis Post Hoc de Tukey de la concentración de clorofila	66
Tabla 21 Análisis Post Hoc de Tukey de la interacción HMA y tipo de suelo de la concentración de clorofila	66

Tabla 22 Análisis de Varianza de la actividad de la catalasa en hojas	68
Tabla 23 Análisis de varianza de la actividad de la catalasa en raíces.....	69
Tabla 24 Análisis de Varianza de la actividad de la Glucanasa en raíz	72
Tabla 25 Análisis Post Hoc de Tukey de la actividad de la Glucanasa en raíz.....	72
Tabla 26 Análisis Post Hoc de Tukey de la actividad de la Glucanasa en raíz.....	72
Tabla 27 Análisis de Varianza de la actividad de la Glucanasa en hojas	74
Tabla 28 Análisis Post Hoc de Tukey de la actividad de la Glucanasa en hojas	74
Tabla 29 Análisis de Varianza de la actividad del succinato deshidrogenasa	76
Tabla 30 Análisis Post Hoc de Tukey de la actividad del succinato deshidrogenasa...	76
Tabla 31 Análisis Post Hoc de Tukey de la interacción de HMA y tipo de suelo en la actividad del succinato deshidrogenasa.....	77
Tabla 32 Análisis de Varianza de la concentración de nitrógeno en hojas	79
Tabla 33 Análisis Post Hoc de Tukey de la concentración de nitrógeno en hojas.....	79
Tabla 34 Análisis Post Hoc de Tukey de la interacción de HMA y tipo de suelo de nitrógeno en hojas.....	79
Tabla 35 Análisis de Varianza de la concentración de fósforo en hojas	81
Tabla 36 Análisis Post Hoc de Tukey de la concentración de fósforo en hojas.....	81
Tabla 37 Análisis Post Hoc de Tukey de la interacción de HMA y tipo de suelo en la concentración de fósforo en hojas.....	81
Tabla 38 Análisis de Varianza de la concentración de potasio en hojas.....	83
Tabla 39 Análisis Post Hoc de Tukey de la concentración de potasio en hojas	83
Tabla 40 Análisis Post Hoc de Tukey de la interacción de HMA y tipo de suelo de la concentración de potasio en hojas	83

Índice de figuras

Figura 1 Mapa de muestreo, Ubicación política de localidades de muestreo	29
Figura 2 Proceso de colecta de muestras biológicas en plantaciones de café, distrito de Rumisapa, provincia de Lamas, región San Martín.	32
Figura 3 Proceso de pre-tratamiento de suelo rizosférico.	32
Figura 4 Almacenamiento de muestras de suelo para análisis físico-químico.....	33
Figura 5 Zona de colecta de semillas de café de la variedad Caturra. (Distrito San Roque de Cumbaza).....	34
Figura 6 Proceso de germinación.....	35
Figura 7 Proceso de instalación de experimento.	36
Figura 8 Proceso de tinción de raíces.	37
Figura 9 Proceso de análisis morfológicos.....	38
Figura 10 Proceso de evaluación de actividad de la enzima Catalasa.	40
Figura 11 Proceso de evaluación de la actividad enzimática de la Succinato deshidrogenasa.....	42
Figura 12. Proceso de evaluación de la enzima glucanasa.....	43
Figura 13 Porcentaje de colonización de Coffea arabica L. en diferentes tipos de suelo.	49
Figura 14 Análisis de correlación de Pearson de los parámetros físico químicos de suelo con la colonización micorrízica.	50
Figura 15 Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de altura.	53
Figura 16 Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de la altura entre la interacción de HMA y lugar.....	53
Figura 17 Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados del diámetro del tallo.	56
Figura 18 Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de diámetro entre la interacción de HMA y lugar.....	57
Figura 19 Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados del área foliar.	59
Figura 20 Gráfico de cajas del análisis ANOVA para interacción de HMA y tipo de suelo en resultados del área foliar.....	60
Figura 21 Efecto de inóculos de HMA sobre el número de pares de hojas en plantas de café durante 135 días.	61

Figura 22 Peso fresco y seco en hojas y raíz.	63
Figura 23 Análisis de correlación de Pearson de los parámetros fisicoquímicos con las evaluaciones morfológicas.....	65
Figura 24 Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de la clorofila.....	67
Figura 25 Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de interacción de HMA y tipos de suelo en resultados de clorofila.....	67
Figura 26 Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de la actividad de catalasa en hojas.	69
Figura 27 Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de la actividad de catalasa en raíz.....	70
Figura 28 Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de la actividad de Glucanasa en raíz.....	73
Figura 29 Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de interacción HMA y tipo de suelo en la actividad de Glucanasa en raíz.....	73
Figura 30 Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de la actividad de Glucanasa en hojas.	74
Figura 31 Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de la actividad de succinato deshidrogenasa.....	77
Figura 32 Gráfico de cajas del análisis ANOVA para la interacción HMA y tipo de suelo resultados de la actividad de succinato deshidrogenasa.....	78
Figura 33 Gráfico de cajas del análisis ANOVA del contenido de nitrógeno en hojas..	80
Figura 34 Gráfico de cajas del análisis ANOVA de la interacción entre HMA y tipo de suelo en el contenido de nitrógeno en hojas.....	80
Figura 35 Gráfico de cajas del análisis ANOVA del contenido de fósforo en hojas.....	82
Figura 36 Gráfico de cajas del análisis ANOVA de la interacción de HMA y tipo de suelo en el contenido de Fósforo en hojas.	82
Figura 37 Gráfico de cajas del análisis ANOVA de la interacción de HMA y tipo de suelo en el contenido de Potasio en hojas.....	84

RESUMEN

Los Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA) desempeñan un papel esencial en la relación entre las plantas y el suelo, siendo cruciales para el desarrollo y resistencia a diferentes tipos de estrés en plantas. En el contexto peruano, el cultivo de *Coffea arabica* L. tiene gran relevancia económica nacional e internacional. Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar cómo las características del suelo afectan la simbiosis entre diferentes especies de HMA y plántulas de *C. arabica*. Se seleccionaron suelos de cuatro provincias: Lamas, Rioja, San Martín y El Dorado, y se utilizó un Diseño Completamente al Azar con dos factores: tipos de suelo (A) y especies de HMA (B), además de un grupo control no inoculado. Se establecieron 12 tratamientos, cada uno con 15 repeticiones, totalizando 180 unidades experimentales. Durante 5 meses, se evaluó el impacto de *Rhizoglyphus variabile* y *Rhizoglyphus dunense* en características fisiológicas, morfológicas y enzimáticas de las plántulas de café en diferentes suelos. Se analizó la concentración de nutrientes en las hojas, altura de las plantas, diámetro del tallo, contenido de clorofila y actividad enzimática antioxidante. Nuestros resultados destacan el impacto positivo de *Rhizoglyphus dunense* como biofertilizante, con mejoras significativas en la mayoría de los parámetros evaluados. El suelo de Rioja mostró resultados menos favorables debido a su pH ácido y baja concentración de fósforo, mientras que los suelos de San Martín, El Dorado y Lamas fueron más adecuados para el cultivo de café, y fue el suelo de El Dorado el que más potencializó la actividad micorrízica. Esto permite identificar las especies de HMA más efectivas como biofertilizantes y proporciona información crucial para mejorar la producción agrícola, especialmente en cultivos como el café.

Palabras clave: *Glomeromycota, Glomeraceae, antioxidantes, enzimas, biofertilizante.*

ABSTRACT

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) play an essential role in the relationship between plants and soil, being crucial for the development and resistance to different types of stress in plants. In the Peruvian context, the cultivation of *Coffea arabica* L. is of great national and international economic relevance. Therefore, the present study aimed to evaluate how soil characteristics affect the symbiosis between different AMF species and *C. arabica* seedlings. Soils were selected from four provinces: Lamas, Rioja, San Martín and El Dorado, and a Completely Randomized Design was used with two factors: soil types (A) and AMF species (B), plus a non-inoculated control group. Twelve treatments were established, each with 15 replications, totaling 180 experimental units. The impact of *Rhizoglyphus variabile* and *Rhizoglyphus dunense* on physiological, morphological and enzymatic characteristics of coffee seedlings in different soils was evaluated during 5 months. Leaf nutrient concentration, plant height, stem diameter, chlorophyll content and antioxidant enzyme activity were analyzed. The results highlight the positive impact of *Rhizoglyphus dunense* as a biofertilizer, with significant improvements in most of the parameters evaluated. The soil of Rioja showed less favorable results due to its acid pH and low phosphorus concentration, while the soils of San Martín, El Dorado and Lamas were more suitable for coffee cultivation, and it was the soil of El Dorado that most potentiated mycorrhizal activity. This allows the identification of the most effective AMF species as biofertilizers and provides crucial information to improve agricultural production, especially in crops such as coffee.

Key words: *Glomeromycota*, *Glomeraceae*, *antioxidants*, *enzymes*, *biofertilizer*.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

El café es uno de los cultivos más importantes y populares en el mundo, ocupa el segundo lugar como uno de los productos agronómicos con mayor demanda internacional (Sánchez, 2017), se estima que más de 70 países producen y comercializan café (Coral, 2015). En consecuencia, en el Perú, este cultivo representa el principal producto agrícola de exportación y se analiza que para el año cafetalero 2023/24 el incremento en las exportaciones peruanas de café alcanzará la cifra de 4.3 millones de sacos de 60 kilos, acercándose a 174.3 millones de sacos (USDA, 2023).

La producción de café en Perú abarca 11 regiones, 67 provincias y 338 distritos, siendo San Martín una de las principales regiones productoras. Sin embargo, la agricultura peruana enfrenta desafíos que se traducen en una producción insuficiente para atender la demanda internacional (MINAGRI, 2020). Se cultivan aproximadamente 425,416 hectáreas de café, lo que representa el 6% de la superficie agrícola nacional, y este sector proporciona empleo a alrededor de 2 millones de peruanos, beneficiando a 223,482 familias (MINAGRI, 2020).

En un contexto más específico, las principales regiones productoras de café peruano son Pasco, Cajamarca, San Martín, Junín y Amazonas, con un rendimiento promedio anual de 1081 kg / ha, 1046 kg / ha, 969 kg / ha, 792 kg / ha y 705 kg/ ha, respectivamente (Salas et al., 2020). Es por ello que este cultivo resulta indispensable en el sector económico, social y ambiental de la región San Martín.

El cultivo del café ha enfrentado diversas dificultades, siendo uno de los desafíos más significativos la propagación de la roya amarilla (*Hemileia vastatrix*) que afectó al café entre 2008 y 2013 (Arteaga, 2019). Además, se ha observado que la degradación continua de los suelos, resultado de prácticas inadecuadas en los sistemas de producción y la sobreutilización de agroquímicos, ha llevado a una disminución de la biodiversidad del suelo y del equilibrio ecológico, lo que a largo plazo también ha afectado la seguridad alimentaria (Perea-Rojas et al., 201).

Frente a estos desafíos, ha surgido la necesidad de encontrar soluciones. Por lo tanto, actualmente se están llevando a cabo investigaciones sobre los Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA) nativos. Estos microorganismos no solo mejoran la absorción de nutrientes, sino que también promueven una mayor resistencia a plagas y enfermedades (Smith & Read, 2008). Es importante destacar que el café es una planta endomicorrízica

obligatoria lo que significa que depende de las micorrizas para su desarrollo (Alva, 2019).

Dado que el rango óptimo de pH para el cultivo de café se sitúa entre 4.50 y 5.50 (Márquez et al., 2020), la rizosfera del café se convierte en un candidato ideal para estudiar la actividad de los HMA, ya que compromete la presencia o ausencia de distintos nutrientes de gran importancia, como el fósforo. Además, se tiene evidencias de que una menor disponibilidad de nutrientes, especialmente de fósforo, favorece la actividad simbiótica de estos hongos (Sang et al., 2018; Hernández-Acosta et al., 2021). En la región San Martín, los cafetales generalmente se encuentran en suelos ácidos, con un pH que oscila entre 4.06 y 4.97, y una baja disponibilidad de nutrientes, particularmente nitrógeno, fósforo y potasio (Arteaga, 2019).

Las características físico-químicas del suelo desempeñan un papel crucial en la actividad y el desarrollo de los HMA. Por tanto, esta investigación busca identificar cuáles de estas características favorecen una mayor actividad simbiótica de los hongos micorrízicos arbusculares en plantas de *Coffea arabica* L., además, se pretende determinar qué especies de HMA se adaptan mejor a los diferentes tipos de suelos presentes en la región de San Martín.

Bajo este contexto se estableció como objetivo general determinar el efecto de características físico-químicas del suelo sobre el potencial simbiótico de hongos micorrízicos arbusculares en plántulas de *Coffea arabica* L., Tarapoto.

Adicionalmente, los objetivos específicos fueron:

- a) Evaluar las características físico-químicas de suelos colectados en plantaciones de *Coffea arabica* L. bajo diferentes condiciones edafoclimáticas de la región San Martín.
- b) Evaluar el efecto de las características físico-químicas del suelo en la colonización micorrízica de plántulas de *Coffea arabica* L. inoculadas con diferentes especies de hongos micorrízicos Arbusculares nativos.
- c) Evaluar el efecto de las características físico-químicas del suelo sobre los parámetros morfológicos, fisiológicos y enzimáticos en plántulas de *Coffea arabica* L., inoculadas con diferentes especies de hongos micorrízicos arbusculares nativos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Munir et al. (2003) examinaron cómo los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) influyeron en el desarrollo y la nutrición de plantas cultivadas en suelos salinos con distintos niveles de sal y fósforo. Emplearon tres tipos de suelo con variadas concentraciones de salinidad y fósforo, y aplicaron diversos tratamientos que involucraban la inoculación con HMA y la aplicación de fertilizante fosfatado. A lo largo de un período de cinco semanas, cultivaron cebada y observaron que las plantas en suelos altamente salinos presentaron un crecimiento inferior, debido al impacto del potencial osmótico del suelo en la absorción de nutrientes y en el desarrollo de las raíces. Tanto la aplicación de fertilizantes fosfatados como la inoculación con HMA mejoraron tanto el crecimiento como la absorción de fósforo, hierro y zinc por parte de las plantas. No obstante, se registró una reducción en la absorción de micronutrientes a medida que aumentaba la salinidad del suelo.

Fernández-Martín et al. (2005) examinaron los efectos de la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y las relaciones entre el suelo y el humus de lombriz en plántulas de cafeto cultivadas en tres tipos de suelos: acrisol, cambisol dístico y cambisol eútrico. Llevaron a cabo tres experimentos en un entorno controlado de vivero. Los resultados demostraron que la inoculación con HMA generó efectos positivos, produciendo incrementos notables en el área foliar en comparación con las plantas no tratadas. La eficacia de las cepas de HMA inoculadas se vio afectada por la fertilidad del suelo y la proporción entre suelo y humus de lombriz. La cantidad de micomasa endófito mostró una relación inversa con la fertilidad del suelo, siendo mayor en suelos con menor fertilidad. La inoculación micorrízica en los sustratos más apropiados para cada tipo de suelo resultó en aumentos significativos en los niveles de nutrientes. Además, se identificaron ciertas cepas de HMA que exhibieron respuestas específicas según el tipo de suelo: *Glomus clarum* y *Glomus spurgum* en acrisol-cambisol dístico, y *Glomus fasciculatum* en cambisol eútrico.

Carrenho et al. (2007), en Brasil, investigaron el impacto de diversas propiedades del suelo en la colonización micorrízica arbuscular de cultivos como el maní, el sorgo y el maíz. Sus hallazgos destacaron que la textura del suelo era el principal factor que influía en la colonización de raíces, observando una estimulación mayor en suelos con un mayor porcentaje de arena en comparación con aquellos con más arcilla.

Barrer (2009) en Colombia, investigó el uso de HMA en la agricultura y concluyó que los sistemas de monocultivo y el uso de pesticidas reducen la presencia de estos hongos en los suelos y generan diferentes respuestas en los cultivos.

Trejo et al. (2011) llevaron a cabo un estudio para examinar siete conjuntos de HMA, obtenidos de fincas cafetaleras con distintos niveles de tecnología en Veracruz, influían en el desarrollo de plantas de café var. Garnica tanto en invernadero como en campo. Observaron que la tecnología empleada en las fincas afectaba la variedad de especies de HMA presentes, siendo menor en fincas más avanzadas tecnológicamente. En el invernadero, los conjuntos de HMA incrementaron significativamente la altura de las plantas en comparación con los grupos de control, destacando el conjunto denominado La Estanzuela después de 130 días desde la inoculación. En el campo, a los 290 días después de la inoculación, las plantas inoculadas con los conjuntos La Estanzuela, Miradores y Paso Grande mostraron una supervivencia superior al 80 %. Además, observaron que los conjuntos más eficaces en promover el crecimiento y la supervivencia de las plantas en el campo procedían de fincas con un nivel tecnológico intermedio, que también presentaban una mayor diversidad de especies de HMA.

Coral (2015) estudió la diversidad de HMA nativos y su capacidad micorrízica en el cultivo de café en diferentes condiciones agroecológicas en la Región San Martín, Perú. Concluyó que el contenido de materia orgánica y el pH del suelo eran factores determinantes para la colonización de los HMA en el café, siendo más favorable en suelos con pH bajo y textura arenosa. Además, señaló la importancia del oxígeno en el suelo para el crecimiento micelial.

Sánchez (2017) estudiaron el efecto de diversos inóculos de hongos micorrízicos arbusculares en el desarrollo de plantas clonales de café en la provincia de Rodríguez de Mendoza, se llevó a cabo un experimento en invernadero. Los inóculos de HMA se recolectaron en fincas cafetaleras locales, mientras que los clones de las plantas de café fueron sometidos a procedimientos de estrés y hormonales para favorecer el crecimiento de los brotes. Posteriormente, los brotes fueron tratados para promover el enraizamiento y luego fueron inoculados con HMA. Todos los inóculos de HMA demostraron tener efectos positivos en el crecimiento de las plantas de café, siendo los tratamientos T10, T1 y T11 los más destacados. A nivel fúngico, aunque la colonización micorrízica fue baja, los tratamientos mencionados mostraron una buena presencia y longitud de micelio extrarradical

Del Águila et al. (2018), en la región San Martín, Perú, evaluaron la inoculación de consorcios micorrízicos arbusculares en el café Caturra. Encontraron que la inoculación

de HMA nativos tenía efectos beneficiosos en diversos parámetros morfológicos de las plantas, destacando los consorcios micorrízicos de las provincias de Moyobamba y El Dorado.

Sang et al. (2018) analizaron los efectos de los HMA y las condiciones del suelo en el crecimiento de las plantas en cultivo. Observaron una especificidad de hospedador dependiente de la especie y que la colonización de los HMA disminuía en suelos ricos en fosfatos; la investigación se desarrolló en Corea.

Quiñonez et al. (2018), en México, investigaron las comunidades vegetales en suelos semiáridos y su relación con los HMA. Encontraron que, a menor disponibilidad de nutrientes, especialmente fósforo, había menor densidad de esporas de HMA.

Trejo-Aguilar (2018), en México, estudiaron el impacto de la inoculación de HMA en variedades de café y concluyeron que el efecto de la inoculación variaba según la variedad de café, con mejores resultados en la variedad Caturra.

Alva (2019) investigó la producción intensiva de HMA utilizando plantas trampa e inóculos de suelos rizosféricos de café de diferentes altitudes en la Región San Martín. Encontró que el arroz era la planta trampa más eficaz para la multiplicación de consorcios de HMA y destacó la importancia de la fuente de inóculo en el éxito del proceso.

Prayogo et al. (2020), en Indonesia, evaluaron la estructura y composición de las principales micorrizas arbusculares bajo diferentes sistemas agroforestales de manejo agrícola de café y pino. Encontraron que la especie de HMA más común era *Glomus sp.*

Falcón E. et al. (2021), en Cuba, realizaron un estudio sobre el efecto de cepas de HMA en el desarrollo de *Swietenia mahagoni* L. Jacq. cultivadas con sustratos orgánicos. Observaron mejoras significativas en el crecimiento de las plantas, especialmente en sustratos con bajo contenido de fósforo.

Romero-Arias et al. (2021), en Cuba, evaluaron el impacto de la aplicación de cepas de micorrizas en el desarrollo de *Glycine max* L. y encontraron mejoras en aspectos morfológicos y una reducción en los costos de producción.

Corazon-Guivin et al. (2023), evaluaron la diversidad de especies de HMA en plantaciones de café en cuatro provincias de Perú, y el efecto de cepas nativas de HMA en el crecimiento del café. Identificaron 35 morfoespecies de HMA en 12 plantaciones, seleccionaron dos especies nativas, *Rhizoglomus variabile* y *Nanoglomus plukenetiae*, para realizar experimentos de inoculación en plántulas de café. Ambas especies

demonstraron una colonización efectiva de las raíces del café, resultando en un significativo aumento en la biomasa de brotes, raíces y total en comparación con los controles sin micorrizas. *R. variable* mostró un desempeño superior a *N. plukenetiae* en todos los aspectos evaluados. Aunque la inoculación conjunta de ambas especies no presentó mayores beneficios en el crecimiento de las plantas, la colonización del café por *R. variable* o *N. plukenetiae* mostró un marcado incremento en su desarrollo. Estos hallazgos resaltan el potencial de *R. variable* para mejorar la productividad y el establecimiento del café.

2.2. Fundamentos teóricos

2.2.1. Importancia del café

El cultivo de café ocupa un lugar destacado en la exportación peruana, abarcando aproximadamente 420 000 hectáreas en todo el país (MINAGRI, 2020). En la región San Martín, este cultivo se extiende por sus 10 provincias, siendo predominantes las variedades Caturra, Pache y Catimor (Alva, 2019).

2.2.2. Requerimientos nutricionales

Es crucial entender la fertilidad del suelo que alberga el cultivo de café para conocer sus necesidades nutricionales. Una vez evaluada esta fertilidad, es posible aplicar los elementos que puedan estar en déficit, logrando así un equilibrio de los nutrientes esenciales. Este equilibrio nutricional resulta fundamental para mejorar el rendimiento del cultivo de café (Arteaga, 2019).

2.2.3. Micorrizas

La definición de micorriza se refiere a una simbiosis, específicamente mutualista, establecida entre los hongos micorrízicos y las raíces de una planta. Brinda beneficios significativos a ambas partes, como la mejora en la absorción de agua y nutrientes por parte de la planta, mientras que el hongo se beneficia de los compuestos carbonados producidos durante la fotosíntesis (Quiñonez et al., 2018).

El término "micorriza" fue acuñado por primera vez por Albert Bernard Frank en 1885 para describir la relación simbiótica mutualista entre las raíces de las plantas y ciertos hongos del suelo (Arévalo, 2018). La investigación indica que esta simbiosis entre hongos y plantas ha existido durante más de 400 millones de años, y en la actualidad, se sabe que la mayoría de las plantas terrestres establecen micorrizas (Arévalo, 2018).

2.2.4. Hongos micorrízicos arbusculares

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) se encuentran de forma natural en aproximadamente el 85% de las especies vegetales (Barrer, 2009). Alva (2019) subraya que los HMA son "simbiontes obligados" y, como resultado, "no pueden ser cultivados in vitro". Estos HMA pertenecen a un grupo de hongos biótrofos obligados, caracterizados por formar estructuras arbustivas con ramificaciones de hifas llamadas arbusculos (Restrepo et al., 2019; Arévalo, 2018).

2.2.5. Importancia de los HMA

La relevancia de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) reside en su capacidad como biofertilizantes naturales, lo que ha llevado a su producción y aplicación en numerosos países (Sang et al., 2018). El empleo de HMA se presenta como una alternativa al uso excesivo de agroquímicos, especialmente fertilizantes. En este sentido, Cobb et al. (2018) señalan que "Las sinergias entre los hongos AM y las enmiendas alternativas del suelo pueden contribuir a reducir la dependencia de fertilizantes comerciales, al tiempo que se mantienen los rendimientos agrícolas de alta calidad. Esto no solo disminuye los costos agrícolas, sino que también satisface las necesidades nutricionales de la población humana".

Los HMA potencian la absorción y transferencia de nutrientes esenciales para las plantas (Fernández-Martín et al., 2005), con énfasis particular en la absorción y transferencia de fósforo, más destacada en la mayoría de las simbiosis (Arévalo, 2018). Estos beneficios son posibles debido a la mayor disponibilidad de nutrientes y a la producción de fitohormonas por parte de las micorrizas. Además, se ha observado que estos hongos ayudan a reducir el estrés biótico y abiótico (Cotrina, 2019). En este contexto, "también se ha evidenciado que las plantas micorrizadas se recuperan más rápidamente de períodos breves de sequía en comparación con las plantas no micorrizadas" (Munir et al., 2003).

2.2.6. Simbiosis HMA/planta

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) han sido reportados como asociados con una variedad de hospederos, si bien esta relación depende considerablemente de la especie de HMA y, en ciertas ocasiones, de las condiciones edáficas (Sang et al., 2018). Según Alva (2019), el arroz se destaca como una planta trampa altamente efectiva para la multiplicación de consorcios de HMA.

La interacción entre los HMA y las plantas se basa en un intercambio nutricional mutuamente beneficioso. En este contexto, los hongos micorrízicos se benefician del transporte de compuestos solubles de carbono y de un ambiente relativamente libre de

competidores proporcionado por la planta, mientras que estas últimas obtienen agua y nutrientes extraídos del suelo por el hongo. De hecho, se considera que esta simbiosis constituye la parte metabólicamente más activa de la planta, al interactuar estrechamente con los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes (Stürmer et al., 2021). Además, se atribuye el aumento en la absorción de nutrientes a una mayor afinidad por iones específicos y a la reducción de la concentración umbral para la absorción, así como a la exploración de un mayor volumen de suelo y al incremento de la superficie de las raíces. Asimismo, se señala que el aumento en el crecimiento de las plantas micorrízicas se debe principalmente a mejoras en la fotosíntesis y en la absorción de fósforo (Munir et al., 2003).

2.2.7. Especies

En total, se han identificado más de 350 especies de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en todo el mundo, y se presume que aún existen muchas más por descubrir, ya que solo se ha explorado un mínimo de territorio a nivel mundial (Sang et al., 2018). En lo que respecta a la asociación de HMA con el cultivo de café, Hernández-Acosta et al. (2021) señalan que "se han identificado más de 100 especies en diferentes países de todo el mundo". Además, según Prayogo et al. (2020), el género más común en esta relación es *Glomus spp.*, en comparación con *Acaulospora spp.* y *Gigaspora spp.*

2.2.8. Relación de los HMA con el suelo

La relación entre los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y los parámetros físico-químicos del suelo puede ser variable y a veces contradictoria. Por ejemplo, la investigación de Trinidad-Cruz et al. (2017) no encontró una correlación evidente entre las características físico-químicas del suelo y la riqueza de morfotipos o la abundancia de esporas de HMA en los sitios de muestreo. Sin embargo, otras investigaciones sugieren que factores como el pH, la humedad del suelo y la disponibilidad de nutrientes pueden influir tanto en la colonización micorrízica como en el número de esporas (Barrer, 2009).

Además, diversos estudios han evaluado la relación entre los HMA y el contenido de fósforo en el suelo, y han observado que a medida que aumenta la concentración de fosfatos, la colonización de HMA tiende a disminuir. Esto subraya la importancia de conocer los niveles de fósforo disponibles en el suelo al aplicar HMA (Sang et al., 2018; Hernández-Acosta et al., 2021). Barrer (2009) incluso sugiere que la simbiosis puede verse reducida o inhibida en suelos con altas concentraciones de fósforo.

En cuanto a la profundidad del perfil del suelo, se ha observado que, a mayor profundidad, hay menos micorrizas, posiblemente influenciado por la cantidad y calidad del humus. Arévalo (2018) encontró que los primeros 15 centímetros del suelo tenían una mayor densidad de esporas en comparación con profundidades de 15 a 30 centímetros, donde la densidad era menor. Además, las condiciones del suelo, como el contenido de agua y la textura, también pueden afectar la formación de asociaciones micorrízicas, con suelos arenosos estimulando y suelos arcillosos inhibiendo dicha formación (Carrenho et al., 2007). Aparte de los factores edáficos mencionados anteriormente, las condiciones ambientales, como la temperatura y la precipitación, también pueden influir en los HMA. La actividad micorrízica depende de los sustratos y hospedantes que sean utilizados (Corazon-Guivin et al., 2022). El sustrato tiene mucha importancia en la influencia de comunidades de HMA por las propiedades físico-químicas del suelo (Leal et al., 2009). Uno de los atributos que tiene interferencia en el desarrollo fúngico y la colonización en la raíz de la planta, limitando su crecimiento y reproducción (Baslam et al., 2013).

2.2.9. Relación *Coffea arabica* L. y HMA

Hernández-Acosta et al. (2021) resaltan que el café es una planta endomicorrízica obligatoria, lo que implica su dependencia de la micorriza arbuscular para la nutrición, especialmente en suelos con condiciones ácidas y pobres. Esta simbiosis mejora significativamente la absorción de nutrientes esenciales como fósforo, nitrógeno y calcio. En este sentido, López et al. (1983) sugieren que la fase de vivero del café, que marca el inicio de su desarrollo, es el momento más propicio para la inoculación con hongos micorrízicos, respaldando esta afirmación Trejo et al. (1998).

Un aspecto crucial tanto para el cultivo de café como para los hongos micorrízicos arbusculares es el fósforo. Se ha observado que es necesario que el contenido de fósforo en el suelo no exceda los 50 mg/kg, ya que concentraciones más elevadas pueden inhibir el efecto beneficioso de los HMA en las plantas de café, según señala Hernández-Acosta et al. (2021).

En relación con las especies de HMA asociadas al café, Díaz (2022) indican que las familias con el mayor número de especies vinculadas a este cultivo son *Acaulosporaceae*, *Gigasporaceae* y *Glomeraceae*. De estas familias, el género *Acaulospora* destaca por tener el mayor número de especies reportadas asociadas al café, una observación respaldada Hernández-Acosta et al. (2021), quienes señalan su presencia frecuente en suelos con pH ácido.

Los hongos micorrízicos arbusculares desempeñan un papel productivo en el cultivo de café, mejorando la absorción de fósforo (P), lo que resulta en un desarrollo más robusto de la planta (Perea Rojas et al., 2018). Además, se ha observado un aumento en la biomasa y productividad de la planta, junto con una mejora en la actividad fisiológica, evidenciada por un efecto positivo en la tasa fotosintética y conductancia estomática, entre otros aspectos (Sousa Cruz et al., 2019). Por otro lado, estudios demuestran que la aplicación de HMA en el café contribuye a combatir plagas que afectan el cultivo, como nemátodos (Vallejos-Torres et al., 2021).

2.2.10. Uso de HMA como inoculantes

Barrer (2009) sostiene que "los HMA nativos presentan mejores resultados que la inoculación con otros HMA", la fase de plántula en el vivero es el mejor estado fenológico para aplicar HMA, destacando que "producir plantas de calidad en el vivero contribuye a garantizar un mayor porcentaje de supervivencia en las plantaciones forestales y en los programas de reforestación.

2.2.11. Enzimas de protección celular

Las plantas están equipadas con diversos mecanismos de protección celular para neutralizar las moléculas reactivas de oxígeno (ROS), regulando el exceso de ROS antes de que puedan dañar el metabolismo y la estructura celular. Este sistema de defensa implica una serie de componentes antioxidantes enzimáticos, como catalasas (CAT), peroxidasas y superóxido dismutasas (SOD). También incluye enzimas que forman parte del ciclo ascorbato-glutatión, como el ascorbato peroxidasa (APX) y el glutatión reductasa (GR) (Karuppanapandian et al., 2011).

La enzima catalasa (CAT), es procesada durante la formación de la simbiosis, ya que la planta genera reacciones iniciales planta-patógeno, entonces la planta produce moléculas de H_2O_2 , la cual es degradada por la CAT (Blilou et al. 2000), esta enzima participa en la vía ascorbato-glutatión que se encarga de la degradación del H_2O_2 (Sofa et al. 2015). La catalasa es una enzima antioxidante, la cual reduce la concentración de O_2 - y H_2O_2 , productos de un evento de estrés para la planta (Foyer y Noctor 2005).

Las enzimas glucanasas son producidas por las plantas para degradar las paredes de hongos patógenos, hidrolizan enlaces α -1,3-d-glucosídicos y β -d-glucanos, compuestos de la pared fúngica (Simmons, 1998). Existen evidencias que indican que esta enzima también es procesada en presencia de otro tipo de patógenos y a diferentes peligros bióticos y químicos (Pozo et al., 1999).

La relación entre estas enzimas y el café radica en su capacidad para mantener la homeostasis redox en las células vegetales, particularmente en situaciones de estrés. La exposición al estrés ambiental, como sequías, altas temperaturas o patógenos, puede inducir la producción de ROS en las plantas de café. La presencia y la actividad de estas enzimas son esenciales para contrarrestar los efectos dañinos de las ROS, lo que contribuye a la resistencia y la salud de las plantas de café (Karuppanapandian et al., 2011).

Estas moléculas ROS se producen en presencia de diversos factores, tanto biológicos como patógenos, parásitos y simbiontes, como por factores abióticos que incluyen temperaturas extremadamente altas o bajas, radiación, salinidad y otras condiciones ambientales (Gill & Tuteja, 2010; Guidi & Tattini, 2021; Kaur et al., 2022).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito de la investigación

3.1.1. Ubicación de área de estudio

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo en el Vivero del Laboratorio de Biología y Genética Molecular (LBGM) - Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto, la cual presenta la siguiente ubicación (Figura 1, Tabla 1).

Tabla 1

Ubicación del desarrollo de la investigación

Distrito	Provincia	Departamento	Latitud Sur	Latitud Oeste	Altitud
Morales	San Martín	San Martín	06°35'28"	76°18'47"	230 msnm

Para el desarrollo experimental de la investigación se realizó el muestreo en 4 sitios estratégicos dentro de la región San Martín, los cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Ubicación política de localidades de muestreo

Región	Provincia	Distrito	Localidad	Altitud m.s.n.m	Georreferencia UTM
San Martín	San Martín	Banda de Shilcayo	Nuevo Progreso	690	352986.00 9285036.00
	Lamas	Rumisapa	Sanango	705	339455.00 9287474.00
	El Dorado	San Martín de Alao	Caserio Flor del Norte	420	336621.00 9289532.00
	Rioja	Naranjos	Cordillera Andina	968	224957.00 9362779.00



Figura 1

Mapa de muestreo, Ubicación política de localidades de muestreo

3.1.2. Periodo de ejecución

La investigación se ejecutó entre los meses de setiembre del 2022 y marzo del 2023.

3.1.3. Autorización y permisos

Las muestras colectadas fueron únicamente suelo de campo, con el fin de utilizarlo como sustrato, no se necesitaron permisos al momento del muestreo, ya que no afecta el ambiente o entorno de los puntos de muestreo.

3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad

Durante el desarrollo de la investigación se cumplieron los protocolos de bioseguridad establecidos por la Universidad Nacional de San Martín dentro de la resolución N° 298-2018-UNSM/CU-R/NLU. Se cumplieron con los protocolos de bioseguridad en laboratorio y vivero, mediante el uso de materiales como: mascarillas, alcohol, protector facial, distanciamiento social, etc.); todos estos cuidados nos ayudaron a evitar el contagio del Covid-19.

3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales

Se respetaron los principios éticos internacionales del buen investigador, cumpliendo con las líneas de respeto y responsabilidad para con la humanidad y/o medio ambiente.

3.2. Sistema de variables

3.2.1. Variables principales

A. Evaluar las características físico-químicas de suelos, colectados en plantaciones de *Coffea arabica* L. bajo diferentes condiciones edafoclimáticas de la región San Martín.

Características físico-químicas de suelos:

- % Arena
- % Arcilla
- % Limo
- Clase textural
- pH
- C.E.
- Cation Ca
- % Materia orgánica
- Nitrógeno
- Fósforo
- Potasio
- Capacidad de Intercambio catiónico
- Cation Ca
- Cation Mg
- Cation K
- Cation Na
- Cation Al
- Al +3 + H+1
- Saturación Base.

B. Evaluar el efecto de las características físico-químicas del suelo en la colonización micorrízica de plántulas de *Coffea arabica* L. inoculadas con diferentes especies de hongos micorrízicos Arbusculares nativos.

- Porcentaje de colonización micorrízica.

C. Evaluar el efecto de las características físico-químicas del suelo sobre los parámetros morfológicos, fisiológicos y enzimáticos en plántulas de *Coffea arabica* L., inoculadas con diferentes especies de hongos micorrízicos arbusculares nativos.

• Altura de la Planta.	• Clorofila.
• Diámetro del Tallo.	• N, P, K en hojas.
• Pares de hojas	• Actividad de la enzima Catalasa (CAT).
• Área foliar.	• Actividad de la enzima Succinato deshidrogenasa. (SDH).
• Materia fresca de la parte aérea.	• Actividad de la enzima Glucanasa. (GLU).
• Materia fresca de la parte radicular.	
• Materia seca de la parte aérea.	
• Materia seca de la parte radicular.	

3.3. Procedimiento de la investigación

3.3.1. Evaluar las características físico-químicas de suelos, colectados en plantaciones de *Coffea arabica* L. bajo diferentes condiciones edafoclimáticas de la región San Martín.

A. Colecta de suelo rizosférico

La colecta de suelo rizosférico se realizó en plantaciones de café (> 2 años), ubicadas en las provincias de Lamas, San Martín, Rioja y El Dorado, pertenecientes al departamento de San Martín. Por cada localidad se identificó una plantación de café para colectar 200 kg de suelo (Figura 2).

Para la colecta, se ubicaron 20 puntos al azar y con una pala previamente esterilizada se obtuvieron 10 kg de suelo. Se trabajó con los primeros 15 cm del perfil del suelo, evitando dañar las raíces de las plantas de *Coffea arabica* L. Todas las plantaciones fueron georreferenciadas con un GPS (Tabla 2).



Figura 2

Proceso de colecta de muestras biológicas en plantaciones de café, distrito de Rumisapa, provincia de Lamas, región San Martín.

Nota: A. Georreferenciación del punto de muestreo. B. Colecta de suelo rizosférico de plantaciones de café.

B. Pre-tratamiento de suelo rizosférico

Para poder utilizar el suelo rizosférico en el desarrollo experimental de la investigación, se precisó realizar un pretratamiento que involucró las siguientes actividades (Figura 3):

- Secado del suelo a temperatura ambiente, seguido de una trituration mecánica. Esta última etapa fue necesaria para tamizar el suelo y eliminar piedras, raíces u otros materiales innecesarios.
- Esterilización mediante tratamiento térmico. Para ello, se colocó el suelo en sacos de yute resistentes a altas temperaturas y se llevó a la autoclave durante 1 hora a 121°C. Este proceso se repitió tres veces en tres días consecutivos. Al finalizar, se dejó secar a temperatura ambiente durante 3 semanas, con el fin de eliminar la humedad y permitir la volatilización de metales presentes en el suelo.



Figura 3

Proceso de pre-tratamiento de suelo rizosférico.

Nota: A. Secado y trituration de suelo. B. Tamizado de suelo. C. Sacos de yute con suelo rizosférico tamizado. D. Autoclavado de suelo.

C. Análisis físico-químico del suelo

Se realizaron análisis físico-químicos al suelo rizosférico obtenido de los 4 puntos diferentes dentro de la región San Martín. Estos análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de análisis de suelos, aguas y foliares de la Universidad Nacional de San Martín.

Para ello, se procedió al almacenamiento de 300 gr de suelo en bolsas herméticas, etiquetando cuidadosamente cada bolsa para su posterior análisis. Los parámetros analizados incluyeron: porcentaje de arena, porcentaje de arcilla, porcentaje de limo, pH, conductividad eléctrica, porcentaje de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, capacidad de intercambio catiónico, catión calcio, catión magnesio, catión potasio, catión sodio, catión aluminio y saturación base (Figura 4).



Figura 4

Almacenamiento de muestras de suelo para análisis físico-químico.

3.3.2. Evaluar el efecto de las características físico-químicas del suelo en la colonización micorrízica de plántulas de *Coffea arabica* L. inoculadas con diferentes especies de hongos micorrízicos Arbusculares nativos.

A) Colecta y despulpado de semilla

Se realizó la colecta de semillas de café (Variedad Caturra) de 2 plantas sanas ubicadas en el distrito de San Roque de Cumbaza, provincia de Lamas, departamento de San Martín. Para la colecta se seleccionaron únicamente cereza madura, las cuales se llevaron al Laboratorio de Biología y Genética Molecular. Las cerezas maduras fueron despulpadas manualmente el mismo día de la colecta, hasta obtener semillas (~600) de

tamaño y color homogéneo, eliminando aquellas que presentaban diferencias morfológicas (Figura 5).



Figura 5

Zona de colecta de semillas de café de la variedad Caturra. (Distrito San Roque de Cumbaza)

B) Germinación de semillas

Las semillas recolectadas fueron sometidas a una desinfección utilizando hipoclorito de sodio (NaClO) al 5%. Posteriormente, se procedió al retiro de la testa de las semillas con la ayuda de una hoja de bisturí, con especial cuidado. La cama de germinación se preparó con arena estéril, y las semillas se colocaron a una profundidad de 2 cm antes de ser cubiertas con una capa superficial de arena. Para proporcionar la humedad necesaria, se llevó a cabo un riego inicial con agua destilada.

A continuación, se colocó una malla Rachel sobre la cama durante un período de 15 días con el propósito de reducir la exposición a la luz y fomentar el crecimiento de las raíces. Luego, se retiró la malla durante otros 15 días para favorecer el desarrollo de las plántulas de café. Además, se implementó un riego interdiario para mantener un nivel adecuado de humedad en el sustrato, tal como se muestra en la Figura 6.

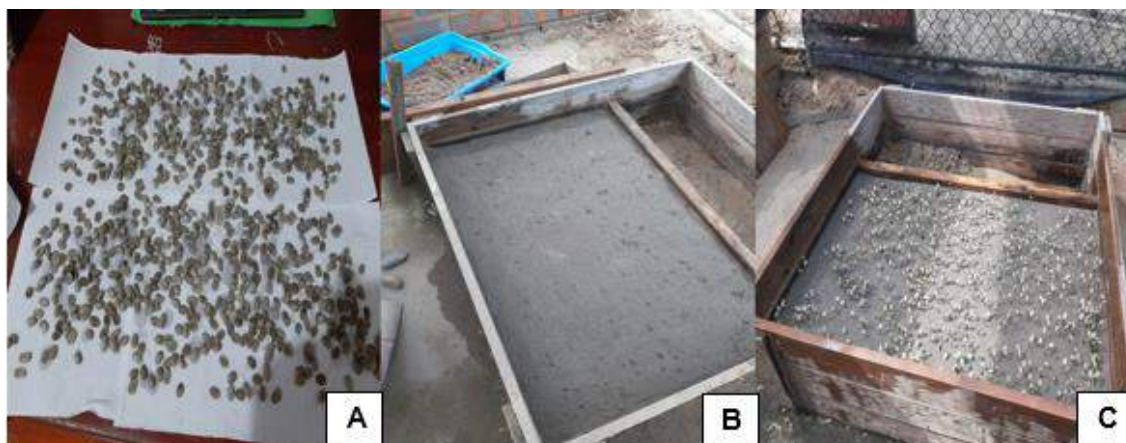


Figura 6

Proceso de germinación.

Nota: A. Semillas de café sin testa. B. Cama almaciguera con arena estéril. C. Germinación de semillas de café.

C) Instalación de experimento

Para la preparación del experimento (Figura 7), en primer lugar, se llenaron macetas estériles previamente desinfectadas con una solución de NaClO al 5 %. Estas macetas se etiquetaron de acuerdo con el lugar de origen del suelo (San Martín, Rioja, El Dorado, Lamas) y el tipo de inóculo de HMA utilizado (*Rhizogloium variable*, *Rhizogloium dunense* y el control).

Para determinar la cantidad precisa de inóculo a utilizar, se realizó un proceso de tamizado húmedo siguiendo el método de (Sieverding, 1991) y se llevó a cabo una centrifugación en una solución al 60 % de sacarosa, según lo indicado por Sieverding (1983). Posteriormente, se calculó la densidad de esporas por gramo y se definió la cantidad necesaria para alcanzar un inóculo de 1 000 esporas. El inóculo empleado se obtuvo del banco de cultivos puros de HMA ubicado en el Laboratorio de Biología y Genética Molecular de la UNSM. Trabajamos con dos especies específicas: *Rhizogloium variable* y *Rhizogloium dunense*. Se colocaron 1 000 esporas de HMA en cada maceta.

Se excavó un orificio de 10 cm de profundidad en el sustrato para alojar tanto el inóculo de HMA como el café germinado. Ambos elementos se colocaron con sumo cuidado para evitar la contaminación cruzada y el daño al café en proceso de germinación.

Una vez que se dispuso el inóculo y el café germinado en su lugar, se cubrieron con sustrato. Las macetas se organizaron según el diseño experimental aplicado mediante el análisis de componentes principales (DCA, por sus siglas en inglés). Finalmente, se llevó a cabo un riego abundante en las macetas que contenían café y se mantuvieron así durante un período de 5 meses.



Figura 7

Proceso de instalación de experimento.

Nota: A. Pesado de inóculo. B. Café germinado. C. Hoyo de 10 cm en macetas. D. Inoculación con HMA y repique de café. E. Riego de macetas sembradas. F. Experimento establecido.

D) Evaluación del porcentaje de colonización.

En la última evaluación, se extrajo el área radicular, se lavó para descartar residuos de sustrato, se seleccionaron raíces secundarias para su evaluación con ayuda de hojas de bisturí, y se colocaron en etanol al 70 % en tubos falcon de 50 ml (Figura 8).

Se realizó la tinción de raíces, para ello se aplicó KOH al 10 % a las raíces seleccionadas y se llevó a baño maría en 90 ° C, durante 60 minutos. Se procedió a colocar agua oxigenada 20 V y al pasar un minuto se enjuagaron las raíces con agua de caño cuidadosamente, para descartar el peróxido.

Una vez lavadas las raíces se agregó Tinta Parker acidificada durante 10 minutos en temperatura ambiente y 5 min en baño María. Pasado ese tiempo se descartó el excedente de tinte y se lavaron las raíces con lactoglicerol.

Finalmente se seleccionaron 20 segmentos de raíces y se observó en microscopio para la evaluación cualitativa según presencia de estructuras fúngicas (Trouvelot et al., 1985).

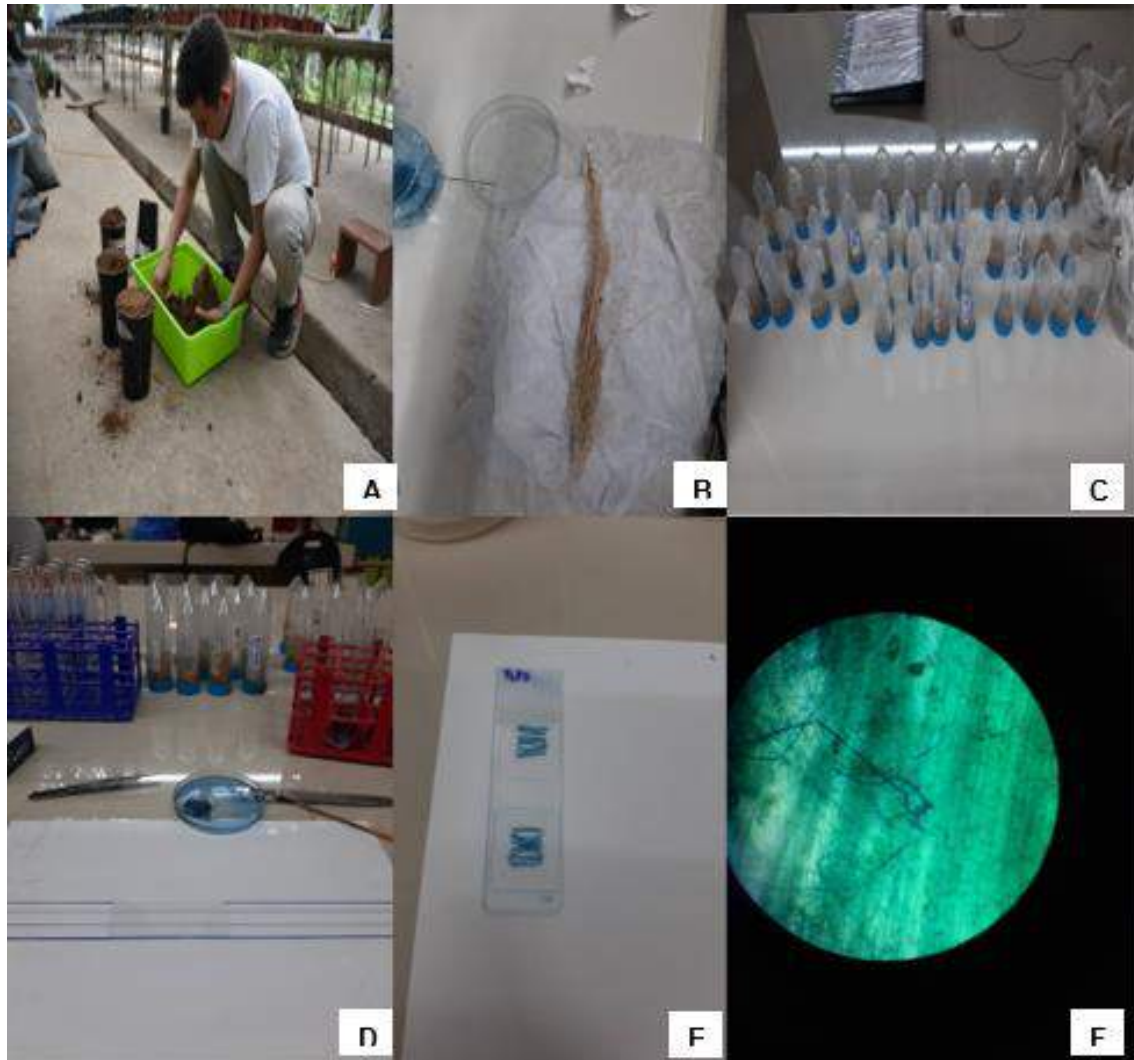


Figura 8

Proceso de tinción de raíces.

Nota: A. Obtención de raíces. B. Lavado de área radicular. C. Raíces seleccionadas en etanol al 70%. D. Raíces en lactoglicerol. E. Raíces segmentadas para evaluación. E. Evaluación final de estructuras fúngicas de HMA.

3.3.3. Evaluar el efecto de las características físico-químicas del suelo sobre los parámetros morfológicos, fisiológicos y enzimáticos en plántulas de *Coffea arabica* L., inoculadas con diferentes especies de hongos micorrízicos arbusculares nativos.

A) Análisis morfológicos

Se realizaron análisis morfológicos cada 15 días a partir del día 20 después de la siembra (Figura 9). Los análisis se dividieron en:

- **Altura de la planta:** Para este análisis se utilizó una regla de 30 cm para medir la altura de la planta, tomando como referencia la base de la parte aérea de la planta hasta el ápice.

- Diámetro del tallo: Se utilizó un vernier digital para medir el diámetro del tallo, tomando como referencia 2 cm a partir de la base.
- Número de hojas: Se contabilizó el número de pares de hojas.
- Área foliar: El área foliar se determinó de todas las hojas de una planta. Estas se escanearon y se determinó el área utilizando el programa FIJI (Fiji is just image), obteniendo los resultados en cm^2 .
- Peso fresco y seco de la biomasa aérea: Se colectó la parte del tallo y las hojas de las plantas de café. Se realizó un primer pesado, considerado peso fresco. Posteriormente, las muestras se llevaron a la estufa Termofisher a $50\text{ }^\circ\text{C}$. Después de 3 días, se procedió a pesar las muestras para obtener el peso seco.
- Peso fresco y seco de las raíces: Se colectó la parte de las raíces de las plantas de café. Se realizó un primer pesado, considerado peso fresco. Posteriormente, las muestras se llevaron a la estufa Termofisher a $50\text{ }^\circ\text{C}$. Después de 3 días, se procedió a pesar las muestras para obtener el peso seco.



Figura 9

Proceso de análisis morfológicos.

Nota: A. Plantas de café en vivero de LBG. B. Peso fresco de raíz. C. Peso fresco de área foliar. D. Conteo de pares de hojas. E. Medición de altura de plantas de café. F. Medición de área foliar.

B) Análisis fisiológicos

Se realizaron análisis fisiológicos al finalizar la última evaluación morfológica, los análisis se dividieron en:

- **Análisis de clorofila:** El análisis de clorofila se realizó en los 12 tratamientos establecidos, para ello se utilizó el medidor de clorofila SPAD-502 plus, se obtuvieron datos en unidades SPAD.
- **NPK en hojas:** El valor de nitrógeno, fósforo y potasio se realizó en el laboratorio del Instituto de cultivos tropicales (ICT) (ANEXO 2).

C) Análisis enzimáticos

Catalasa (CAT): Para la evaluación de la actividad de la enzima catalasa, se siguió el protocolo de Javelera (2013) con modificaciones para ello se prepararon las siguientes soluciones stock:

- **Buffer fosfato 50 mM pH 7:** Para preparar el buffer se siguió la siguiente línea, para ello se pesó 0.68 g de KH_2PO_4 50 mM y 1.1 g de NaHPO_4 50 mM y se aforo a 255 ml.
- **Buffer de extracción enzimática (BEE):** Para preparar el buffer se siguió la siguiente línea, se pesó 0.095 g de EDTA 1 mM, 0.26 g de PVP, se agregó 1.28 ml de Triton X-100 y se aforo a 255 ml.
- H_2O_2 (100 mM), se diluyó la solución final con el buffer fosfato.

Una vez preparadas las soluciones stock se realizó el siguiente proceso (Figura 10):

- Se pesó 200 mg de tejido fresco, para tritularlo en nitrógeno líquido, esto con el fin de obtener una extracción de material biológico. Una vez culminada la trituración se almacenó la muestra en $-80\text{ }^\circ\text{C}$ hasta su uso.
- A la muestra triturada se agregó 4 ml de BEE, se mezcló por inmersión hasta que se disuelva, después se centrifugó a 10 000 g durante 25 minutos a $4\text{ }^\circ\text{C}$. Se extrajo el sobrenadante.
- Se preparó una dilución 1:10 de sobrenadante en buffer fosfato, luego se colocó 400 μL de la dilución y 500 μL de buffer fosfato y 100 μL de H_2O_2 (al adicionar el peróxido inicia la reacción, por lo que fue necesario realizar inmediatamente la lectura).
- En la cubeta de lectura se agregó la solución final y se llevó a lectura de 240 nm de longitud de onda en nanodrop (equipo que funciona como espectrofotómetro).
- Se hicieron lecturas a los 0, 20, 30, 40, 60, 120, 180, 240 y 300 segundos.
- Se utilizó como blanco el buffer fosfato.

- Las absorbancias sirvieron para definir las unidades de Catalasa por mL. Para ello se utilizó la siguiente ecuación:

- $$U/mL: (Abs) / E \cdot b \cdot T) \cdot Vf$$

Donde:

ABS= cambio de absorbancia de la muestra

E=coeficiente de extinción del peróxido de hidrógeno ($0.036 \text{ cm}^2 / \mu\text{M}$)

b= espesor de la celda (1cm)

t= Tiempo (1 min)

Vf= Volumen final de la mezcla de reacción (1 ml)



Figura 10

Proceso de evaluación de actividad de la enzima Catalasa.

Nota: A Muestra biológica, raíz fresca. B. Pesado de muestra Biológica, hoja. C. Trituración en nitrógeno líquido. D. Adición de Buffer de extracción enzimática. E. Cuantificación de absorbancia en nanodrop (espectrofotómetro).

Succinato deshidrogenasa: Para la evaluación de la enzima succinato deshidrogenasa, se siguió el protocolo de Saito et al. (1993) con modificaciones, para ello se prepararon las siguientes soluciones stock:

- Buffer succinato deshidrogenasa: Para preparar el buffer o solución incubadora se siguió la siguiente línea. Se pesó 1.51 g de Tris HCL 50 mM pH 7.4, 0.012 de MgCl_2

0.5 mM, 0.250 g de Nitrotetrazolium Blue chloride (N6876-100MG) y se aforó a 250 ml con agua destilada.

- Hidrato de cloral al 10 %, se disolvieron 100 gr de hidrato de cloral en 1 L de agua.
- Fucsina acida 0.2 % W/V (2 gr /Litro en lactoglicerol).

Una vez preparadas las soluciones stock se realizó el siguiente proceso (Figura 11):

- Se lavaron las raíces y se cortaron en trozos de 1 a 1,5 cm de longitud.
- Las raíces seleccionadas se incubaron en la solución buffer a 25 °C durante 5 horas.
- Pasadas las 5 horas, se procedió a eliminar la solución incubadora, se añadió el hidrato de cloral, se incubó la mezcla por 60 minutos a 90 °C en baño maría.
- Se descartó el hidrato de cloral, y se cubrió con fucsina durante 2 días.
- Finalizada la tinción, las muestras se enjuagaron en lacto glicerol hasta la cualificación, para ello se cortaron las raíces teñidas en segmentos de 1 cm y se montaron en láminas portaobjeto, finalmente, se observaron en microscopio a 20x.
- Los resultados se reportaron en una escala de sin actividad, baja actividad y alta actividad. Se cualifico según la intensidad de la tinción, se realizó un promedio evaluando únicamente si se observó baja actividad o alta actividad, para determinar el % de actividad del succinato deshidrogenasa en las plantas de café según el tratamiento.

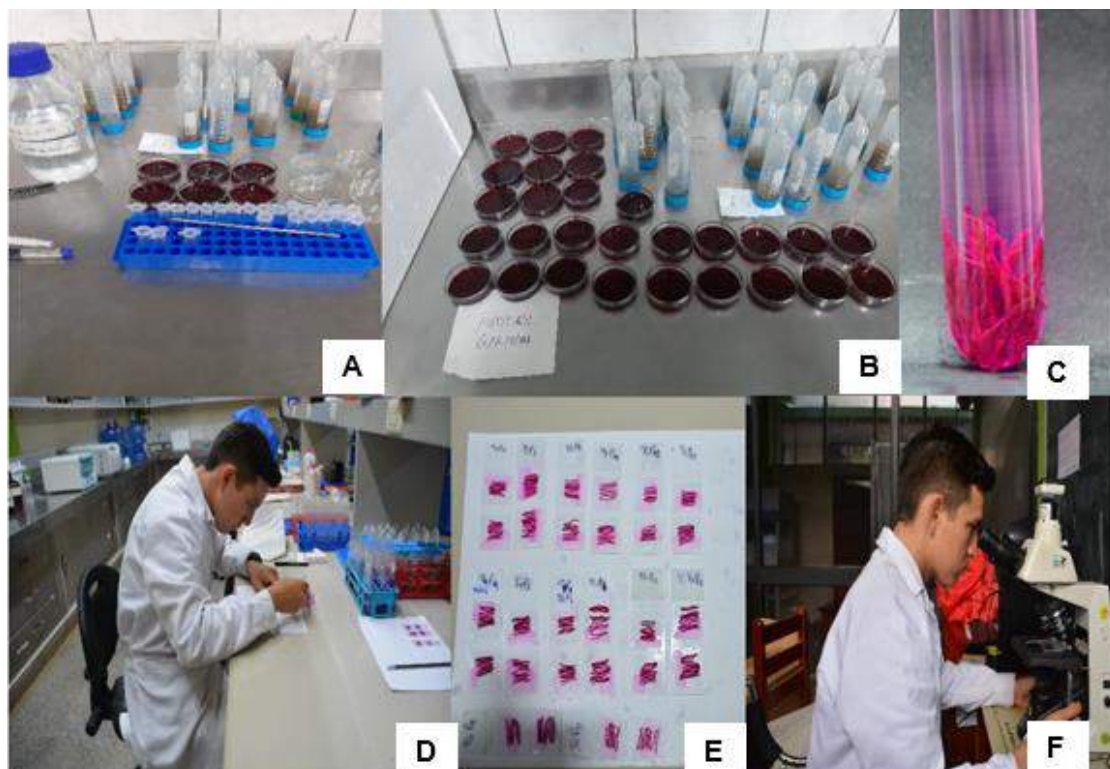


Figura 11

Proceso de evaluación de la actividad enzimática de la Succinato deshidrogenasa.

Nota: A. Selección de raíces. B. Tinción en Fucsina ácida. C. Lavado de raíces con lactoglicerol. D. Montaje de raíces teñidas en láminas portaobjetos. E. Láminas con raíces teñidas. F. Evaluación de raíces en microscopio a 20X.

Glucanasa: Para la evaluación de la enzima glucanasa, se siguió el protocolo de Nuero-Garcia (2019) con modificaciones, para ello se prepararon las siguientes soluciones stock:

- Reactivo de Somogyi: Se pesaron 0.8 g de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 4.8g de Na_2CO_3 anhidro, 3.2 g de NaHCO_3 , 2.4 g de Sal de Rochelle (tartrato de sodio y potasio) y 3.6 g de Na_2SO_4 . Se disolvió en agua y almacenó en frasco ámbar a 4 ° C.
- Reactivo de Nelson: Se pesó 12.5g $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ y 1.5g de $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Se disolvió en 225 ml de agua destilada. Se agregó y mezcló cuidadosamente 10.5 ml de H_2SO_4 concentrado. También, se colocó $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ previamente disuelto en 12.5 ml de H_2O . Finalmente, se mezcló y colocó en una incubadora a 37 °C durante 24 a 48 horas.
- Extracto crudo: Para la extracción cruda de las muestras se trituro el tejido en nitrógeno líquido, se agregó buffer McIlvaine 100 mM, pH 6.8 (Buffer citrato-fosfato) y se centrifugó a 15000 gravedades durante 30 min a 4 °C. Finalmente, se recuperó el sobrenadante y guardó en -40 °C hasta su uso.

Una vez preparadas las soluciones stock se realizó el siguiente proceso (Figura 12):

- Se tomaron 100 ul de extracto crudo y se mezcló con 900 ul de laminaria al 0.09 % diluida en acetato de sodio 0.1 M, pH 6.8 (usar buffer citrato fosfato en lugar de extracto como blanco).
- Se incubó a 35° por 90 min a 350 rpm.
- Se añadió 1 ml del reactivo de Somogyi (se preparó en tubos de ensayo).
- Se calentó a 100°C por 15min. Se espero a que enfríe.
- Finalmente se añadió 1 ml del reactivo de Nelson. Y en el momento se realizó la lectura a 520 nm, 610 nm y 660 nm en espectrofotómetro.
- También se hizo una curva de calibración utilizando glucosa como estándar: Para la curva de calibración se tomaron las siguientes concentraciones 3 mM, 2.5 mM, 2 mM, 1.5 mM, 1 mM y 0.8 mM, para ello se tomo un volumen final de 1000 ul.

Con los resultados obtenidos, se determinó la concentración de glucosa interpolando con la ecuación de la curva de calibración de glucosa.

Calcular la concentración de enzima mediante la siguiente formula:

$$\text{Concentración enzimática (U/ml)} = (\text{Producto GLU (ul/ml)} \times \text{Vol reacción [ml]}) / (\text{Tiempo reacción min} \times \text{Vol extrac [ml]})$$

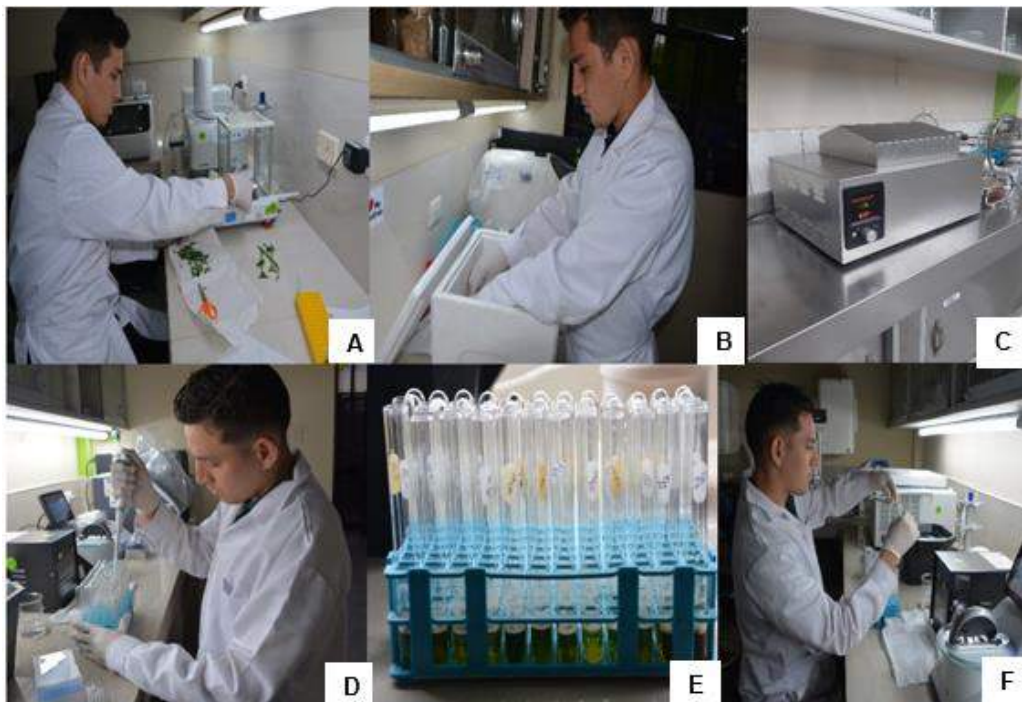


Figura 12. Proceso de evaluación de la enzima glucanasa.

Nota: A. Selección de muestras de hojas o raíz para obtener el extracto. B, Trituración en nitrógeno líquido. C. Incubación en baño María. D. Adición de reactivo nelson, E. Curva de calibración. F. Llenado de cubeta para evaluación en nanodrop.

3.3.4. Diseño experimental

El presente trabajo de investigación tuvo un diseño experimental del tipo DCA, con un arreglo bifactorial AxB. El factor A estuvo conformado por los cuatro tipos de suelo de diferentes localidades, mientras que el factor B incluyó dos especies de HMA nativos y un grupo control. En total, se establecieron 12 tratamientos, cada uno con 15 repeticiones, lo que conformó un total de 180 unidades experimentales para toda la evaluación. Las cepas de HMA debidamente identificadas fueron proporcionadas por el Laboratorio de Biología y Genética Molecular de la FCA, UNSM, bajo la supervisión del Ing. Mike Anderson Corazón Guivin. El muestreo de suelo se llevó a cabo en cuatro provincias: San Martín, Lamas, El Dorado y Rioja.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación de las características físico-químicas de suelos, colectados en plantaciones de *Coffea arabica* L. bajo diferentes condiciones edafoclimáticas de la región San Martín

Los resultados de los análisis físico-químicos realizados a los suelos de cada localidad, se muestran en la tabla 3 (ANEXO 1).

Tabla 3

Resultados de análisis físicoquímicos de suelo de diferentes puntos de la región San Martín

Concepto	San Martín	Rioja	Lamas	El Dorado
Arena (%)	33.25	52	25.2	49
Arcilla (%)	32	19	42.25	32
Limo (%)	34.75	29	32.55	19
Clase textual	Franco Arcilloso	Franco Arenoso	Arcilla	Franco Arcilloso Arenoso
pH	6.12	4.02	5.43	6.55
C.E. (uS/cm)	152.2	170.1	115.3	100.2
M.O. (%)	2.56	2.45	2.21	3.16
N (%)	0.1	0.1	0.1	0.1
P (ppm)	8.45	4.25	6.12	7.45
K (ppm)	145.23	85.23	102.32	163.25
CIC	7.5	7.2	6.1	8.5
Ca ⁺² (meq/100g)	6.56	4.23	5.21	7.42
Mg ⁺² (meq/100g)	0.35	0.12	0.23	0.45
K ⁺ (meq/100g)	0.4	0.2	0.3	0.4
Na ⁺ (meq/100g)	0.2	0.1	0.2	0.2
Al ⁺³ (meq/100g)	0	2.53	0.23	0
Al ⁺³ + H ⁺¹ (meq/100g)	0	3.78	0.45	0
% Sat. Bas.	100	65	96	100
%Aci. Inter	0	52.51	7.36	0
Altura (msnm)	690	968	705	420

Los resultados obtenidos de los análisis físico-químicos de los suelos recolectados en cuatro localidades de la región de San Martín revelan variaciones significativas en las características edafoclimáticas entre las diferentes ubicaciones. Es esencial destacar que tanto los factores químicos como biológicos del suelo tienen un impacto significativo en la calidad del café (Fajardo & Sanz, 2003).

En términos de textura del suelo, se observa que las localidades de San Martín y Lamas presentan un porcentaje más alto de limo, mientras que Rioja y El Dorado tienen una mayor proporción de arena y arcilla, respectivamente. Estos resultados son similares con los mencionados por Díaz (2022), quien encontró que los suelos de Buenos Aires, Chontal, Cordillera Andina, San Roque, Santa Rosa y Shamboyacu sectores dentro de la región de San Martín presentaban suelos con mayor porcentaje de arena, siendo suelos Franco Arcilloso Arenoso. Estas diferencias en la composición textural pueden influir en la capacidad de retención de agua y nutrientes del suelo, así como en la facilidad de labranza y drenaje.

El suelo de Lamas, al ser arcilloso, sugiere tener un drenaje deficiente, mientras que el de Rioja, con una textura franco arenoso, muestra un mejor drenaje. Por lo tanto, los suelos de San Martín (franco arcilloso) y El Dorado (franco arenoso arcilloso) podrían ser los más adecuados para el crecimiento del café. Coincidiendo con lo expuesto por Sánchez (2013), quien indica que la textura del suelo juega un papel crucial en la calidad del café, ya que se recomienda suelos con un buen drenaje. Esto facilita el flujo de agua en el suelo, mejorando así la disponibilidad de nutrientes, el desarrollo de las raíces y la actividad microbiana.

En cuanto al pH del suelo, se encuentra que Rioja tiene el valor más bajo (4.02), indicando una acidez relativamente alta, mientras que El Dorado tiene el pH más alto (6.55), lo que sugiere una alcalinidad moderada. De igual manera, se observa una diferencia en los resultados obtenidos por Díaz (2022), quien muestra que Shamboyacu presentó un suelo muy ácido (3.98) y Buenos Aires el más alcalino (7.54). Esta diferencia puede ser propia del suelo o por manejos agrícolas. Estas variaciones en el pH pueden afectar la disponibilidad de nutrientes para las plantas y la actividad microbiana en el suelo.

El pH del suelo es un parámetro crítico en el cultivo de café, ya que se recomienda que esté en el rango de 5.5 a 6.5 (OIRSA, 2000). Esto favorece la disponibilidad de nutrientes para la planta. Siavosh (2016) señala que un aumento en el pH del suelo puede disminuir la conductividad de intercambio iónico, lo que afecta la fertilidad del suelo. Únicamente el suelo de Rioja se aleja de la gama recomendada, posiblemente debido a varios factores, incluida la fertilización en zonas agrícolas (Raij, 1983).

En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), se observa que El Dorado tiene el valor más alto (8.5), lo que sugiere una mayor capacidad del suelo para retener y liberar nutrientes para las plantas. Esta mayor capacidad de intercambio catiónico puede estar relacionada con el contenido más alto de arcilla en El Dorado, que tiende a

tener una mayor capacidad de retención de nutrientes. De acuerdo con Andrews et al. (2004) y Eingerberg (2006), un CIC menor a 4 cmol/kg se considera bajo, mientras que un rango de 4 - 8 se clasifica como moderadamente bajo. Los resultados de esta investigación muestran valores de CIC para San Martín de 7.5, Rioja de 7.2, Lamas de 6.12 y El Dorado de 8.5, lo que sugiere que, en todos los casos, el CIC se considera moderadamente bajo. Esto podría plantear desafíos para la producción de café, siendo los Hongos Micorrizicos Arbusculares una posible solución frente a este problema.

En relación al porcentaje de saturación base, todos los suelos presentaron valores superiores al 60%, lo cual es óptimo para el cultivo de café. Estos resultados indican que existe una buena lixiviación de bases cambiables. Sin embargo, en relación con el aluminio, es importante destacar que, aunque el café pueda tolerar niveles elevados de este catión cambiante, se espera que no supere los 0.3 cmol/kg, ya que la presencia excesiva de aluminio puede inhibir la división celular y afectar negativamente el crecimiento de las raíces (Gutiérrez & Escobar, 2015). Esto sugiere que el suelo de Rioja no sería adecuado para obtener un buen rendimiento en el cultivo de café debido a la presencia elevada de aluminio.

En términos de fertilidad del suelo, se observa que El Dorado tiene el contenido más alto de materia orgánica (3.16%) y el nivel más alto de potasio (K ppm = 163.25), lo que puede indicar una mayor capacidad de retención de nutrientes y una mayor actividad biológica en el suelo. Por otro lado, Rioja muestra los resultados obtenidos de los análisis físico-químicos de los suelos recolectados en cuatro localidades de la región de San Martín revelan variaciones significativas en las características edafoclimáticas entre las diferentes ubicaciones. Es esencial destacar que tanto los factores químicos como biológicos del suelo tienen un impacto significativo en la calidad del café (Fajardo & Sanz, 2003).

Es importante mencionar que esta es una interpretación inicial de los resultados de los análisis fisicoquímicos del suelo. La relación entre estos resultados y la capacidad de los hongos micorrízicos arbusculares se abordará en los objetivos específicos 2 y 3, ya que estos parámetros son cruciales para la actividad de las comunidades de hongos micorrízicos y pueden verse influenciados por factores bióticos y abióticos (Torres-Arias et al., 2017).

4.2. Evaluar el efecto de las características físico-químicas del suelo en la colonización micorrízica de plántulas de *Coffea arabica* L. inoculadas con diferentes especies de hongos micorrízicos Arbusculares nativos.

Se determinó la colonización micorrízica de los tratamientos establecidos en vivero (Tabla 4), estos resultados se correlacionaron con las características físico-químicas del suelo, para ello se realizó el análisis según el modelo de Pearson usando la función *corh.test* y *corrplot* de los paquetes de datos *rio* y *corrplot* en el software R.

Tabla 4
Resultados de porcentaje de colonización

Suelo	HMA	Porcentaje de colonización
San Martin	<i>Control</i>	0 %
Rioja	<i>Rh. dunense</i>	5 %
Lamas	<i>Rh. variabile</i>	72.5 %
El Dorado	<i>Rh. variabile</i>	70 %
San Martin	<i>Rh. dunense</i>	55.83 %
Rioja	<i>Control</i>	0
Lamas	<i>Rh. dunense</i>	70 %
El Dorado	<i>Rh. dunense</i>	77.92 %
San Martin	<i>Rh. variabile</i>	52.08 %
Rioja	<i>Rh. variabile</i>	5.83 %
Lamas	<i>Control</i>	0
El Dorado	<i>Control</i>	0

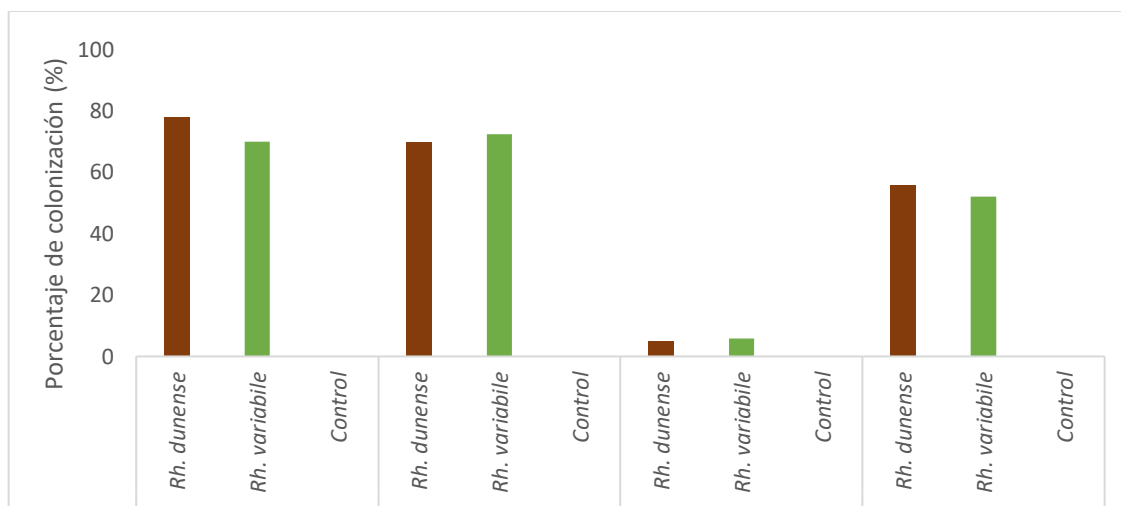


Figura 13

Porcentaje de colonización de *Coffea arabica* L. en diferentes tipos de suelo.

La evaluación de la colonización micorrízica indica que, si hubo interacción entre el hongo micorrízico y la planta, en este caso se observaron diferentes escenarios, en los controles no se observó colonización, lo que indica que se dio un buen manejo del experimento para evitar contaminaciones cruzadas, además de que verifica que la esterilización del sustrato fue efectiva (Figura 13). Para el suelo de San Martín se observa que la especie *Rh. dunense* presenta una colonización de 55.83 % lo que no es muy diferente para la especie *Rh. Variabile* con 52.08 %. Para el suelo de Rioja se ve una baja actividad micorrízica para ambas especies, el suelo de Lamas presenta 72.50 % para *Rh. variabile* y 70 % para *Rh. dunense*, en el caso del suelo de El Dorado presentó una colonización de 70% para *Rh. variabile* y 77.92 % *Rh. dunense*. Frente a esto se realizó un análisis de correlación para identificar que factor influye en la colonización (Figura 14).

Para la correlación de Pearson efectuada entre las características físico-químicas del suelo y la colonización, se debe de comprender, que la proximidad a la unidad indica una correlación directa, y la proximidad a -1 indica una relación indirecta. Entonces, según el análisis realizado se observa que la colonización tiene una relación directa con el % de arcilla en el suelo, con la saturación base, la concentración de P, Ca y Mg; y una relación indirecta con el % de arena y limo, aluminio, acidez intermedia, y la conductividad eléctrica.

Se ha identificado al fósforo (P) como el principal factor para promover o inhibir el desarrollo de la colonización micorrízica, el uso de fertilizantes fosfatados reduce la colonización, riqueza de HMA (Carmenzind et al., 2014). En otras investigaciones se ha comprobado que la presencia de P reduce la colonización de HMA (Cwala et al., 2010).

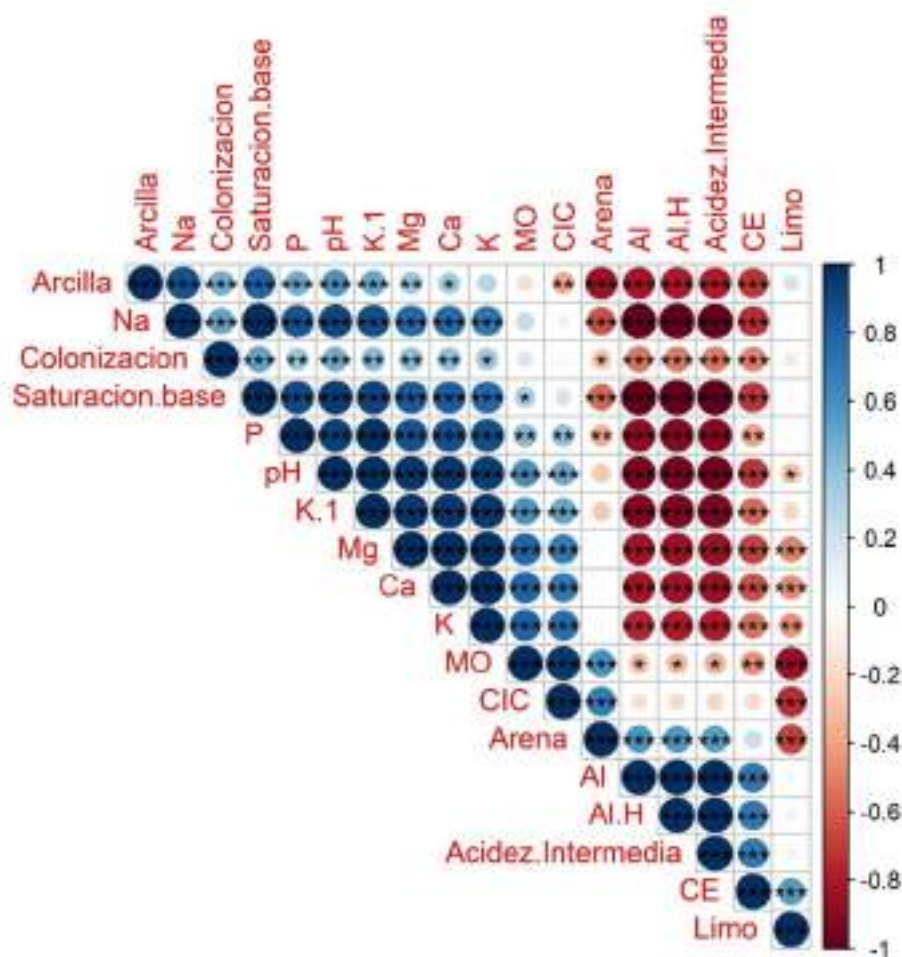


Figura 14

Análisis de correlación de Pearson de los parámetros físico químicos de suelo con la colonización micorrízica.

Nota: Valores de significancia * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$) y *** ($p < 0.001$).

Estos resultados discrepan de los obtenidos por Hernández-Acosta et al. (2020), quienes informaron una colonización de 9.7 % y 34.32 % en café utilizando *Rh. aggregatus* y un consorcio micorrízico. Esto podría deberse a la concentración de fósforo de 33 ppm, ya que, como se mencionó anteriormente, una alta concentración de fósforo disminuye la actividad micorrízica. Por otro lado, Díaz Torres (2022) encontró una colonización del 62.13 % en Buenos Aires, 72.12 % en Chontal, 82.63 % en Cordillera Andina, 74.14 % en San Roque, 56.13% en Santa Rosa y 82.79% en Shamboyacu. En este caso, es importante señalar que no se encontró una relación directa con la concentración de fósforo o el pH. Esto posiblemente se deba a que el estudio se realizó con muestras obtenidas in situ, lo que sugiere que las diferentes especies presentes en el suelo pueden lograr una colonización adecuada a pesar de las características mencionadas.

En esta investigación se muestra una relación directa con el fósforo, lo que significa que no hay inhibición de la colonización por este nutriente, el suelo de San Martín que tiene la concentración de P más alta (8.45 ppm) obtuvo una colonización de 55.83 % para *Rh. dunense* y 52.08 % para *Rh. variable*, en el caso de Lamas y el Dorado presentan concentraciones de 6.12 y 7.45 ppm respectivamente, y colonización de 70 - 77 % para ambas especies, el suelo de Rioja que presenta la concentración más baja de P (4.25 ppm) y que según otros autores la colonización debería ser mayor presenta una colonización del 5 %, lo que difiere con Kowalska et al. (2015) quien comparó la colonización de HMA en dos concentraciones diferentes de P, en 0.01 mM se observó 60-66% de colonización y en 0.9 mM la colonización se redujo a 10.70 %, resaltando la influencia del Fósforo en la colonización micorrízica.

Posiblemente estos resultados sean por el pH del suelo, ya que cada especie de HMA tiene un comportamiento diferente a diferentes niveles de pH, por ejemplo, Rohyadi et al. (2004), determinaron que la especie *Gigaspora margarita* presentaba una capacidad de colonización mayor en pH bajos (4.5), en cambio la especie *Glomus etunicatum* disminuyó su capacidad de colonización en suelos ácidos. Esto nos puede indicar que las especies del género *Glomus* trabajan mejor en pH no ácidos, como en este caso que se evaluaron las especies *Rh. variable* y *Rh. dunense*. Cada especie de HMA presenta una actividad diferente en su hospedero, depende mucho de la necesidad de la especie y de la planta (Leal et al., 2009).

4.3. Evaluar el efecto de las características físico-químicas del suelo sobre los parámetros morfológicos, fisiológicos y enzimáticos en plántulas de *Coffea arabica* L., inoculadas con diferentes especies de hongos micorrízicos arbusculares nativos.

Se realizaron distintos análisis morfológicos y fisiológicos en los distintos tratamientos realizados. Para ello se realizó un análisis ANOVA para cada evaluación, donde se involucró las especies utilizadas y los suelos empleados, utilizando el paquete de datos *Ramf* (Chiapello et al., 2019), en caso existiera diferencia significativa se aplicó el análisis post hoc Tukey.

A) Análisis morfológicos

❖ Altura de la planta

Se observó que existe diferencia significativa entre los tratamientos aplicados al café, tanto en la especie de HMA como en suelos de las localidades e interacción como se muestra en la Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7. Los valores más altos fueron mostrados por las plantas de café inoculadas con *Rh. dunense* con una altura media de 14.95 cm y el

suelo de San Martín tuvo mejores resultados con una media de 15.92 cm, en cuanto a la interacción se observa que el suelo de Lamas junto a *Rh. dunense* obtuvieron mejor resultado con una media de 18.2 cm. (Figura 15,16).

Tabla 5*Análisis de Varianza de altura de planta*

	GL	SC	CM	F	p-value	Sig.
HMA	2	572.1	286.06	52	2×10^{-16}	***
Localidad	3	444.8	148.26	27	2×10^{-16}	***
HMA * Localidad	6	789.6	131.6	24	2×10^{-16}	***
Residuo	168	926	5.51			

Tabla 6*Análisis Post Hoc de Tukey de altura de planta*

	Media	Sig.
<i>Rh. dunense</i>	14.95	A
<i>Rh. variabile</i>	14.26	A
Control	10.87	B
San Martín	15.92	A
Lamas	13.36	B
Dorado	12.31	BC
Rioja	11.86	C

Tabla 7*Análisis Post Hoc de Tukey de interacción especie y lugar en la altura de planta*

Lugar	HMA	Media	Sig.
Lamas	<i>Rh. dunense</i>	18.2	A
San Martín	Sin HMA	16.4	AB
San Martín	<i>Rh. variabile</i>	16.3	AB
San Martín	<i>Rh. dunense</i>	15.1	BC
Dorado	<i>Rh. dunense</i>	15	BC
Lamas	<i>Rh. variabile</i>	14.3	BCD
Dorado	<i>Rh. variabile</i>	14.1	BCD
Rioja	<i>Rh. variabile</i>	12.3	CD
Rioja	Sin HMA	11.8	D
Rioja	<i>Rh. dunense</i>	11.5	D
Dorado	Sin HMA	7.84	E
Lamas	Sin HMA	7.5	E

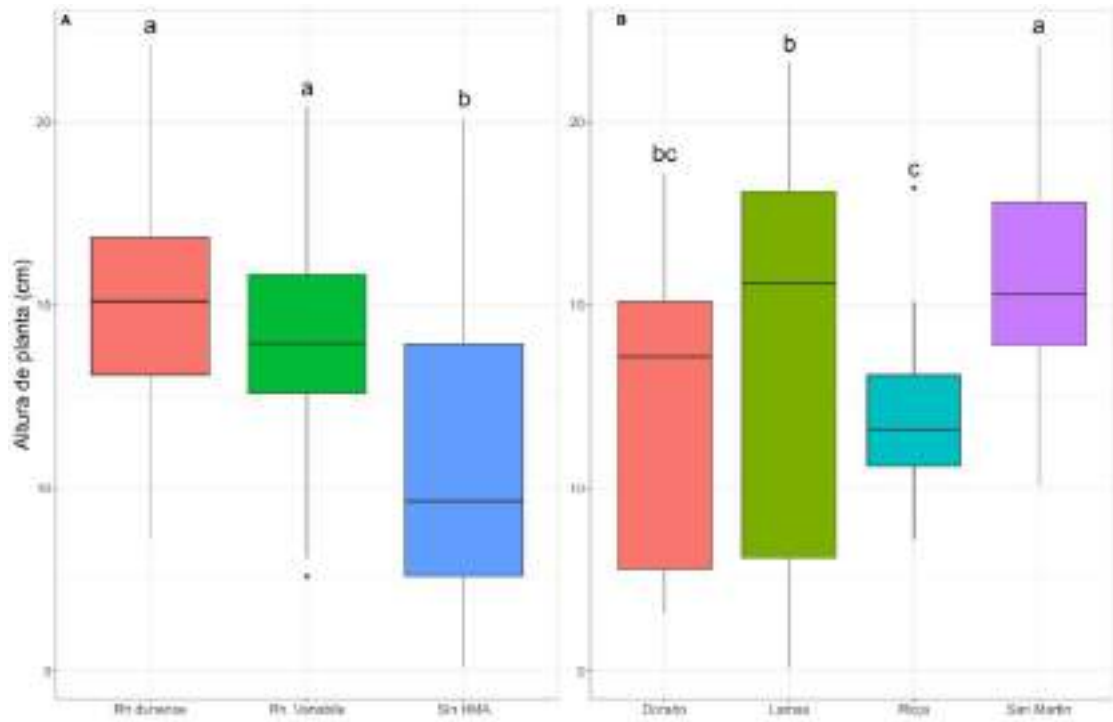


Figura 15

Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de altura.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

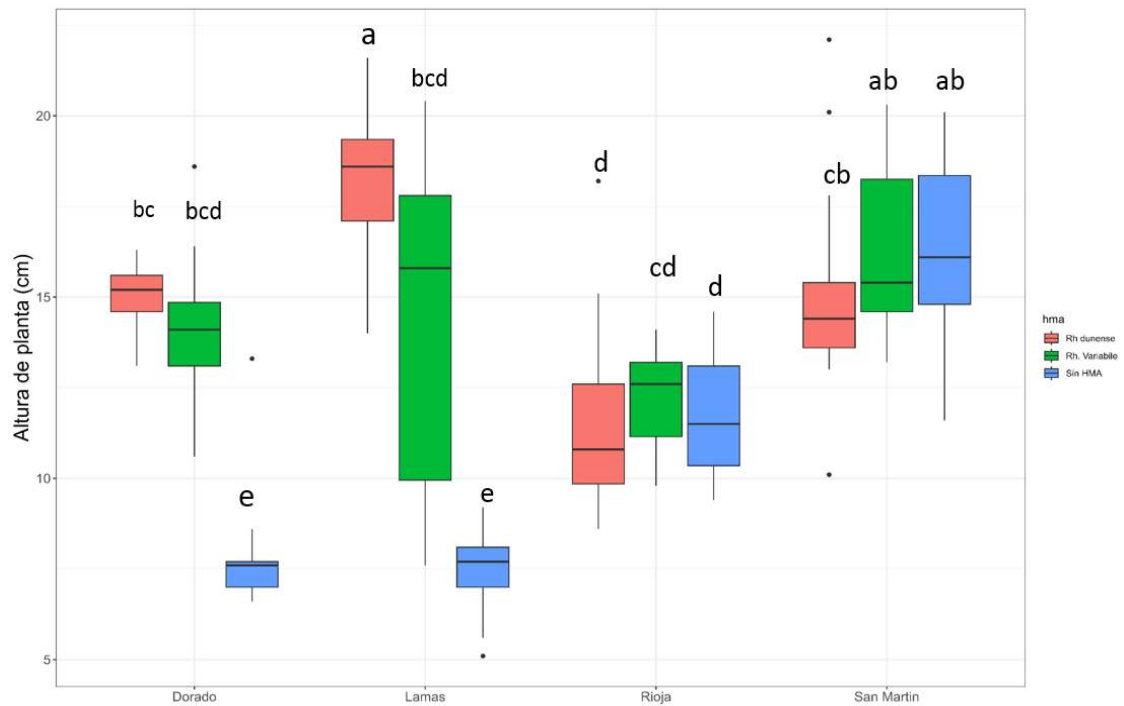


Figura 16

Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de la altura entre la interacción de HMA y lugar.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

En relación a la Figura 16, se observa que el tratamiento con *Rhizoglosum dunense* en el suelo de Lamas exhibió una respuesta superior en altura en comparación con otros tratamientos. Este comportamiento fue similar al tratamiento combinado de *Rh. dunense* y *Rh. variabile* en el suelo de San Martín. Por otro lado, los controles, representados por las plantas de café sin micorriza en los cuatro tipos de suelo, mostraron una respuesta menos favorable.

El suelo de San Martín reveló una similitud en la altura alcanzada por las plantas de café, ya estén micorrizadas o no. Esta similitud podría atribuirse a una mayor concentración de fósforo en este suelo en comparación con los otros tipos de suelo. Además, la colonización observada en este suelo fue menor en comparación con el suelo de Lamas y El Dorado, que presentaron una mayor colonización junto con una concentración de fósforo más baja. Es relevante destacar que el suelo en San Martín parece ser naturalmente propicio para el cultivo del café, mientras que el suelo en Lamas exhibe características que fomentan y potencian la actividad micorrízica, contribuyendo aún más al desarrollo óptimo de las plantas de café

Estos resultados respaldan hallazgos anteriores que indican una disminución en la actividad micorrízica debido a la presencia de fósforo. Además, se observó que las plantas de café inoculadas con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) mostraron un desarrollo de altura superior en comparación con las no inoculadas, lo que está en línea con los hallazgos de Smith & Read (2008), quienes sugieren que la colonización micorrízica mejora la absorción de nutrientes, lo que se refleja en un mejor desarrollo morfológico, como una mayor altura.

En cuanto a la comparación entre las especies de hongos micorrízicos, *Rhizoglosum dunense* y *Rh. variabile*, no se encontraron diferencias significativas en términos de altura de las plantas inoculadas. Sin embargo, se observó una diferencia significativa en relación con el tipo de suelo utilizado, siendo el suelo de San Martín el que mostró la mayor altura promedio, seguida por Lamas y El Dorado, mientras que el suelo de Rioja tuvo la menor altura promedio.

Estos hallazgos concuerdan con los estudios de Del Águila et al. (2018) y Trejo et al. (2011), quienes encontraron un aumento en la altura de las plantas tratadas con consorcios de hongos micorrízicos, especialmente en suelos con baja concentración de fósforo. Esto resalta la importancia de considerar la interacción entre los hongos micorrízicos y las características específicas del suelo en el cultivo de café, como se destaca en el estudio de Hernández-Acosta et al. (2021).

Además, el análisis realizado por Souza Cruz et al. (2020) sobre el *Rh. clarus* y *Acaulospora colombiana* en plantas de café respalda la eficacia del uso de hongos micorrízicos arbusculares en el desarrollo de plantas más altas, lo que coincide con los resultados obtenidos en esta investigación. Estos hallazgos refuerzan la importancia de considerar el uso de consorcios de hongos micorrízicos arbusculares para mejorar el rendimiento del cultivo de café.

❖ Diámetro del tallo

Se observó que existe diferencia significativa entre los tratamientos aplicados al café, tanto en la especie de HMA como en suelos de las localidades e interacción como se muestra en la Tabla 8, 9 y 10. Los valores más altos fueron mostrados por las plantas de café inoculadas con *Rh. dunense* con una altura media de 3.20 cm y el suelo de San Martín tuvo mejores resultados con una media de 3.18 cm, en cuanto a la interacción se observa que el suelo de San Martín junto a *Rh. variabile* obtuvieron mejor resultado con una media de 3.23 cm. (Figura 17,18).

Tabla 8

Análisis de Varianza del diámetro del tallo

	GL	SC	CM	F	p-value	Sig.
HMA	2	572.1	286.06	52	2×10^{-16}	***
Localidad	3	444.8	148.26	27	2.94×10^{-16}	***
HMA * Localidad	6	789.6	131.6	24	2×10^{-16}	***
Residuo	168	926	5.51			

Tabla 9

Análisis Post Hoc de Tukey del diámetro del tallo

	Media	Sig.
<i>Rh. dunense</i>	3.20	A
<i>Rh. variabile</i>	3.15	A
Control	2.41	B
San Martin	3.18	A
Lamas	2.69	B
Dorado	2.60	BC
Rioja	2.41	C

Tabla 10*Análisis Post Hoc de Tukey de interacción de HMA y lugar del diámetro del tallo*

Lugar	HMA	MEDIA	TUKEY
San Martín	<i>Rh. variable</i>	3.23	A
San Martín	Sin HMA	3.18	A
Lamas	<i>Rh.dunense</i>	3.15	AB
San Martín	<i>Rh.dunense</i>	3.13	AB
Dorado	<i>Rh.dunense</i>	2.99	ABC
Lamas	<i>Rh. variable</i>	2.85	BC
Dorado	<i>Rh. variable</i>	2.79	C
Rioja	<i>Rh.dunense</i>	2.46	D
Rioja	Sin HMA	2.39	D
Rioja	<i>Rh. variable</i>	2.38	DE
Lamas	Sin HMA	2.07	EF
Dorado	Sin HMA	2.02	F

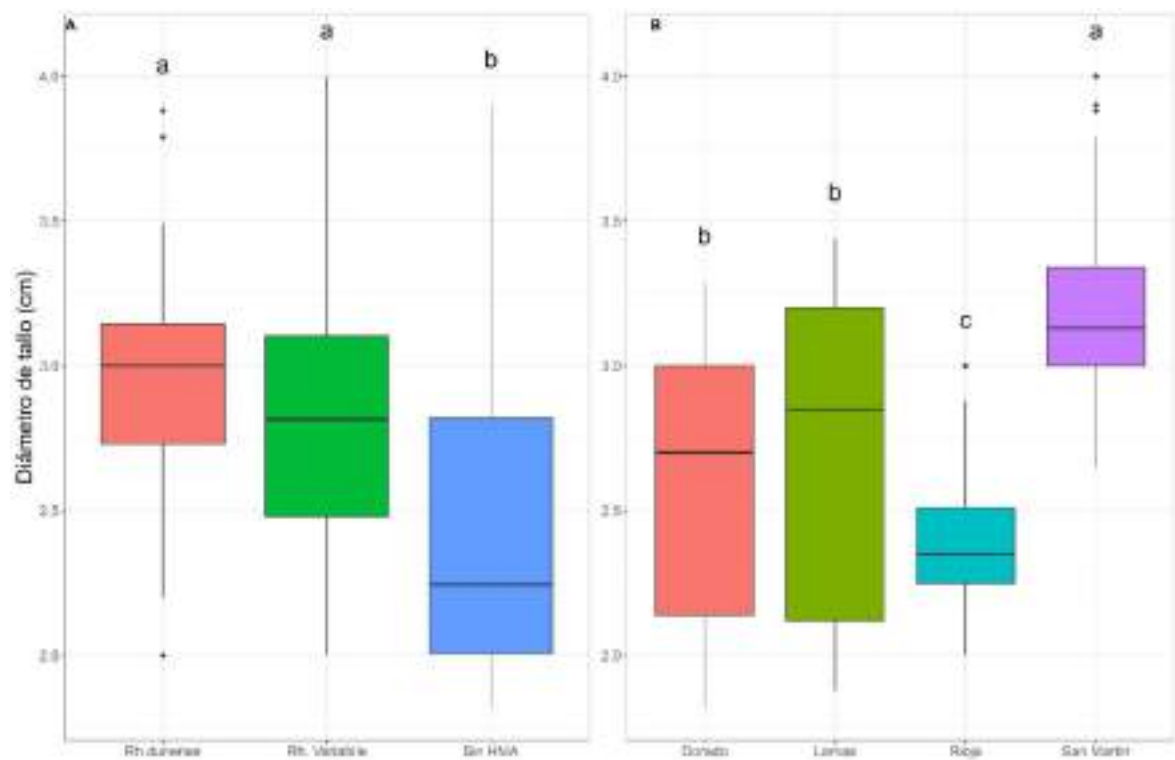
**Figura 17**

Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados del diámetro del tallo.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

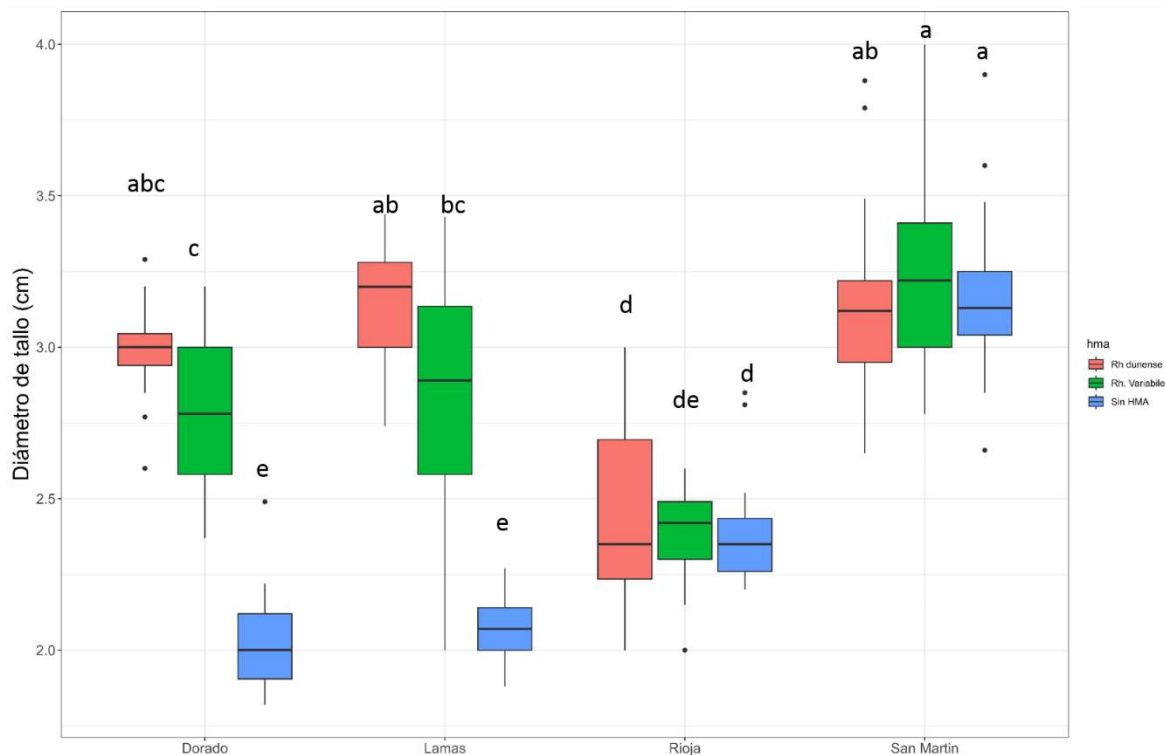


Figura 18

Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de diámetro entre la interacción de HMA y lugar.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

El café inoculado con *Rhizoglyphus dunense* exhibió un diámetro de tallo notablemente superior en comparación con los demás tratamientos. Aunque no se detectaron diferencias significativas entre especies, se evidenció una marcada disparidad con el grupo de control, resaltando así los beneficios asociados al uso de estos hongos para potenciar el desarrollo del café. Al analizar la interacción entre los tratamientos, la Figura 18 revela que el suelo de San Martín arrojó resultados superiores. Este fenómeno podría atribuirse, como se mencionó previamente, a la elevada concentración de fósforo en comparación con los otros suelos. Es importante destacar que el suelo de San Martín, cuando se inoculó con *Rh. variable*, demostró ser la combinación más efectiva, obteniendo una media de 3.23 cm, el mejor resultado entre todas las condiciones evaluadas.

No existen evaluaciones directas del diámetro del tallo en café; sin embargo, Sousa Cruz et al. (2019) determinaron que la combinación de dos especies de hongos micorrícicos arbusculares (HMA), *Acaulospora colombiana* y *Rhizoglyphus clarus*, produjo resultados superiores en comparación con el uso de cada especie de forma independiente en café.

Los hallazgos de esta investigación coinciden con los de Yang et al. (2014), quienes, al emplear *Funneliformis mosseae* o *Rhizoglosum intraradices*, observaron un mayor desarrollo en altura y diámetro de tallo en plantas de acacia negra colonizadas con HMA.

De manera similar, los resultados concuerdan con los de Chen et al. (2017), quienes señalan que el conjunto de especies *Claroideoglosum sp.*, *Funneliformis sp.*, *Diversispora sp.*, *Glomus sp.* y *Rhizoglosum sp.* mejoraron el desarrollo del diámetro del tallo en comparación con plantas no micorrizadas. Esta mejora se atribuye a la relación simbiótica entre hongo y planta, la cual impacta positivamente en el desarrollo y la absorción de nutrientes. Además, parámetros de crecimiento externos, como la altura de la planta, el diámetro del tallo y la producción de biomasa, actúan como indicadores del metabolismo interno de la planta, respaldando estos resultados (Ruscitti et al., 2017).

❖ Área foliar y pares de hojas

Área foliar

Los tratamientos evaluados en el presente estudio mostraron diferencia significativa para el área foliar de las plantas de café, mostrándose diferencia en los tratamientos, tanto en la especie de HMA como en suelos de las localidades e interacción como se muestra en la Tabla 11, 12 y 13. Los valores más altos fueron mostrados por las plantas de café inoculadas con *Rh. dunense* con una media de 25.28 cm² y el suelo de San Martín tuvo mejores resultados con una media de 30.64 cm², en relación a la interacción el suelo de San Martín con *Rh. variabile* tuvieron los mejores resultados con una media de 34.6 cm² (Figura 19 y 20).

Tabla 11

Análisis de Varianza del área foliar

	GL	SC	CM	F	p-value	Sig.
HMA	2	1070.6	535.3	107	2 x 10 ⁻¹⁶	***
Localidad	3	1519.6	506.5	101	2.94 x 10 ⁻¹⁶	***
HMA * Localidad	6	864.9	144.1	29	2 x 10 ⁻¹⁴	***
Residuo	48	240.6	5			

Tabla 12

Análisis Post Hoc de Tukey del área foliar

	Media	Sig.
<i>Rh. dunense</i>	25.28	A
<i>RH. variabile</i>	25.02	A
<i>Control</i>	16.19	B
<i>San Martín</i>	30.64	A
<i>Lamas</i>	21.09	B
<i>Dorado</i>	19.27	BC
<i>Rioja</i>	17.72	C

Tabla 13

Análisis Post Hoc Tukey de la interacción de HMA y tipos de suelo del área foliar

Lugar	HMA	MEDIA	TUKEY
San Martín	<i>Rh. variable</i>	34.6	A
San Martín	Sin HMA	30	AB
Lamas	<i>Rh. dunense</i>	29.3	BC
San Martín	<i>Rh. dunense</i>	27.4	BC
Dorado	<i>Rh. dunense</i>	26.2	BCD
Lamas	<i>Rh. variable</i>	23.5	CDE
Dorado	<i>Rh. variable</i>	22.1	DE
Rioja	<i>Rh. variable</i>	20.9	EF
Rioja	<i>Rh. dunense</i>	17.2	FG
Rioja	Sin HMA	15	GH
Lamas	Sin HMA	10.3	HI
Dorado	Sin HMA	9.46	I

Se observa que el inóculo de *Rh. dunense* tuvo mejores resultados que el inóculo de *Rh. variable*, sin embargo, no son diferentes estadísticamente, pero ambas si presentan una diferencia significativa con las plantas no inoculadas. El suelo de San Martín presento mejores resultados en área foliar y cantidad de hojas.

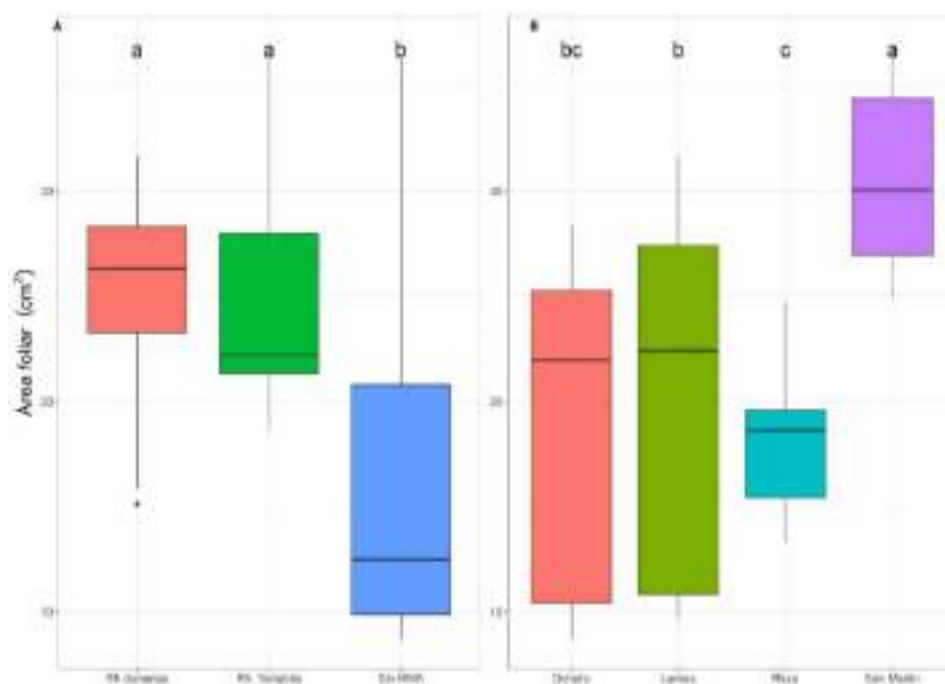
**Figura 19**

Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados del área foliar.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

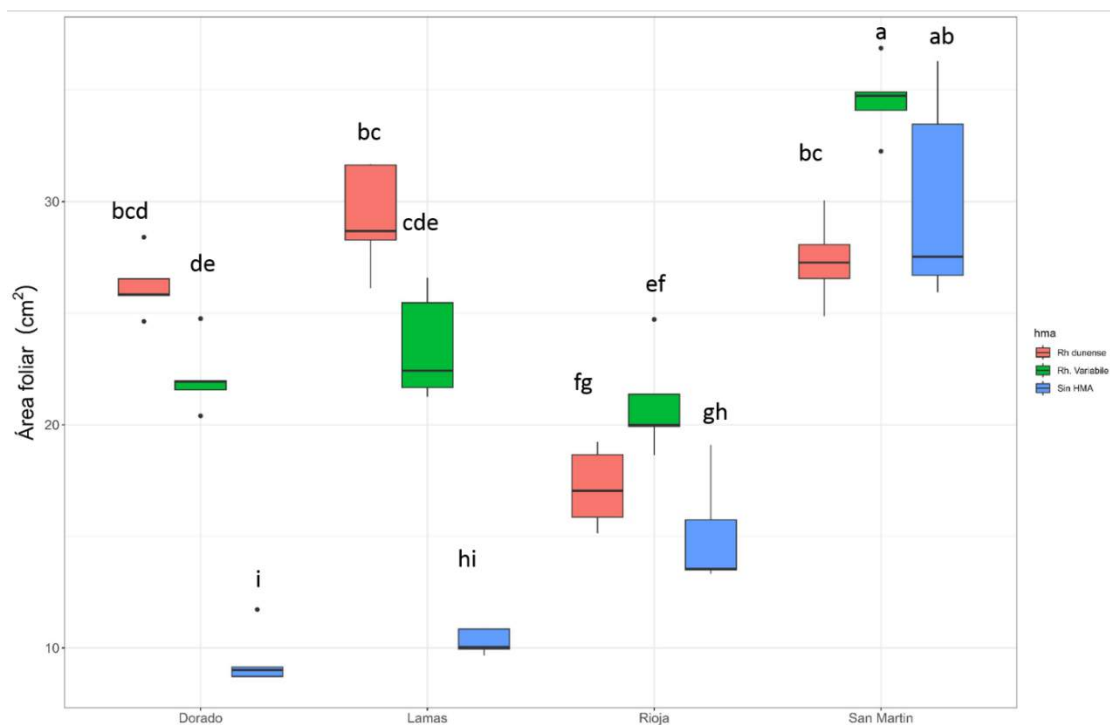


Figura 20

Gráfico de cajas del análisis ANOVA para interacción de HMA y tipo de suelo en resultados del área foliar.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Pares de hojas

El conteo de pares de hojas se realizó en cada evaluación durante 135 días, una vez realizado el conteo de pares de hojas se observó la poca diferencia que se produjo durante el desarrollo de la investigación (Figura 21), frente a ello se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con los datos de la última evaluación y como se observó diferencia significativa se realizó el análisis de Tukey ($p < 0,05$) (Tabla 14 y 15).

Tabla 14

Análisis de varianza de conteo de hojas

	GL	SC	CM	F	p-value	Sig.
HMA	2	7.63	3.81	14	2×10^{-16}	***
Localidad	3	41.39	13.79	51	2.94×10^{-16}	***
HMA * Localidad	6	18.32	3.05	11	2×10^{-16}	***
Residuo	168	45.6	0.27			

Tabla 15
Análisis Post Hoc de Tukey del conteo de pares hojas

	Media	Sig.
<i>Rh. dunense</i>	7.05	A
<i>Rh. variable</i>	6.96	A
Control	6.56	B
San Martin	7.60	A
Lamas	6.55	C
El dorado	6.33	C
Rioja	6.91	B

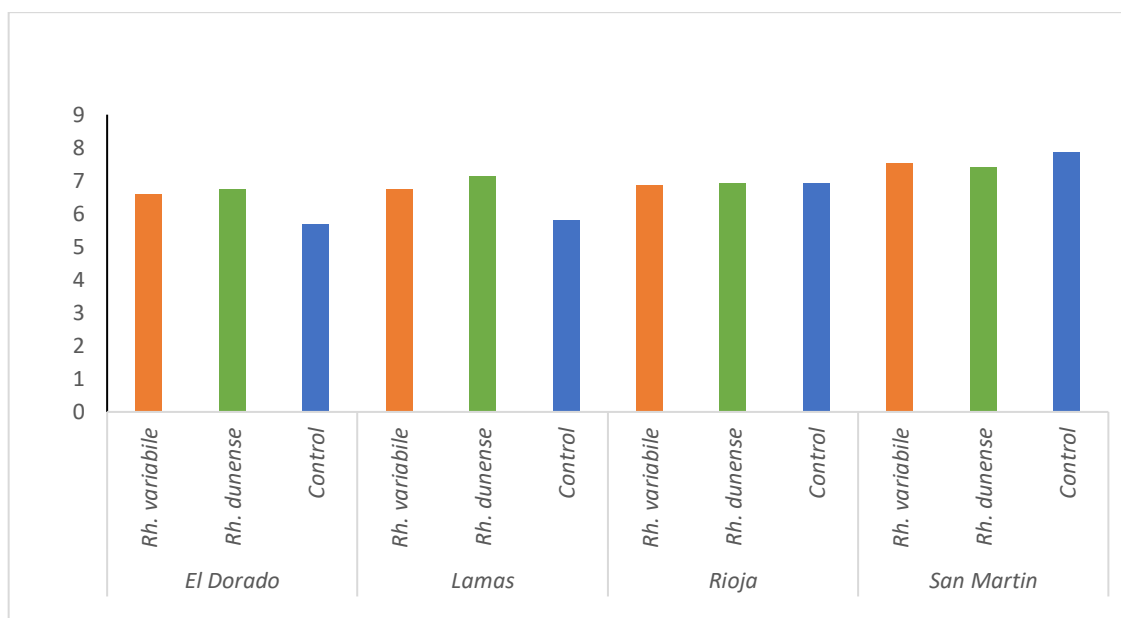


Figura 21

Efecto de inóculos de HMA sobre el número de pares de hojas en plantas de café durante 135 días.

Los resultados muestran una diferencia significativa entre las localidades, siendo el suelo de San Martín el más favorable con una media de 7.6 pares de hojas, mientras que el suelo de El Dorado registró una media ligeramente inferior de 6.33 pares de hojas. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre las especies de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) utilizadas; tanto *Rhizoglyphus dunense* como *Rhizoglyphus variable* obtuvieron medias similares de alrededor de 7 pares de hojas a los 135 días.

Los resultados sugieren que el suelo de San Martín es particularmente compatible con el desarrollo de las plantas de café en términos de cantidad de hojas, lo que puede indicar que sus características físico-químicas son especialmente adecuadas para este cultivo.

Estos hallazgos coinciden con estudios previos como el de Osorio et al. (2002), quienes encontraron que el uso de inóculos con HMA, como *Acaulospora colombiana*, aumentó la cantidad de hojas y el área foliar de las plantas de café. Este aumento en la cantidad de hojas y en el área foliar puede contribuir a mejorar la fotosíntesis y, por lo tanto, la producción de fotosintatos en el futuro, como sugieren Moreira et al. (2019).

La simbiosis micorrízica requiere una mayor cantidad de fotosintatos tanto para la planta como para el hongo, lo que puede resultar en un incremento en la cantidad de hojas, como se ha observado en diversos estudios (Rodríguez, 2009; Lagos, 2010; Sánchez de Prager, 2007).

❖ **Peso fresco y peso seco**

Se observa en la Tabla 16, 17 y 18, los resultados de peso fresco, seco de raíz y parte aérea, que las plantas de café inoculadas con *Rh. Variable* en el suelo de San Martín, muestran un mayor porcentaje de peso fresco y seco tanto de raíz como en la parte aérea (Figura 22).

Tabla 16

Análisis de varianza de peso fresco aéreo

	GL	SC	CM	F	p-value	Sig.
HMA	2	7.63	2.63	14	1.23 e-06	***
Localidad	3	41.39	11.65	51	1.15 e-13	***
HMA * Localidad	6	18.32	2.63	11	4.5E-04	***
Residuo	120	45.6	0.20			

Tabla 17

Análisis de varianza de peso fresco raíz

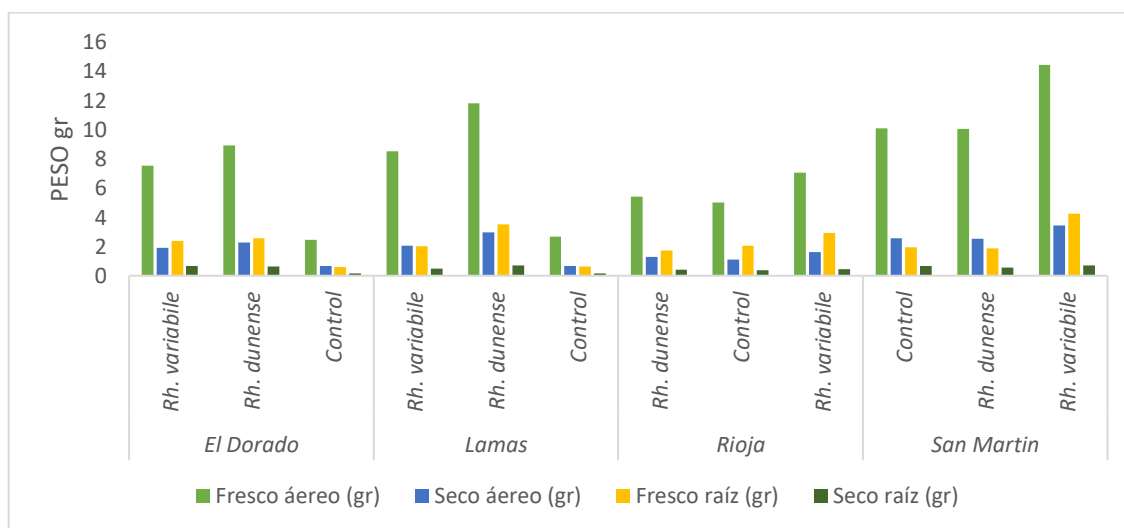
	GL	SC	CM	F	p-value	Sig.
HMA	2	7.63	3.82	14	2 x 10 ⁻¹⁶	***
Localidad	3	41.39	13.79	51	2.94 x 10 ⁻¹⁶	***
HMA * Localidad	6	18.32	3.05	11	2 x 10 ⁻¹⁶	***
Residuo	168	45.6	0.27			

En los resultados, se evidencia que las plantas de café inoculadas con *Rhizoglyphus variable* desarrollaron un mayor porcentaje de biomasa aérea y radicular, destacándose especialmente en el suelo de San Martín, donde se obtuvieron los mejores resultados. Por otro lado, para las plantas inoculadas con *Rhizoglyphus dunense*, se observa un mejor desempeño en términos de biomasa en el suelo de Lamas. Sin embargo, es importante destacar que las plantas de café sin inocular en el suelo de San Martín mostraron un rendimiento aún mejor en comparación con otras plantas de café con inoculación micorrízica. Esto sugiere que este suelo es especialmente propicio para el desarrollo del café.

Tabla 18

Resultados de peso fresco y seco

Suelo	HMA	Fresco aéreo (gr)	Seco aéreo (gr)	Fresco raíz (gr)	Seco raíz (gr)
El Dorado	<i>Rh. variabile</i>	7.54	1.9	2.38	0.68
	<i>Rh. dunense</i>	8.92	2.26	2.56	0.63
	Control	2.44	0.65	0.61	0.16
Lamas	<i>Rh. variabile</i>	8.5	2.04	2.00	0.50
	<i>Rh. dunense</i>	11.8	2.95	3.52	0.69
	Control	2.66	0.66	0.64	0.15
Rioja	<i>Rh. dunense</i>	5.42	1.29	1.74	0.40
	Control	5.02	1.11	2.07	0.38
	<i>Rh. variabile</i>	7.06	1.62	2.93	0.46
San Martin	Control	10.08	2.56	1.96	0.65
	<i>Rh. dunense</i>	10.04	2.54	1.86	0.54
	<i>Rh. variabile</i>	14.42	3.44	4.25	0.72

**Figura 22**

Peso fresco y seco en hojas y raíz.

Los resultados obtenidos revelan que las plantas de café micorrizadas exhiben una biomasa significativamente mayor en comparación con las no micorrizadas, destacándose especialmente el suelo de El Dorado y Lamas por potenciar esta actividad. Estos hallazgos están respaldados por el estudio de Trejo et al. (2011), quienes al utilizar consorcios micorrizcos observaron un aumento significativo en la biomasa tanto aérea como radicular, atribuido a la baja concentración de fósforo en el suelo.

Además, investigaciones como la de Thilagar y Bagyaraj (2015) encontraron que las plantas inoculadas con especies como *Fun. mosseae* exhibieron un mayor índice de biovolumen, rendimiento de frutos, absorción de fósforo y biomasa vegetal. Asimismo, Kumar et al. (2016) determinaron que las plantas micorrizadas experimentaron un incremento en su productividad morfológica. Estos hallazgos concuerdan por lo obtenido en esta investigación.

Estos hallazgos respaldan la idea de que la simbiosis micorrízica beneficia a ambas partes involucradas, como lo demostró Jones et al. (1998), quienes encontraron que las plantas micorrizadas pueden absorber entre 3.1 y 4.7 veces más fósforo que las no micorrizadas, lo que es esencial para su desarrollo morfológico.

a.5) Correlación de Pearson para análisis morfológicos

Se evaluaron características morfológicas de las plantas de café inoculadas con dos especies de HMA, estos resultados se correlacionaron con las características físico-químicas del suelo, para ello se realizó el análisis según el modelo de Pearson usando la función *coRh.test* y *corrplot* de los paquetes de datos *rio* y *corrplot* en el software R (Figura 23).

Los resultados obtenidos revelan la influencia significativa del tipo de suelo en las características morfológicas de las plantas de café, destacando el suelo de San Martín como el más propicio en todos los aspectos evaluados, incluyendo altura, diámetro del tallo, cantidad de pares de hojas y área foliar. Esto sugiere una correlación directa entre las propiedades del suelo y el desarrollo de las plantas de café. Aunque no se encontraron diferencias significativas entre las dos especies de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) utilizadas en la mayoría de las evaluaciones, se observó un comportamiento diferencial en cada tipo de suelo. Esto resalta la importancia de estudiar inóculos puros de HMA en diversos contextos con la planta de interés para determinar cuál especie de HMA es la más adecuada como biofertilizante. Se destaca que la característica físico-química más relevante fue el pH del suelo, seguido por la textura del suelo (% de limo), con un énfasis particular en el fósforo como factor determinante para el crecimiento y desarrollo de las plantas de café.

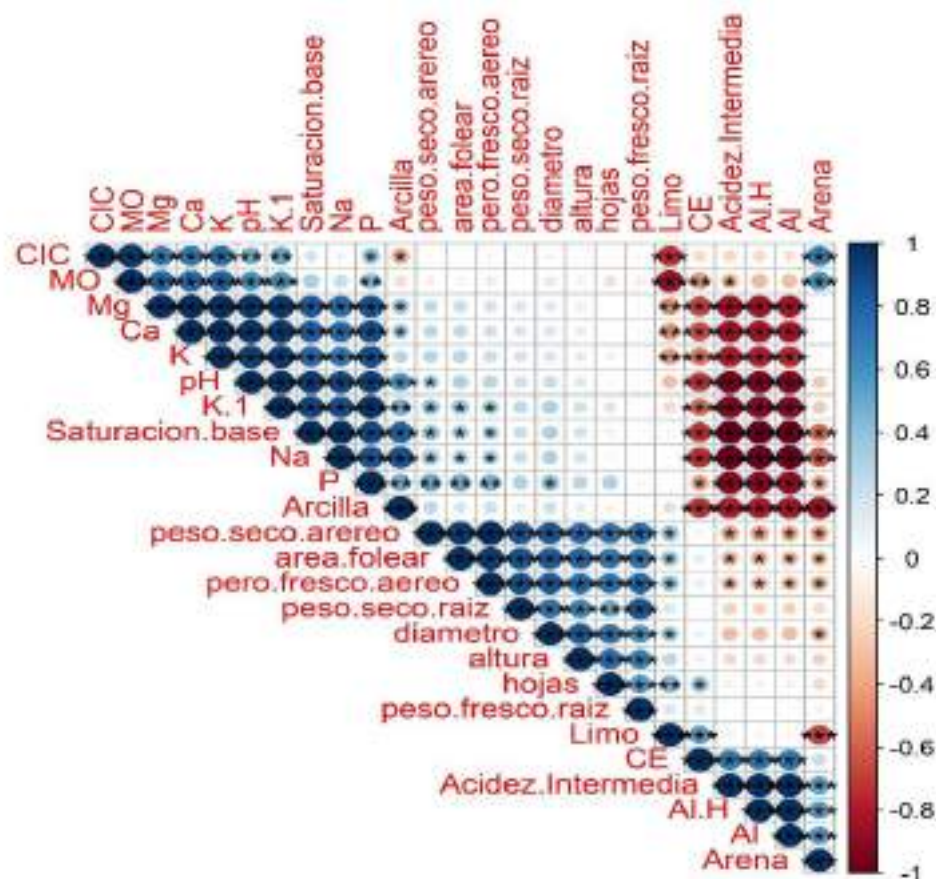


Figura 23

Análisis de correlación de Pearson de los parámetros fisicoquímicos con las evaluaciones morfológicas.

Nota: Valores de significancia * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$) y *** ($p < 0.001$).

En otras investigaciones se ha observado la eficiencia del género *Rhizoglosum* en plantas de café y otras especies de interés agronómico como se observa en esta investigación, Corazón-Guivin et al. (2023), evaluaron el comportamiento de dos especies de HMA, *Rh. variable* y *Nanoglosum plukenetiae* en plantas de café, concluyeron que ambas especies mejoraron el crecimiento del café, resaltando el café inoculado con *Rh. variable*.

De igual manera coincide con Perea-Rojas et al. (2018), quienes evaluaron la participación de especies de *Rhizoglosum* en café resaltando su potencial en el establecimiento de cafetos sudamericanos, mejorando su nutrición. El impacto de los HMA sobresaltó la mejora de la biomasa radicular, lo que induce un establecimiento exitoso de plantas tanto en cultivos anuales como perennes (Sieverding, 1991).

B) Análisis fisiológicos y enzimáticos

b.1) Clorofila

Los tratamientos evaluados en el presente estudio mostraron diferencia significativa para la concentración de clorofila de las plantas de café, mostrándose diferencia en los tratamientos, tanto en la especie de HMA como en los suelos de las localidades e interacción como se muestra en la Tabla 19, 20 y 21. Los valores más altos fueron mostrados por las plantas de café inoculadas con *Rh dunense* con una concentración media de 52.43 unidades SPAD y el suelo de San Martín tuvo mejores resultados con una media de 55.26 unidades SPAD (Figura 24 y 25).

Tabla 19

Análisis de Varianza de la concentración de clorofila

	GL	SC	CM	F	p-value	Sig.
HMA	2	7696	3848	135	2×10^{-16}	***
Localidad	3	3946	1316	46	2×10^{-16}	***
HMA * Localidad	6	7814	1302	46	2×10^{-14}	***
Residuo	168	4805	29			

Tabla 20

Análisis Post Hoc de Tukey de la concentración de clorofila

	Media	Sig.
<i>Rh. dunense</i>	52.43	A
<i>Rh. variable</i>	51.50	A
Control	38.12	B
San Martín	55.26	A
Lamas	46.13	B
Dorado	44.77	B
Rioja	43.21	B

Tabla 21

Análisis Post Hoc de Tukey de la interacción HMA y tipo de suelo de la concentración de clorofila

Lugar	HMA	MEDIA	TUKEY
Dorado	<i>Rh.dunense</i>	56.2	A
San Martín	<i>Rh. variable</i>	56.1	A
Lamas	<i>Rh.dunense</i>	55.8	A
Dorado	<i>Rh. variable</i>	55.7	A
San Martín	Sin HMA	55.1	A
San Martín	<i>Rh.dunense</i>	54.6	A
Lamas	<i>Rh. variable</i>	50.9	A
Rioja	<i>Rh. variable</i>	43.3	B
Rioja	Sin HMA	43.2	B
Rioja	<i>Rh.dunense</i>	43.1	C
Lamas	Sin HMA	27.6	C
Dorado	Sin HMA	26.5	C

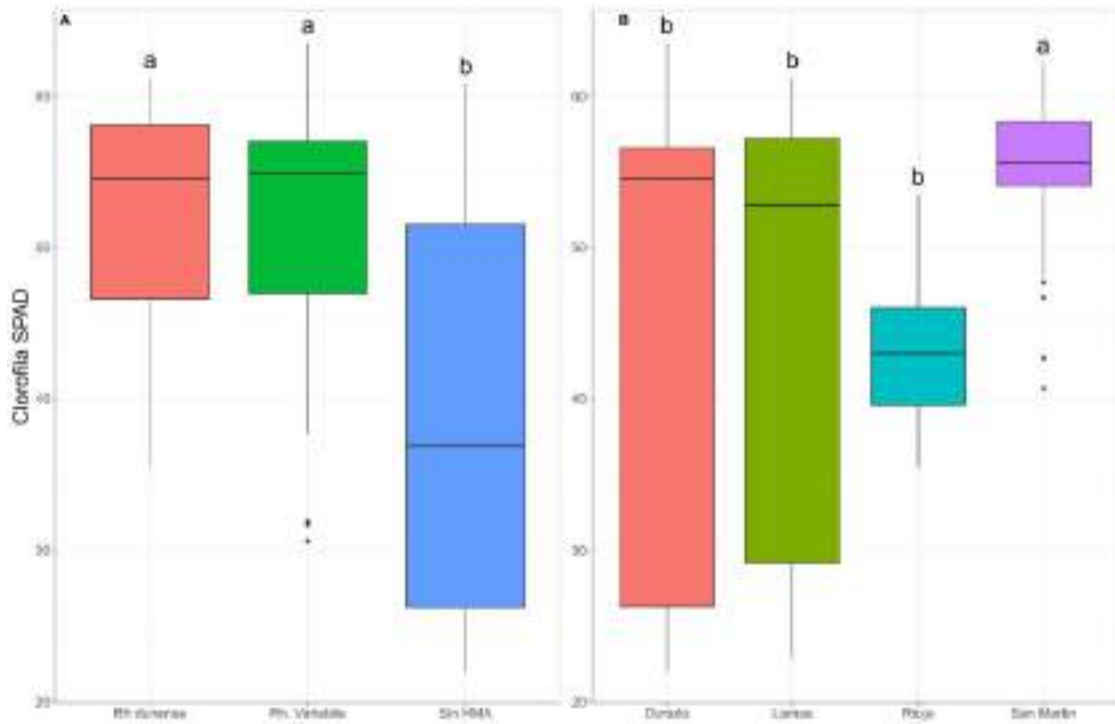


Figura 24

Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de la clorofila.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

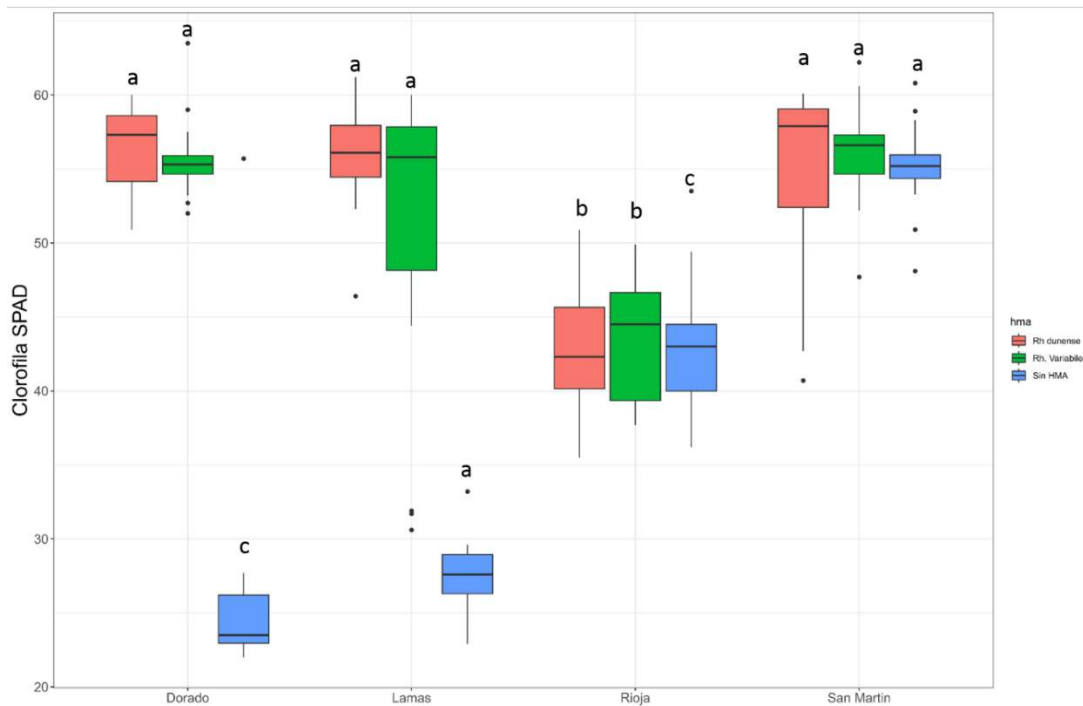


Figura 25

Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de interacción de HMA y tipos de suelo en resultados de clorofila.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

En este estudio, se observó un aumento en la concentración de clorofila en el cultivo de café inoculado con *Rh. dunense* y *Rh. variabile* en los suelos de San Martín, Lamas y El Dorado, en comparación con los controles. Sin embargo, en el caso del suelo de Rioja, se mantuvo la tendencia de no potenciar el desarrollo del cultivo de café. Los resultados de la interacción entre las especies de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y los diferentes suelos, a excepción de Rioja, no mostraron diferencias significativas, colocando al suelo de El Dorado y *Rh. Dunense* como el tratamiento más efectivo.

La elección de las especies de HMA como inóculo puede predecir la concentración de clorofila. Por ejemplo, el uso de *Rh. intraradices* y *Claroideoglossum etunicatum* en investigaciones previas redujo la presencia de este pigmento debido a una relación simbiótica menos efectiva con la planta hospedera (Sales et al., 2006; Sharma et al., 2008).

Estos hallazgos concuerdan con los de Baslam et al. (2013), quienes señalan que la colonización micorrízica promueve la síntesis de pigmentos fotosintéticos como la clorofila y los carotenos, aumenta el área foliar y la actividad de la raíz, mejora la absorción de nutrientes y el transporte de agua. Además, el aumento de clorofila está directamente relacionado con la producción de biomasa y la generación de fotosintatos, que son la fuente de energía para los HMA, estableciendo así una correlación entre la presencia de HMA y la concentración de clorofila (Pal et al., 2015).

❖ Catalasa (CAT)

Los tratamientos evaluados en el presente estudio no mostraron diferencia significativa para la actividad de la enzima catalasa en plantas de café (hojas y raíz), tanto para el comportamiento de los inóculos, la comparación entre tipos de suelo y la interacción entre inóculo y tipo de suelo Tabla 22 y 23. (Figura 26, 27).

Tabla 22

Análisis de Varianza de la actividad de la catalasa en hojas

	GL	SC	CM	F	p-value
HMA	2	5.36	2.68	1	0.46
Localidad	3	12.58	4.19	1	0.31
HMA * Localidad	6	17.02	2.84	3	0.55
Residuo	36	122.83	3.41		

Tabla 23

Análisis de varianza de la actividad de la catalasa en raíces

	GL	SC	CM	F	p-value
HMA	2	5.23	2.54	1	0.36
Localidad	3	10.15	5.23	1	0.12
HMA * Localidad	6	10.22	1.56	3	0.46
Residuo	36	105.13	3.43		

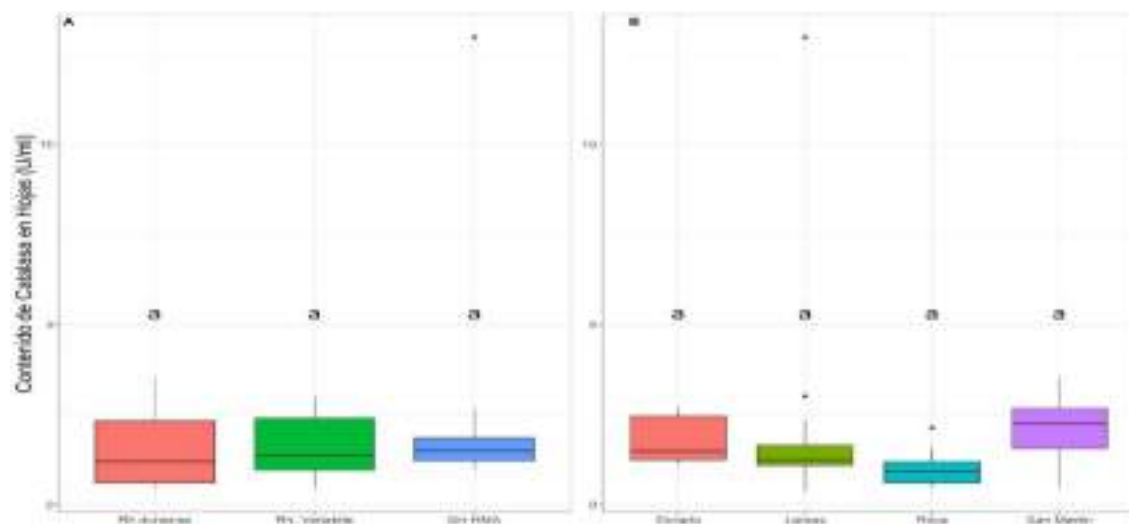
**Figura 26**

Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de la actividad de catalasa en hojas.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Los resultados obtenidos para concentración de catalasa en hojas mostraron que no existe diferencia entre los tratamientos aplicados, el café inoculado con *Rh. dunense* obtuvo una concentración de 1.51 U/ml, *Rh. variable* 1.67 U/ml, y el control tuvo la media de 2.28 U/ml, siendo la concentración más alta reportada, en el caso de la actividad según el tipo de suelo, se observa que la enzima catalasa tuvo mayor actividad en el suelo de Lamas en 2.35 U/ml, lo que nos indica que las características físico-químicas de este suelo genera un estrés mayor al café que los otros suelos.

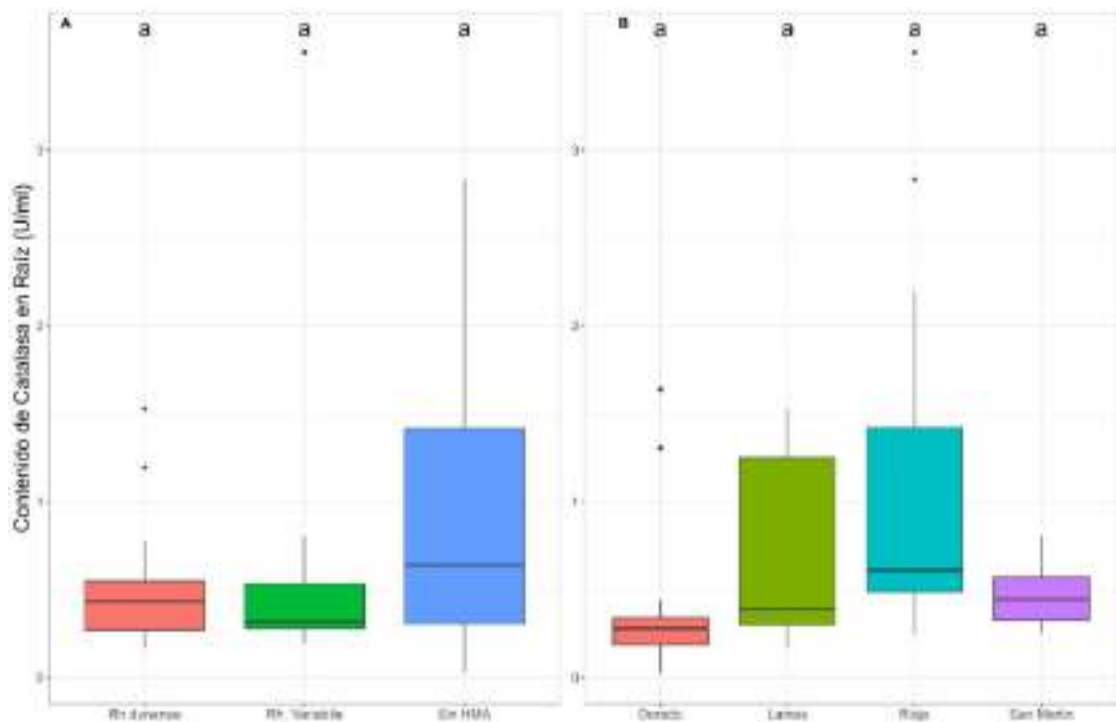


Figura 27

Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de la actividad de catalasa en raíz.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

En los resultados obtenidos se observan que no hubieron diferencias significativas entre las plantas de café inoculadas con HMA y los controles, lo que indica que la actividad de la catalasa fue mínima para ambos casos, posiblemente porque no se presentó algún tipo de estrés biótico, sin embargo, aunque no existe diferencia significativa en los tipos de suelo, se observa que el suelo de Rioja tuvo una actividad de la catalasa mayor que en los otros suelos, esto es probablemente por el pH del suelo, las plantas de café pudieron ver este escenario como un tipo de estrés abiótico, sin embargo, se debe mencionar que el suelo de Rioja presentó la menor colonización micorrízica, justamente por el pH y el fósforo del suelo.

Para los resultados obtenidos para concentración de catalasa en raíz se observa que existieron diferencias significativas entre los tratamientos aplicados, el café inoculado con *Rh. dunense* obtuvo una concentración de 0.51 U/ml, *Rh. variable* 0.51 U/ml, y el control tuvo la media de 0.94 U/ml, siendo la concentración más alta reportada, en el caso de la actividad según el tipo de suelo, se observa que la enzima catalasa tuvo mayor actividad en el suelo de Rioja 1.14 U/ml, lo que nos indica que las características físico-químicas de este suelo genera un mayor estrés al café que los otros suelos.

La respuesta enzimática de las plantas inoculadas con micorrizas arbusculares (HMA) es un aspecto clave para comprender su interacción con el suelo y su impacto en el

desarrollo de las plantas. En este estudio, se observó una menor concentración de catalasa (CAT) en hojas y raíces de las plantas inoculadas con HMA, siendo el suelo de Rioja el que mostró la mayor producción, posiblemente como resultado de características fisicoquímicas no idóneas para el café, lo que podría considerarse como un tipo de estrés.

La investigación de Billou et al. (2000) en *Nicotiana tabacum* y *Fun. Mosseae* demostró un aumento en las enzimas CAT y ascorbato peroxidasa en respuesta a la invasión de hongos micorrízicos arbusculares en las células radiculares. Este hallazgo es consistente con la reducción de la molécula H_2O_2 en plantas inoculadas con HMA bajo estrés, como la sequía, según lo informado por Pedranzani et al. (2016).

Los estudios de Ruis-Lozano et al. (2010) y Wu et al. (2007) resaltan la relación entre la actividad de la enzima CAT y el estrés. En el caso de las plantas de lechuga y *Citrus tangerine* colonizadas con hongos micorrízicos arbusculares, se observó un aumento significativo de la actividad enzimática durante períodos de sequía. Además, Ansari et al. (2021) demostraron que diferentes especies de HMA afectan la respuesta de la planta al estrés, con *Rh. intraradices* mostrando una mejor tolerancia a la sequía en plantas de lino, acompañada de un aumento en enzimas antioxidantes como CAT.

Aunque se espera que las micorrizas arbusculares aumenten la concentración de CAT en situaciones de estrés, nuestros resultados indican lo contrario. Esto podría deberse a la ausencia de estrés inducido en las plantas de café durante el estudio, lo que evitó la generación de señales para una mayor producción de CAT en las plantas inoculadas.

En resumen, la concentración de CAT en plantas de café inoculadas con HMA puede ser influenciada por diversos factores, incluidas las características del suelo y la presencia de estrés. La comprensión de esta interacción es crucial para optimizar el uso de HMA como herramienta en la agricultura sostenible.

❖ **Glucanasa**

Los tratamientos evaluados en el presente estudio mostraron diferencia significativa para la actividad de la Glucanasa en las plantas de café, mostrándose diferencia únicamente en los suelos de las localidades como se muestra en la Tabla 24, 25 y 26 para Glucanasa en raíz y Tabla 27 y 28 para Glucanasa en hojas. Los valores más altos fueron mostrados por las plantas de café inoculadas con *Rh. dunense* con una actividad media de 6.70 mol GLU/gr y el suelo de Rioja tuvo mejores resultados con una media de 7.38 mol GLU/gr, también se puede observar que existe diferencia significativa entre

la interacción HMA y tipo de suelo en los resultados de glucanasa raíz (Figura 28, 29 y 30).

Tabla 24

Análisis de Varianza de la actividad de la Glucanasa en raíz

	GL	SC	CM	F	p-value	Sig.
HMA	2	65.2	32.58	2	0.13	
Localidad	3	203.2	67.75	5	0.01	*
HMA * Localidad	6	482.9	80.49	5	0.001	**
Residuo	24	356.9	14.87			

Tabla 25

Análisis Post Hoc de Tukey de la actividad de la Glucanasa en raíz

	Media	Sig.
<i>Rh. dunense</i>	6.70	A
<i>Rh. variabile</i>	3.81	A
Control	3.88	A
San Martín	4.72	AB
Lamas	1.02	B
El Dorado	6.08	A
Rioja	7.38	A

Tabla 26

Análisis Post Hoc de Tukey de la actividad de la Glucanasa en raíz

Lugar	HMA	MEDIA	SIG
Rioja	Sin HMA	13.9	A
Dorado	<i>Rh.dunense</i>	12.3	AB
San Martín	<i>Rh.dunense</i>	9.12	ABC
Dorado	<i>Rh. variabile</i>	5.97	ABC
Rioja	<i>Rh. variabile</i>	5.83	ABC
San Martín	<i>Rh. variabile</i>	3.43	ABC
Lamas	<i>Rh.dunense</i>	3.06	ABC
Rioja	<i>Rh.dunense</i>	2.36	BC
San Martín	Sin HMA	1.62	BC
Dorado	Sin HMA	0	C
Lamas	<i>Rh. variabile</i>	0	C
Lamas	Sin HMA	0	C

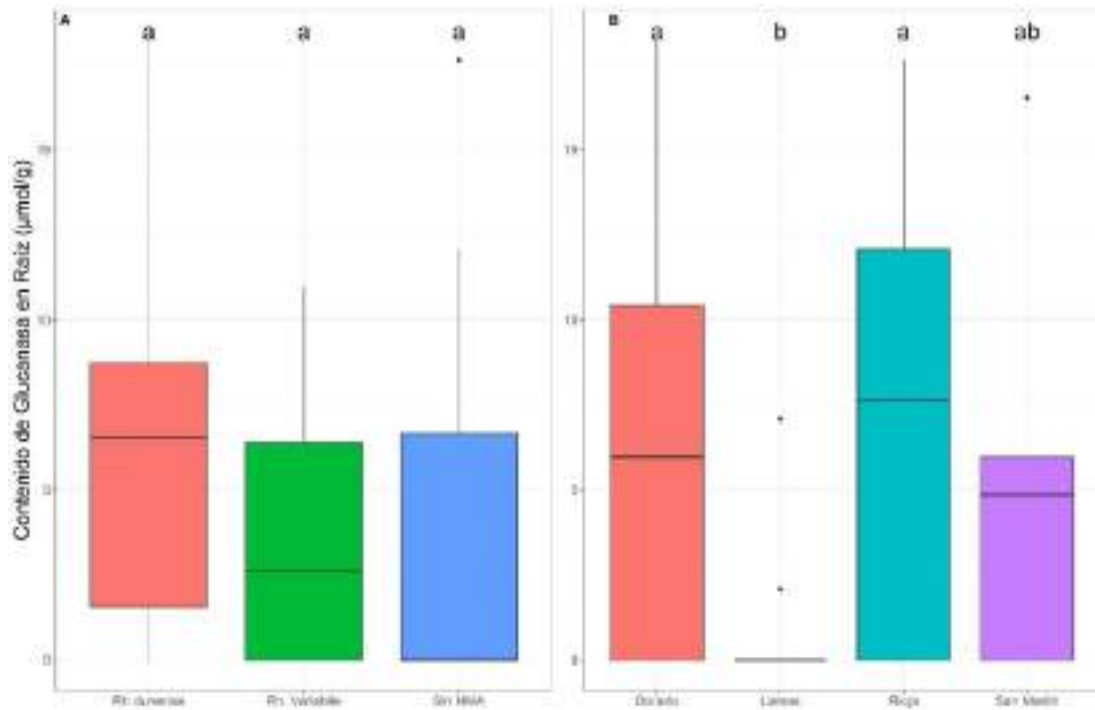


Figura 28

Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de la actividad de Glucanasa en raíz.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

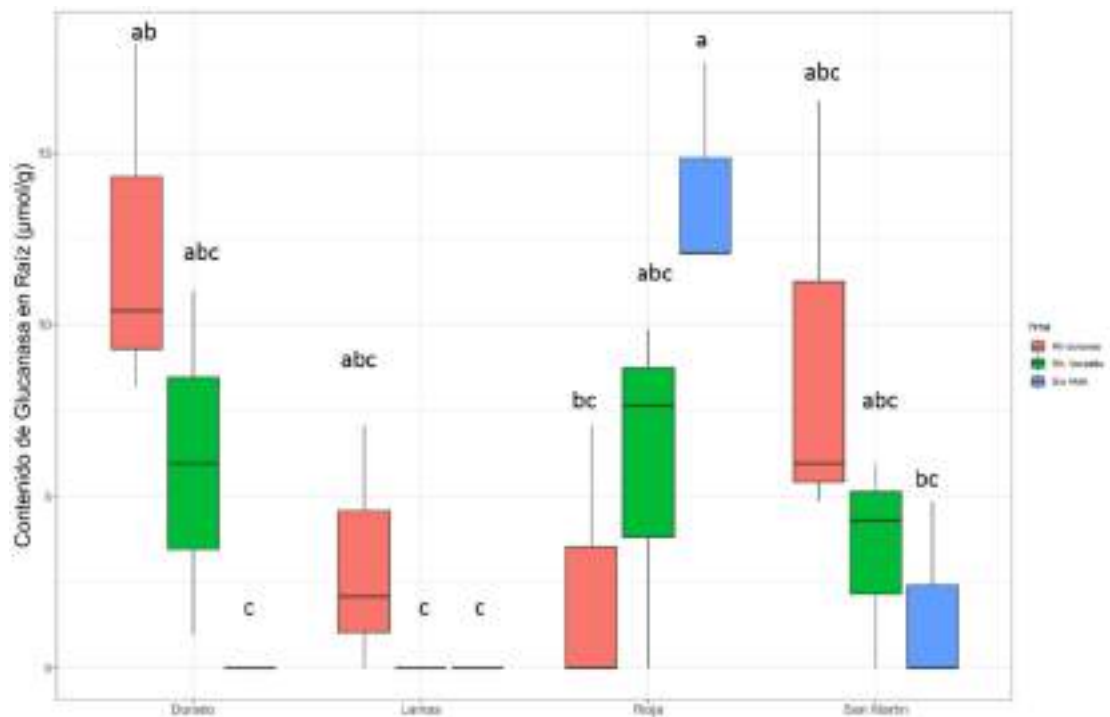


Figura 29

Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de interacción HMA y tipo de suelo en la actividad de Glucanasa en raíz.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Tabla 27

Análisis de Varianza de la actividad de la Glucanasa en hojas

	GL	SC	CM	F	p-value	Sig.
HMA	2	795	397.7	2	0.15	
Localidad	3	2051	683.7	4	0.03	*
HMA * Localidad	6	1986	331	2	0.16	
Residuo	24	4607	192			

Tabla 28

Análisis Post Hoc de Tukey de la actividad de la Glucanasa en hojas

	Media	Sig.
<i>Rh. dunense</i>	52.82	A
<i>Rh. variabile</i>	50.64	A
Control	61.52	A
San Martín	50.73	AB
Lamas	52.72	AB
El Dorado	67.95	A
Rioja	49.18	B

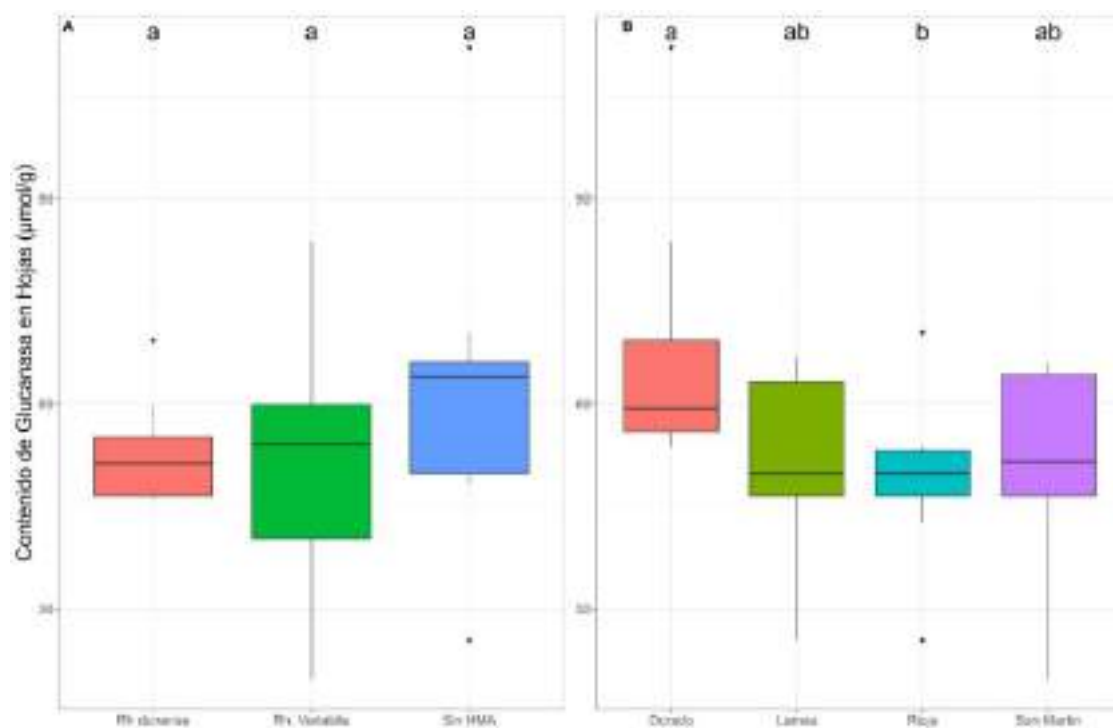
**Figura 30**

Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de la actividad de Glucanasa en hojas.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Los resultados de este estudio revelan que no hay diferencias significativas en la concentración de glucanasa en raíces entre las especies de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) utilizadas. Sin embargo, se observan diferencias significativas en función del tipo de suelo y la interacción entre los HMA y el suelo. Específicamente, la concentración más alta de glucanasa en raíces se registró con *Rhizoglyphus dunense* (6.70 $\mu\text{mol GLU/gr}$), siendo el suelo de Rioja el que favoreció la mayor concentración, con una media de 7.38 $\mu\text{mol GLU/gr}$. En cuanto a la interacción, el suelo de Rioja sin micorriza mostró la producción más elevada de glucanasa en raíces, con una media de 13.9 $\mu\text{mol GLU/gr}$.

En cuanto a la concentración de glucanasa en hojas, se observó que las plantas control presentaron la mayor media (61.52 $\mu\text{mol GLU/gr}$), seguidas por las plantas inoculadas con *Rh. dunense* (52.82 $\mu\text{mol GLU/gr}$) y *Rh. variabile* (50.64 $\mu\text{mol GLU/gr}$). Respecto al tipo de suelo, el suelo de El Dorado exhibió una mayor actividad enzimática de glucanasa en hojas, con 67.95 $\mu\text{mol GLU/gr}$.

Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que han demostrado un aumento en la actividad de las β -1,3-glucanasas en raíces de plantas inoculadas con HMA en respuesta a la presencia de patógenos, como lo indican Pozo et al. (1999). Además, investigaciones de Blee & Anderson (1996) y Mohr et al. (1998) respaldan la idea de que la colonización por HMA aumenta la actividad de enzimas como las β -1,3-glucanasas y quitinasas en raíces. Estudios posteriores, como los de la Rodríguez et al. (2006) y Ojeda-Quintana et al. (2019), sugieren que la presencia de HMA puede inducir un aumento en la actividad de enzimas de defensa en las plantas, como las glucanasas.

En cuanto a la defensa de las plantas de café, los resultados sugieren que la presencia de HMA no generó una respuesta de defensa significativa. Específicamente, se observó que las plantas de café presentaron mayores concentraciones de glucanasa en raíces en el suelo de Rioja, donde se registró el menor porcentaje de colonización micorrízica. Esto podría indicar una posible inhibición de la actividad micorrízica por la glucanasa. Además, se encontró que *Rh. dunense* promovió la mayor producción de esta enzima. En el caso de las hojas, las plantas sin inoculación mostraron mayores concentraciones de glucanasa, lo que sugiere que las plantas inoculadas en el suelo de El Dorado tienen un mejor desarrollo y pueden disminuir el estrés ambiental o físico-químico. Estos resultados apuntan a que *Rh. dunense* en el suelo de El Dorado puede ofrecer mejores resultados como agente bioprotector.

En resumen, estos hallazgos destacan la importancia del tipo de suelo y la especie de HMA en la actividad enzimática de las plantas de café, lo que puede tener implicaciones significativas en su desarrollo y defensa frente a condiciones adversas.

❖ Succinato deshidrogenasa

Los tratamientos evaluados en el presente estudio mostraron diferencia significativa para la actividad del succinato deshidrogenasa de las plantas de café, mostrándose diferencia tanto en la especie de HMA como en suelos de las localidades e interacción como se muestra en el análisis ANOVA Tabla 29, 30 y 31. Los valores más altos fueron mostrados por las plantas de café inoculadas con *Rh. dunense* con una actividad media 85.31% y el suelo de San Martín tuvo mejores resultados con una media de 72.5%, estos resultados se obtuvieron de la suma de la actividad alta y baja.

Los resultados indican que la especie *Rh. dunense* tiene mayor afinidad con el café, por lo que el succinato deshidrogenasa (SDH) muestra mayor actividad de las estructuras fúngicas, mostrando una actividad alta al 70% en el suelo del Dorado, relacionado con la colonización micorrízica, ya que es en este suelo donde se observa el mayor porcentaje. Sin embargo, la especie *Rh. variable* presenta una actividad alta de 52.5% en este suelo. El suelo de Rioja es el que promueve en menor grado la actividad de la SDH, lo que podría ser por el pH del suelo y la producción de enzimas como las glucanasas que inhiben la colonización (Figura 31 y 32).

Tabla 29

Análisis de Varianza de la actividad del succinato deshidrogenasa

	GL	SC	CM	F	p-value	Sig.
HMA	2	64267	32133	762	2×10^{-16}	***
Localidad	3	16393	5464	130	2×10^{-16}	***
HMA * Localidad	6	7708	1285	30	2×10^{-14}	***
Residuo	36	1519	42			

Tabla 30

Análisis Post Hoc de Tukey de la actividad del succinato deshidrogenasa

	Media	Sig.
<i>Rh. dunense</i>	85.31	A
<i>Rh. variable</i>	80.31	A
<i>Control</i>	5.31	B
<i>San Martin</i>	72.50	A
<i>Lamas</i>	65.41	B
<i>El Dorado</i>	64.58	AB
<i>Rioja</i>	25.42	C

Tabla 31

Análisis Post Hoc de Tukey de la interacción de HMA y tipo de suelo en la actividad del succinato deshidrogenasa

Lugar	HMA	MEDIA	TUKEY
Dorado	<i>Rh.dunense</i>	100	A
Lamas	<i>Rh.dunense</i>	100	AB
San Martín	<i>Rh.dunense</i>	100	ABC
San Martín	<i>Rh. variabile</i>	100	ABC
Dorado	<i>Rh. variabile</i>	96.2	ABC
Lamas	<i>Rh. variabile</i>	93.8	ABC
Rioja	<i>Rh.dunense</i>	41.2	ABC
Rioja	<i>Rh. variabile</i>	31.2	BC
San Martín	Sin HMA	17.5	BC
Rioja	Sin HMA	3.75	C
Dorado	Sin HMA	0	C
Lamas	Sin HMA	0	C

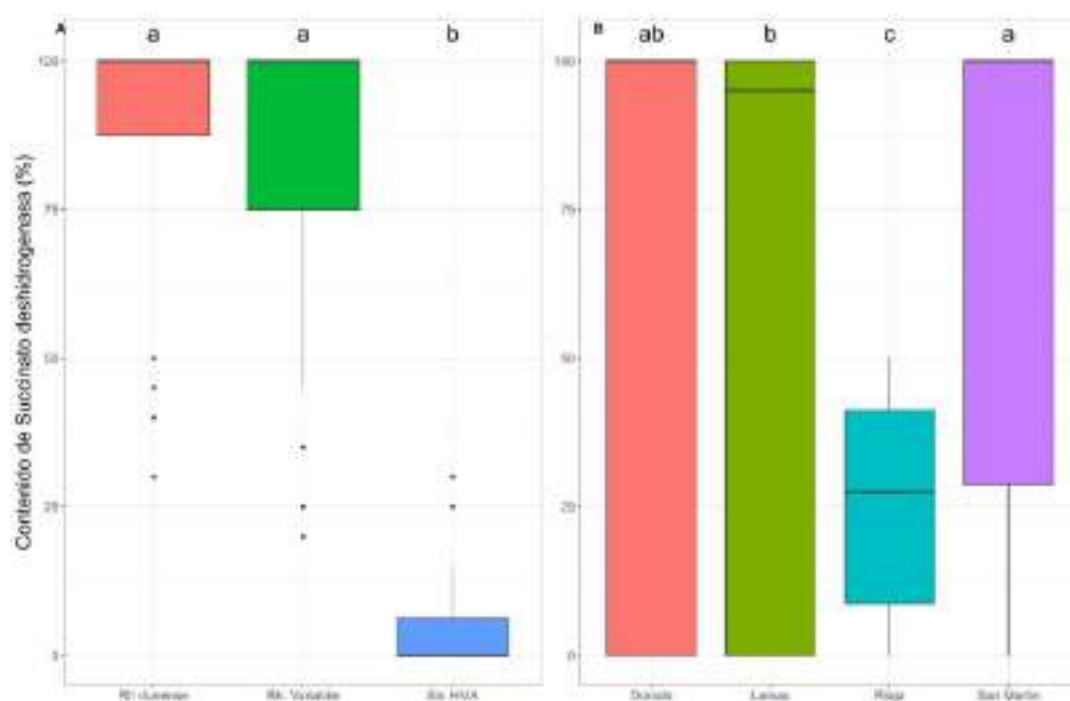
**Figura 31**

Gráfico de cajas del análisis ANOVA para resultados de la actividad de succinato deshidrogenasa.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

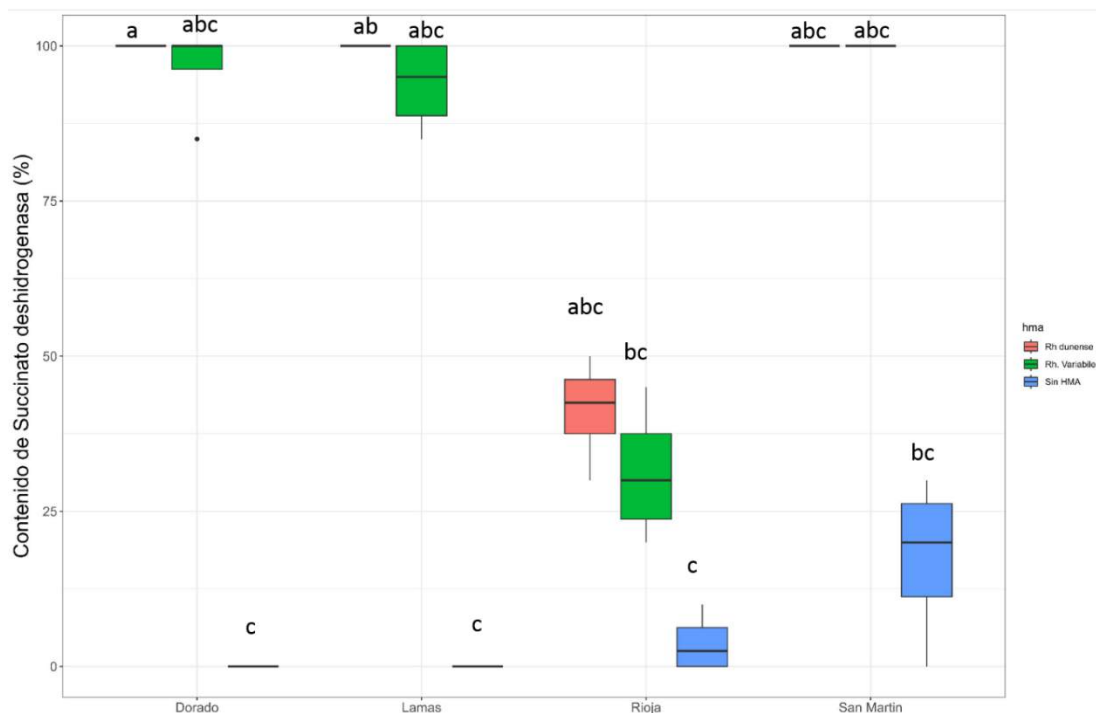


Figura 32

Gráfico de cajas del análisis ANOVA para la interacción HMA y tipo de suelo resultados de la actividad de succinato deshidrogenasa.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

La enzima succinato deshidrogenasa (SDH) desempeña un papel crucial en la evaluación de la viabilidad de las estructuras fúngicas de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en las raíces de las plantas de café (Smith & Gianinazzi-Pearson, 1990). Al examinar las raíces, se observó que tanto *Rh. dunense* como *Rh. variable* mostraron una viabilidad superior al 50% en el café.

Resultados similares fueron observados por Arango *et al.* (2013), quienes investigaron la presencia de rizomas de (*Sorghum halepense* L. Pers.) en plantas de *Mentha x piperita* L. inoculadas con dos especies de HMA diferentes, *Rh. intraradices* y *Fun. Mosseae*. Evaluaron la viabilidad de las estructuras fúngicas mediante la enzima SDH, y encontraron que *Rh. intraradices* mostró una mejor viabilidad (34-64%) en comparación con *Fun. Mosseae* (21-35%), lo que coincidió con una mayor tasa de fotosíntesis en plantas con *Rh. intraradices*.

Bernardo & Collado (2016) examinaron la viabilidad de las estructuras fúngicas de *Fun. mosseae* en plantas de *Capsicum annuum* sometidas a diferentes concentraciones de cobre (Cu) y ácido salicílico. Concluyeron que el estrés causado por el cobre y las altas concentraciones de ácido salicílico redujeron la viabilidad (% SDH), mostrando una viabilidad del 88 % en 0 mM de Cu y una colonización del 95 %. Estos resultados

guardan relación con los obtenidos en esta investigación, ya que se observó una mayor viabilidad con un mayor porcentaje de colonización, posiblemente debido a la compatibilidad entre el suelo, el café y el hongo micorrízico.

❖ **Contenido de Nitrógeno, fósforo y potasio en hojas.**

Los tratamientos evaluados en el presente estudio mostraron diferencia significativa para el contenido de N, P, K en las hojas de las plantas de café, mostrándose diferencia en los tratamientos, tanto en la especie de HMA como en suelos de las localidades e interacción como se muestra en la Tabla 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 y 40.

Tabla 32

Análisis de Varianza de la concentración de nitrógeno en hojas

	GL	SC	CM	F	p-value	Sig.
HMA	2	7729	3865	26	8.74 e-07	***
Localidad	3	15891	5297	36	4.61 e-09	***
HMA * Localidad	6	10098	1683	11	4.66E-06	***
Residuo	24	3517	147			

Tabla 33

Análisis Post Hoc de Tukey de la concentración de nitrógeno en hojas

	Media	Sig.
<i>Rh. dunense</i>	113.5	A
<i>Rh. variable</i>	115.3	A
Control	92.5	B
San Martín	123.75	A
Lamas	86.02	B
Dorado	65.38	C
Rioja	87.49	B

Tabla 34

Análisis Post Hoc de Tukey de la interacción de HMA y tipo de suelo de nitrógeno en hojas

Lugar	HMA	MEDIA	TUKEY
San Martín	<i>Rh. variable</i>	144	A
Lamas	<i>Rh.dunense</i>	123	AB
San Martín	Sin HMA	118	AB
San Martín	<i>Rh.dunense</i>	109	ABC
Rioja	<i>Rh. variable</i>	103	BC
Dorado	<i>Rh.dunense</i>	92.7	BC
Rioja	Sin HMA	80.5	CD
Rioja	<i>Rh.dunense</i>	73.9	CD
Dorado	<i>Rh. variable</i>	79	CD
Lamas	<i>Rh. variable</i>	78.6	CD
Lamas	Sin HMA	56.4	DE
Dorado	Sin HMA	24.4	E

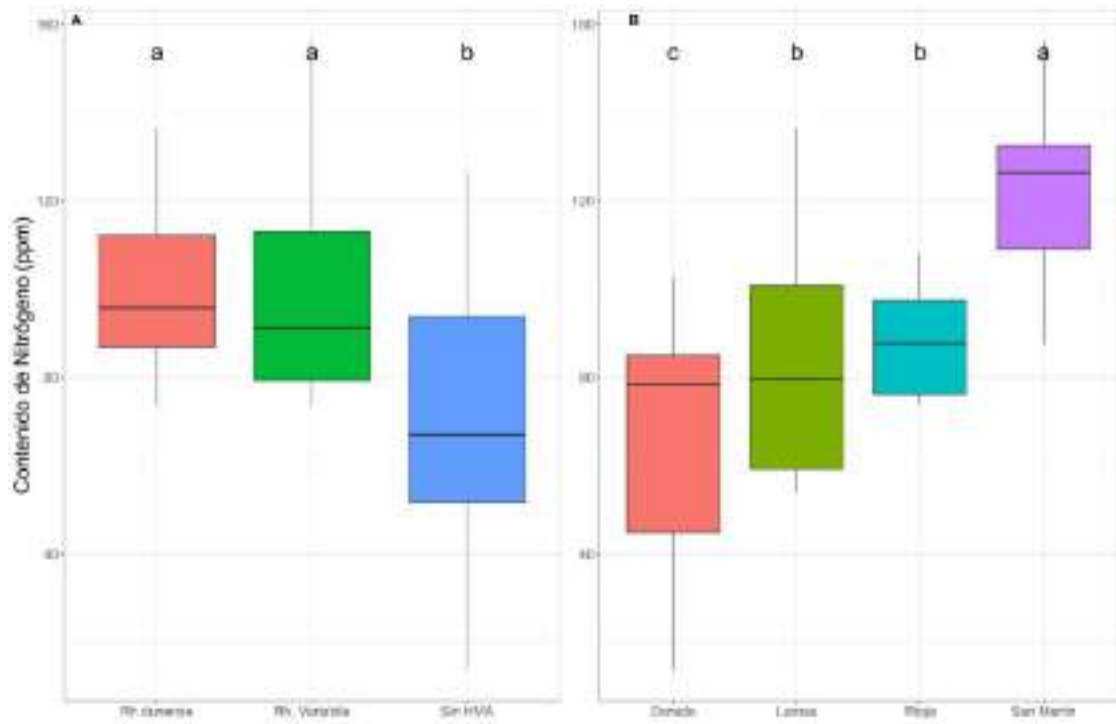


Figura 33

Gráfico de cajas del análisis ANOVA del contenido de nitrógeno en hojas.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

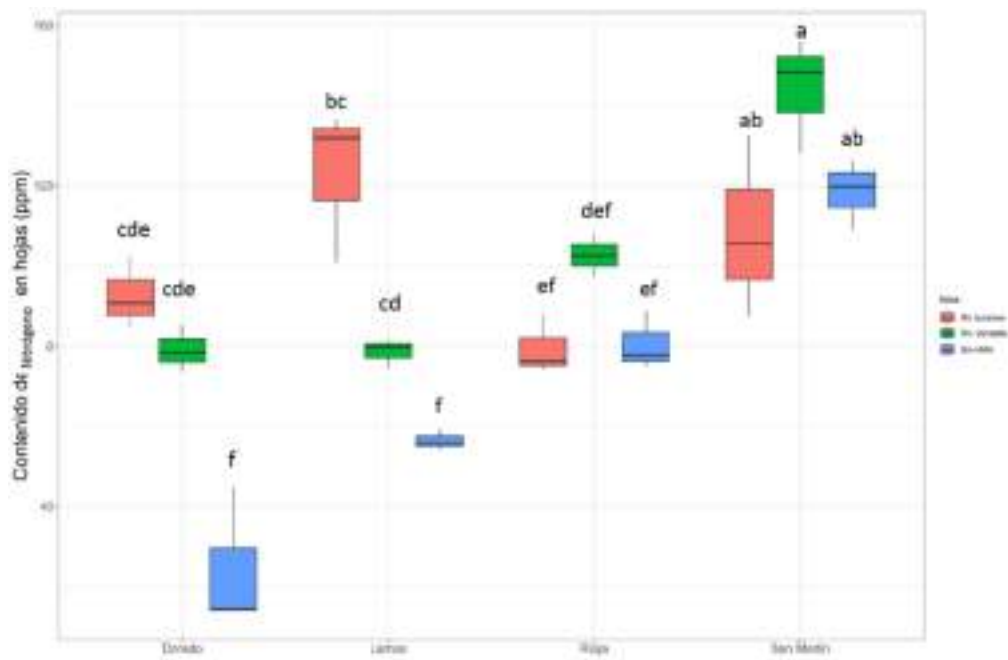


Figura 34

Gráfico de cajas del análisis ANOVA de la interacción entre HMA y tipo de suelo en el contenido de nitrógeno en hojas.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Tabla 35*Análisis de Varianza de la concentración de fósforo en hojas*

	GL	SC	CM	F	p-value	Sig.
HMA	2	6.61	3.30	25	1.37 e-06	***
Localidad	3	38.76	12.92	98	1.38 e-13	***
HMA * Localidad	6	4.66	0.77	6	7.03E-04	***
Residuo	24	3.18	0.13			

Tabla 36*Análisis Post Hoc de Tukey de la concentración de fósforo en hojas*

	Media	Sig.
<i>Rh. dunense</i>	1.92	A
<i>Rh. variabile</i>	2.05	A
<i>Control</i>	1.08	B
<i>San Martín</i>	3.42	A
<i>Lamas</i>	1.47	B
<i>Dorado</i>	1.13	BC
<i>Rioja</i>	0.71	C

Tabla 37*Análisis Post Hoc de Tukey de la interacción de HMA y tipo de suelo en la concentración de fósforo en hojas*

Lugar	HMA	MEDIA	TUKEY
San Martín	<i>Rh. variabile</i>	3.87	A
San Martín	<i>Rh. dunense</i>	3.2	AB
San Martín	<i>Sin HMA</i>	3.18	AB
Lamas	<i>Rh. dunense</i>	2.36	BC
Lamas	<i>Rh. variabile</i>	1.76	CD
Dorado	<i>Rh. dunense</i>	1.56	CDE
Dorado	<i>Rh. variabile</i>	1.53	CDE
Rioja	<i>Rh. variabile</i>	1.05	DEF
Rioja	<i>Sin HMA</i>	0.547	EF
Rioja	<i>Rh. dunense</i>	0.54	EF
Dorado	<i>Sin HMA</i>	0.3	F
Lamas	<i>Sin HMA</i>	0.3	F

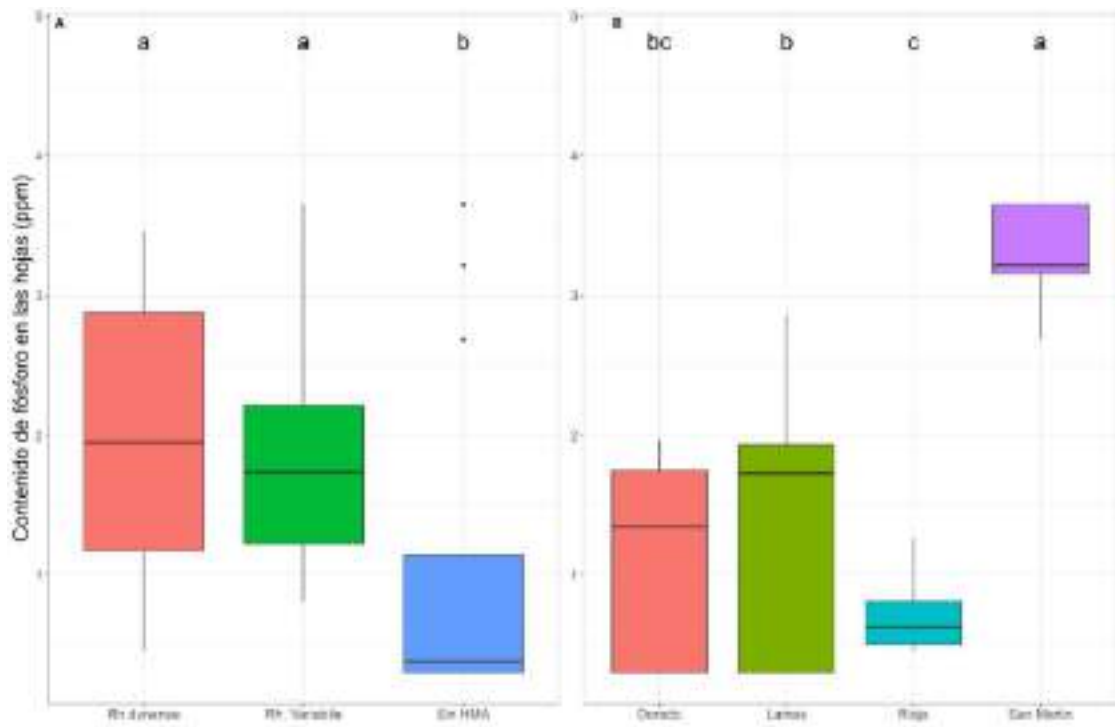


Figura 35

Gráfico de cajas del análisis ANOVA del contenido de fósforo en hojas.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

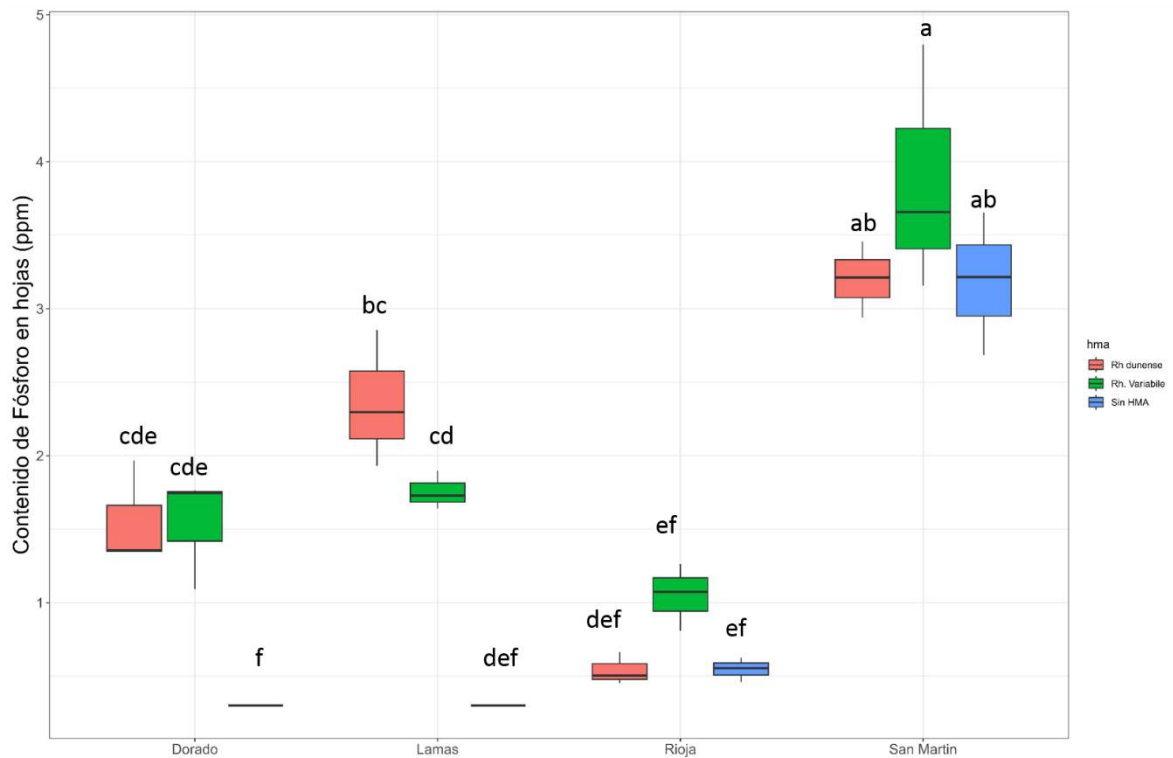


Figura 36

Gráfico de cajas del análisis ANOVA de la interacción de HMA y tipo de suelo en el contenido de Fósforo en hojas.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Tabla 38*Análisis de Varianza de la concentración de potasio en hojas*

	GL	SC	CM	F	p-value	Sig.
HMA	2	1534	767	23	3.09 e-06	***
Localidad	3	7132	2377.4	70	5.31 e-12	***
HMA * Localidad	6	2539	423.2	12	2.37 e-06	***
Residuo	24	817	34			

Tabla 39*Análisis Post Hoc de Tukey de la concentración de potasio en hojas*

	Media	Sig.
<i>Rh. dunense</i>	14.95	A
<i>Rh. variabile</i>	15.26	A
<i>Control</i>	10.87	B
<i>San Martín</i>	57.77	A
<i>Lamas</i>	40.60	B
<i>Dorado</i>	27.18	C
<i>Rioja</i>	21.12	C

Tabla 40*Análisis Post Hoc de Tukey de la interacción de HMA y tipo de suelo de la concentración de potasio en hojas*

Lugar	HMA	MEDIA	TUKEY
San Martín	<i>Rh. variabile</i>	71.8	A
Lamas	<i>Rh.dunense</i>	61.6	AB
San Martín	<i>Sin HMA</i>	52.4	BC
San Martín	<i>Rh.dunense</i>	49.2	BC
Lamas	<i>Rh. variabile</i>	41.7	CD
Dorado	<i>Rh.dunense</i>	30	DE
Rioja	<i>Rh. variabile</i>	29.1	DE
Dorado	<i>Rh. variabile</i>	28.9	DE
Dorado	<i>Sin HMA</i>	22.6	E
Lamas	<i>Sin HMA</i>	18.5	E
Rioja	<i>Sin HMA</i>	17.2	E
Rioja	<i>Rh.dunense</i>	17.1	E

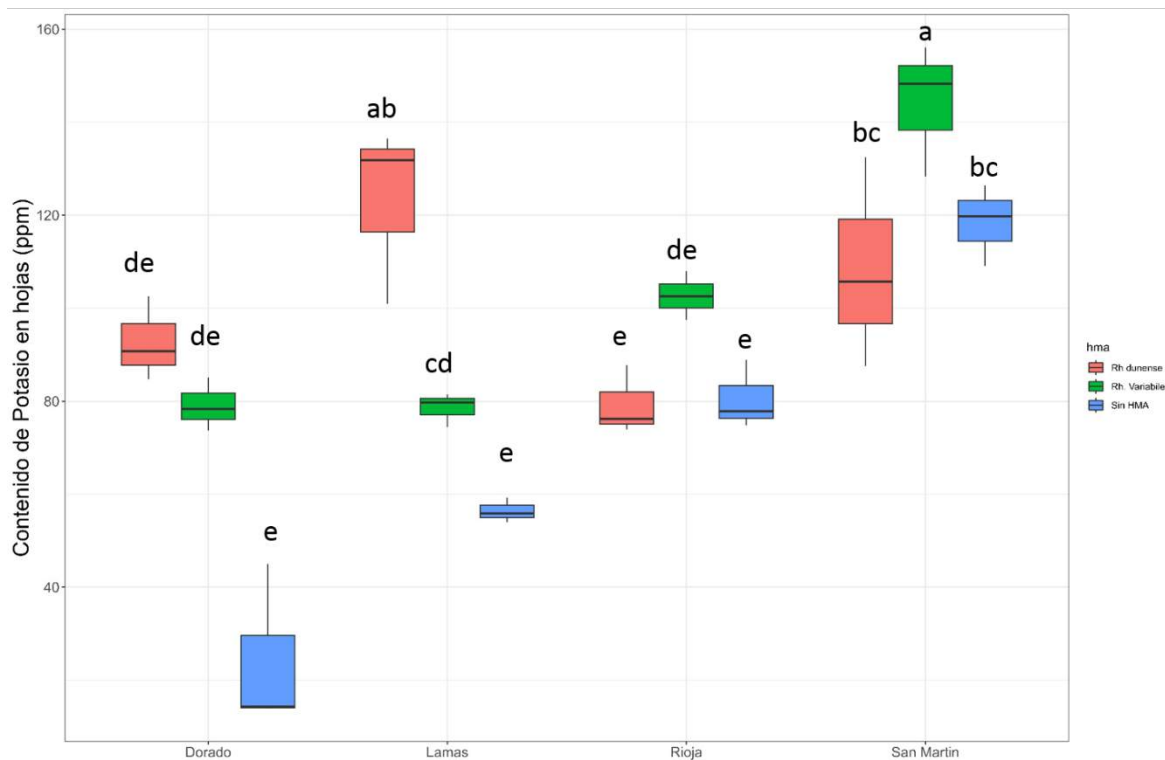


Figura 37

Gráfico de cajas del análisis ANOVA de la interacción de HMA y tipo de suelo en el contenido de Potasio en hojas.

Nota: Las letras diferentes indican diferencia significativa con prueba de Tukey ($p < 0.05$).

En los resultados de esta investigación, se observa que el café inoculado con Rh. variable en el suelo de San Martín presentó las concentraciones más altas de N, P, K (144.22 mg/kg, 3.87 mg/kg, 71.75 mg/kg). Asimismo, las plantas inoculadas con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) mostraron concentraciones mayores de N, P, K en hojas en comparación con las no inoculadas, lo que sugiere que los HMA facilitan la absorción de estos nutrientes.

Estos resultados son consistentes con los obtenidos por Grümberg (2015), quien al inocular plantas de soja con tres especies de HMA (*Septoglomus constrictum*, *Glomus sp.* y *Glomus aggregatum*), observó un aumento en la concentración de N, P, K en hojas y una mejora en el índice de tolerancia a sequías. Smith & Read (2008) respaldan esta observación al sugerir que este aumento puede estar relacionado con un incremento en el área foliar.

Por otro lado, Vallejos Torres (2021) evaluó el efecto de los HMA en el crecimiento morfológico y la concentración de nutrientes y clorofila, así como la resistencia a la roya en plantas de café. Determinó que el contenido de nitrógeno y fósforo en hojas no mostró diferencias significativas en los tratamientos evaluados. Esta discrepancia podría

atribuirse al uso de cultivos puros de *Rh. dunense* y *Rh. variabile* en nuestra investigación, lo que pudo haber evitado la competencia entre especies y mejorado la viabilidad de las estructuras fúngicas para una mejor absorción de nutrientes en las plantas micorrizadas.

Se puede considerar que el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) son nutrientes primarios esenciales, ya que se requieren en cantidades significativas para el crecimiento de las plantas. Por ejemplo, el N previene la muerte de la planta, el P promueve el desarrollo de raíces y el K es crucial para la fotosíntesis y el funcionamiento de las estomas en las plantas (Edward et al., 2005)

CONCLUSIONES

1. Los análisis fisicoquímicos de los diferentes suelos trabajados revelan la importancia tanto de los factores químicos como biológicos en la calidad del café. Se observa una diversidad en la textura del suelo entre las muestras, siendo el suelo de Lamas caracterizado por un drenaje deficiente, mientras que el de Rioja exhibe una textura arenosa con mejor drenaje. El pH del suelo resulta crítico para el cultivo del café, y aunque la mayoría de las muestras se encuentran dentro del rango recomendado, el suelo de Rioja se desvía posiblemente debido a prácticas agrícolas.
2. Se evidencia una relación directa entre la concentración de fósforo y la colonización micorrízica, especialmente en suelos con mayores concentraciones de este nutriente. Sin embargo, en la interacción entre hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y tipo de suelo, se observa un porcentaje de colonización mayor en el suelo de Lamas, a pesar de presentar una concentración de fósforo menor. Se destaca que las especies de HMA, en este caso, *Rhizoglobus dunense* y *Rhizoglobus variabile*, muestran respuestas divergentes ante las características del suelo. La colonización micorrízica es más efectiva en suelos con concentraciones específicas de fósforo, y esta respuesta puede variar según la especie de HMA evaluada. Es posible que el pH del suelo puede influir en la colonización micorrízica, el género *Glomus* tiene una respuesta poco favorable a niveles bajos de pH, como en el caso de Rioja que tiene un pH ácido.
3. El tipo de suelo ejerce influencia en las características morfológicas, siendo notable que el suelo de San Martín y Lamas exhibe mejores resultados en todos los casos, incluyendo altura, diámetro de tallo, cantidad de hojas y área foliar. Estos hallazgos sugieren una relación significativa entre el tipo de suelo y las características morfológicas del café. Además, se observa que la actividad enzimática, la concentración de nutrientes y otros factores también varían según la especie de HMA y el tipo de suelo, lo que subraya la importancia de considerar estas interacciones en la producción de café.

RECOMENDACIONES

- Evaluar las mismas características aplicando algún tipo de patógeno relevante para el café. Esto proporcionará información adicional sobre la participación de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en el café, lo que es de gran interés agrícola.
- Ampliar el rango de tipos de suelo, es decir, evaluar otros suelos de la región de San Martín o de zonas donde se cultive café. Esto permitirá obtener una visión más completa de la interacción entre los HMA y el suelo en diferentes condiciones.
- Evaluar otras especies de HMA para determinar su afinidad y eficiencia en la colonización de las raíces del café. Esto ayudará a identificar las especies más adecuadas para promover el crecimiento y desarrollo de las plantas de café.
- Evaluar otras enzimas antioxidantes como el superóxido dismutasa, ascorbato peroxidasa y peroxidasa. Estas enzimas proporcionarán información adicional sobre la función de los HMA en el sistema antioxidante de las plantas de café.
- Realizar estudios de análisis químicos del fruto de café en relación con la colonización micorrízica. Esto permitirá determinar si la colonización micorrízica afecta la composición química y la calidad del fruto de café.
- Evaluar el potencial de la *Rh. dunense* y *Rh. variable* en plantaciones no productivas de 1 año para determinar su desempeño en la producción de café. Esto proporcionará información relevante para los productores sobre el uso de estos HMA en el cultivo de café.
- Identificar especies nativas de los suelos a investigar en primera instancia. Esto permitirá comprender mejor la interacción entre las especies de HMA y las condiciones específicas del suelo, lo que puede influir en el éxito de la colonización micorrízica en el cultivo de café.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alva Pérez, J. F. (2019). *Producción masiva de hongos micorrízicos arbusculares utilizando plantas trampa e inóculo de suelo rizosférico de café proveniente de diferentes altitudes de San Martín*. (Tesis para optar el título de ingeniero agrónomo), Universidad Nacional de San Martín. Facultad de Ciencias Agrarias; San Martín, Perú. <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/3587>
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. *Soil Science Society of America Journal*, Division S-6—Soil & Water Management & Conservation. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>
- Ansari, A., Razmjoo, J., Zarei, M., & Karimmojeni, H. (2021). Salicylic acid affects mycorrhizal features, antioxidant enzyme activities and seed yield of linseed under water-deficit stress in open-field conditions. *Biol Futur*, 72(2), 211-227. <https://doi.org/10.1007/s42977-020-00054-0>
- Arango, C., Ruscitti, M. F., Ronco, M. G., & Beltrano, J. (2013). Influencia de los extractos acuosos de rizomas de sorgo de Alepo (*Sorghum halepense* L.) sobre la micorrización y el crecimiento de plantas de *Mentha x piperita* L. *Horticultura Argentina*, 32. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/115299>
- Arévalo A, YG. (2018). *Evaluación y caracterización de hongos micorrízicos arbusculares en tres agroecosistemas y dos bosques en las provincias de Alto Amazonas y Lamas*. (Tesis para optar el título de biólogo), Universidad Nacional Agraria la Molina. Facultad de Ciencias. Lima, Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3247>
- Arteaga-Alejandría, E. (2019). *Identificación de la diversidad y colonización de Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA) nativos, en el cultivo de café (Coffea arabica L.), en cuatro provincias (El Dorado, Lamas, San Martín y Moyobamba) en la región San Martín* (Tesis para optar el título de ingeniero agrónomo), Universidad Nacional de San Martín. Facultad de Ciencias Agrarias; San Martín, Perú. <http://hdl.handle.net/11458/3529>
- Barrer, SE. (2009). El uso de hongos micorrízicos arbusculares como una alternativa para la agricultura, Colombia. *Facultad de Ciencias Agropecuaria*, 7(1): 123-132. <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v7n1/v7n1a14.pdf>

- Baslam, M., Esteban, R., García-Plazaola, JI., & Goicoechea, N. (2013). Effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in inducing accumulation of major carotenoids, chlorophylls, and tocopherols in green and red leaf lettuces. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(7), 3119–3128. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4526-x>
- Bernardo, V., & Collado, F. (2016). *Efecto del ácido salicílico sobre plantas de pimiento (Capsicum annuum) micorrizadas, en presencia de metales pesados en el suelo.* (Tesis para optar el grado de doctor), Universidad Nacional de La Plata. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/53682>
- Blee, K. A., & Anderson, A. J. (1996). Defense-Related Transcript Accumulation in *Phaseolus vulgaris* L. Colonized by the Arbuscular Mycorrhizal Fungus *Glomus intraradices* Schenck & Smith. *Plant Physiology*, 110(2), 675–688. <https://doi.org/10.1104/pp.110.2.675>
- Blilou, I., Bueno, P., Ocampo, J. A., & García-Garrido, J. M. (2000). Induction of catalase and ascorbate peroxidase activities in tobacco roots inoculated with the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae*. *Mycological Research*, 104, 722-725. <https://doi.org/10.1017/S095375629900204X>
- Camenzind, T., Hempel, S., Homeier, J., Horn, S., Velescu, A., Wilcke, W., & Rillig, M. C. (2014). Nitrogen and phosphorus additions impact arbuscular mycorrhizal abundance and molecular diversity in a tropical montane forest. *Global Change Biology*, 20(12), 3646-3659. <https://doi.org/10.1111/gcb.12618>
- Carrenho, R; Botelho T, SF; Ramos B, VL; y Schunks, E. (2007). El efecto de diferentes propiedades del suelo sobre la colonización micorrízica arbuscular de maní, sorgo y maíz, en Brasil. *Acta bot. Brasilica*, 21(3): 723-730. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062007000300018>
- Chen, S., Zhao, H., Zou, C., Li, Y., Chen, Y., Wang, Z., Jiang, Y., Liu, A., Zhao, H., Wang, M., Ahammed, GJ (2017). La inoculación combinada con múltiples hongos micorrízicos arbusculares mejora el crecimiento, la absorción de nutrientes y la fotosíntesis en las plántulas de pepino. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2516. <http://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02516>
- Chiapello, M., Das, D., & Gutjahr, C. (2019). Ramf: An Open-Source R Package for Statistical Analysis and Display of Quantitative Root Colonization by Arbuscular Mycorrhiza Fungi. *Frontiers in Plant Science*, 0, 1184. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.01184>

- Cobb, AB; Wilson, GWT; Goad, CL; & Grusak, MA. (2018). Influencia de enmiendas alternativas del suelo sobre la producción de hongos micorrízicos y caupí, en Texas, EE.UU. *Heliyon*, 1(1): 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00704>
- Coral, R. L. (2015). Estudio de la diversidad de hongos micorrízicos arbusculares nativos y su potencial micorrízico en el cultivo de café (*Coffea arabica* L) en diferentes condiciones agroecológicas en la Región San Martín. (Tesis para optar el título profesional de ingeniero agrónomo). Universidad Nacional de San Martín, Facultad de Ciencias Agrarias, Tarapoto, Perú. <http://tesis.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/664>
- Corazon-Guivin, M. A., Romero-Cachique, G., Del Aguila, K. M., Padilla-Domínguez, A., Hernández-Amasifuen, A. D., Cerna-Mendoza, A., Coyne, D., & Oehl, F. (2023). *Rhizoglyphus variabile* and *Nanoglomus plukenetiae*, Native to Peru, Promote Coffee Growth in Western Amazonia. *Microorganisms*, 11(12), 2883. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11122883>
- Cotrina C, YA. (2019). *Hongos micorrízicos arbusculares aislados de suelo radicular de Portulaca oleracea L., como potenciales promotores del crecimiento de plantas en suelos salinos, en Lambayeque*. (Tesis para optar el título profesional de Licenciada en Biología). Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo, Facultad de Ciencias Biológicas. Lambayeque, Perú. <http://repositorio.unprg.edu.pe:8080/bitstream/handle/20.500.12893/9073>
- Cwala, Y., Laubscher, C.P., Ndakidemi, P.A. & Meyer, A.H. (2010). Mycorrhizal root colonization and the subsequent host plant response of soil less grown tomato plants in the presence and absence of the mycorrhizal stimulant, Mycotech. *African Journal of Microbiology Research*. <http://dx.doi.org/10.5897/AJMR>
- De la Noval, B. M., Pérez, E., Olalde, V., Délano, J. P., & Martínez, N. (2004). Inducción de β -1,3-glucanasas y quitinasas en plántulas de tomate por hongos micorrízicos arbusculares y sistemina. *Cultivos Tropicales*, 25(1), 5-12. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193230179001>
- Del Águila, KM; Vallejo-Torres, G; Arévalo, LA; Becerra, AG. (2018). Inoculación de consorcios micorrízicos arbusculares en *Coffea arabica* variedad Caturra en la región San Martín. *Información Tecnológica*, 29(1): 137-146. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000100137>
- Díaz Torres, M. (2022). Diversidad de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en plantaciones de café y bosques de San Martín, (Tesis para optar el título

- profesional de ingeniero agrónomo). Universidad Nacional de San Martín, Facultad de Ciencias Agrarias. <http://hdl.handle.net/11458/4812>
- Eigenberg, R. A., Nienaber, J. A., Woodbury, B. L., & Ferguson, R. B. (2006). Soil Conductivity as a Measure of Soil and Crop Status A Four-Year Summary. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1600-1611. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0069>
- Fajardo, P. y Sanz, U. 2003. Evaluación de la calidad física del café en los procesos de beneficio húmedo tradicional y ecológico (Becolsub). *Revista Cenicafé*. 54(4):286 - 296.
- Falcón O, E; Cobas L, M; Bonilla V, M; Rodríguez L, O; Romero C, CV; y Rodríguez L, E. (2021). Calidad de plántulas de *Swietenia mahagoni* L. Jacq., producida en sustratos con hongos micorrízicos arbusculares, Cuba. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1). 225- 311. <http://dx.doi.org/10.15359/rca.55-2.15>
- Fernández-Martín, F; Rivera-Espinosa, RA; Hernández-Jiménez, A; Herrera-Peraza, RA; y Fernández-Suárez, K. (2005). Inoculación de hongos micorrízicos arbusculares y diferentes relaciones suelo: humus de lombriz sobre el crecimiento del cafeto (*Coffea arabica* L.) CV. Catuaí bajo la etapa de vivero, en México. *Revista Chapingo serie horticultura*, 11(1): 175- 184. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60912502025>
- Foyer CH, Noctor G (2005) Oxidant and antioxidant signaling in plants: a re-evaluation of the concept of oxidative stress in a physiological context. *Plant, Cell & Environment* 28:1056-1071.
- Gill, S. S., Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant physiology and biochemistry*, 48 (12), 909-930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
- Guidi, L., Tattini, M. (2021). Antioxidant defenses in plants: a dated topic of current interest. *Antioxidants*, 10(6), 855. <https://doi.org/10.3390/antiox10060855>
- Gutiérrez, M. A., & Escobar, G. (2015). Calidad de suelos para el cultivo de café en diferentes regiones de Latinoamérica. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(2), 123-136.
- Hernández-Acosta, E., Trejo-Aguilar, D., Rivera-Fernández, A., & Ferrera-Cerrato, R. (2020). La micorriza arbuscular como biofertilizante en cultivo de café. *Terra Latinoamericana*, 38(3). <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.659>

- Hernández-Acosta, E; Banuelos, J; & Trejo-Aguilar, D. (2021). Distribución y efecto de los hongos micorrízicos en el agroecosistema de café, México. *Revista de Biología Tropical*, 69(2): 445-461. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v69n2/0034-7744-rbt-69-02-445.pdf>
- Jones, M. D., Durall, D. M., & Tinker, P. B. (1998). A comparison of arbuscular and ectomycorrhizal *Eucalyptus coccifera*: growth response, phosphorus uptake efficiency and external hyphal production. *The New Phytologist*, 140(1), 125-134.
- Karuppanapandian, T., Moon, J. C., Kim, C., Manoharan, K., & Kim, W. (2011). Reactive oxygen species in plants: their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms. *Australian Journal of Crop Science*, 5(6), 709-725.
- Kaur, S., Campbell, B. J., & Suseela, V. (2022). Root metabolome of plant–arbuscular mycorrhizal symbiosis mirrors the mutualistic or parasitic mycorrhizal phenotype. *New Phytologist*, 234(2), 672-687. <https://doi.org/10.1111/nph.17994>
- Kowalska, I., Konieczny, A., Gąstoł, M., Sady, W., & Hanus-Fajerska, E. (2015). Effect of mycorrhiza and phosphorus content in nutrient solution on the yield and nutritional status of tomato plants grown on rockwool or coconut coir. *Agricultural and Food Science*, 24(1), 39–51. <https://doi.org/10.23986/afsci.47204>
- Kumar, C., Wagh, J., Archana, G., & Naresh Kumar, G. (2016). Sucrose dependent mineral phosphate solubilization in *Enterobacter asburiae* PSI3 by heterologous overexpression of periplasmic invertases. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32, 1-10
- Lagos, S. M. (2010). *Evaluación de cuatro cepas de micorriza arbuscular en plantas de tomate en vivero, Zamorano, Honduras* (Tesis para optar el grado de doctor) Escuela Agrícola Panamericana, 2012]. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/605>
- Leal, P. L., Stürmer, S. L., & Siqueira, J. O. (2009). Occurrence and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in trap cultures from soils under different land use systems in the Amazon, Brazil. *Brazilian Journal of Microbiology*, 40(1), 111–121. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822009000100019>
- Márquez, Fanny Rosario, Quispe, Policarpo, Molleapaza, Norith, Cabrera, Sara, & Peña, Joel. (2020). Relación entre las características del suelo y altitud con la calidad sensorial de café cultivado bajo sistemas agroforestales en Cusco, Perú. *Scientia Agropecuaria*, 11(4), 529-536. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.04.08>

- MINAGRI. (2020). Situación actual del café en el país. Recuperado de <https://www.minagri.gob.pe/portal/download/2017/pncafe/sector-cafe-peru.pdf>
- Mohr, U., Lange, J., Boller, T., Wiemken, A., & Vogeli-Lange, R. (1998). Plant defence genes are induced in the pathogenic interaction between bean roots and *Fusarium solani*, but not in the symbiotic interaction with the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae*. *The New Phytologist*, 138(4), 589-598. <https://www.jstor.org/stable/2588659>
- Moreira, S. D., França, A. C., Graziotti, P. H., Leal, F. D. S., & Silva, E. D. B. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus doses on coffee growth under a non-sterile soil. *Revista Caatinga*, 32(1), 72–80. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n108rc>
- Mujica P, Y; y Molina D, L. (2017). Influencia de hongos micorrizicos arbusculares (*Rhizoglyphus intraradices*) y un estimulador del crecimiento vegetal en *Pennisetum purpureum* Sch, en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 38(1): 131-137. <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193250540017.pdf>
- Munir, J; Mohammand; Hanan, I; Malkawi; & Rida, S. (2003). Efecto de los hongos micorrizicos arbusculares y la fertilización con fósforo sobre el crecimiento y la absorción de nutrientes de la cebada cultivada en suelos con diferentes niveles de sales, en Jordania. *Journal of plant nutrition*, 26(1): 125-137. <https://doi.org/10.1081/PLN-120016500>
- OIRSA. Manual técnico Buenas Prácticas de Cultivo en café orgánico para productores. Altermec. 2000. 50.
- Ojeda-Quintana, LJ; Rivera-Espinosa, R; González-Cañizares, PJ; Rosa-Capote, JJ; Arteaga-Rodríguez, o; Hernández-Rodríguez, C. (2019). Efecto del abono verde de *Canavalia ensiformis* (L.) micorrizada en el cultivo sucesor *Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone Cuba CT-169, Cuba. *Pastos y Forrejes*, 42(4): 277- 284. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=269162670004>
- Osorio, N. W., Alzate, J. M., & Ramírez, G. A. (2002). Coffee seedling growth as affected by mycorrhizal inoculation and organic amendment. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(9–10), 1425–1434. <https://doi.org/10.1081/CSS-120004291>
- Pal, P. K., Prasad, R. y Singh, R. D. (2015). Evaluating the nondestructive method for determining the chlorophyll and nitrogen content in *Stevia rebaudiana* (Bertoni)

leaf. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*. 149(1), 131-135.

- Pedranzani, H., Rodríguez-Rivera, M., Gutiérrez, M., Porcel, R., Hause, B., & Ruiz-Lozano, J. M. (2016). La simbiosis micorrízica arbuscular regula la fisiología y el rendimiento de las plantas *Digitaria eriantha* sometidas a estrés abiótico modulando los niveles de antioxidantes y jasmonatos. *Micorrizas*, 26(2), 141-152. <https://doi.org/10.1007/s00572-015-0653>
- Perea-Rojas YC, Arias RM, Medel-Ortiz R, Trejo-Aguilar D, Heredia G, Rodríguez-Yon Y. (2018) Efectos de micorrizas arbusculares nativas y hongos solubilizadores de fosfato en plantas de café. *Sistema Agroforestal* 93,961-972. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0190-1>
- Pozo, M. J., Azcón-Aguilar, C., Dumas-Gaudot, E., & Barea, J. M. (1999). β -1,3-glucanase activities in tomato roots inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi and/or *Phytophthora parasitica* and their possible involvement in bioprotection. *Plant Science*, 141(2), 149-157.
- Prayogo, C., Prastyaji, D., Prasetya, B., & Arfarita, N. (2020). Estructura y composición de las principales micorrizas arbusculares (MA) bajo diferentes sistemas agroforestales de manejo agrícola de café y pino, en Indonesia. *Revista Agrivita de ciencias agrícolas*, 43(1), 146-163. <https://doi.org/10.17503/agrivita.v1i1.2639>
- Quiñónez, M. M., Enríquez, A. I. D., Flores, M. J. P., Palacios, R. K. Y., Olivas, S. M. P., Garza, O. F., Lebgue, K. T., & Nájera, M. J. A. (2018). Comunidades vegetales en el suelo de ecosistema semiárido y su relación con hongos micorrízicos, México. *Terra Latinoamericana*, 36(1), 381-391. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.401>
- Raij Van, Bernardo. (1983). Avaliação da Fertilidade do Solo. Instituto Agronômico do Estado de São Paulo, Campinas, SP. <https://edepot.wur.nl/480310>
- Restrepo, K. J., Montoya, M. I., Henao, P., Andrea, L. G., & Molina, L. G. (2019). Caracterización de hongos micorrízicos arbusculares de suelos ganaderos del trópico alto y trópico bajo en Antioquía, Colombia. *IDESIA*, 37(1), 35-44. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019005000301>
- Rodríguez, B. (2009). Respuesta del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a la aplicación combinada de hongos micorrízicos arbusculares, un estimulador del crecimiento y fertilizantes minerales (Tesis para optar el grado de maestro). INCA, Cuba.

- Rodríguez, Y., Fernández, A., Peteira, B., Fernández, F., & Solórzano, E. (2006). Inducción de enzimas de defensa en dos variedades de arroz (*Oryza sativa*) por el hongo micorrízico arbuscular *G. mosseae*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 8(2), 35-49.
- Rohyadi, A., Smith, F. A., Murray, R. S., & Smith, S. E. (2004). Effects of pH on mycorrhizal colonisation and nutrient uptake in cowpea under conditions that minimise confounding effects of elevated available aluminium. *Plant and Soil*, 260, 283-290.
- Romero-Arias, A., Ruz-Reyes, R., Nápoles-García, M. C., Leyva-Rodríguez, S. L., & Baez-González, J. E. (2021). Efecto de la aplicación de cepas de micorrizas en el desarrollo morfoagronómico de *Glycine max* L., en Cuba. *Pastos y Forrajes*, 44(1).
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S086403942021000100003&lng=es&tlng=es
- Rosales-Jenqui, P. R., Gonzáles-Cañizares, P. J., & Fundora-Sánchez, L. R. (2021). Respuesta del pasto Yacaré (*Urochloa híbrido* cv. CIAT BR02/1752) a la biofertilización con hongos micorrízicos arbusculares. *Cultivos Tropicales*, 42(1).
<https://www.redalyc.org/journal/1932/193266707001/html/>
- Ruiz-Lozano, J. M., & Aroca, R. (2010). Host response to osmotic stresses: stomatal behaviour and water use efficiency of arbuscular mycorrhizal plants. *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function*. pp 239-256. Springer, Dordrecht.
- Ruscitti, M., Arango, M., & Beltrano, J. (2017). Mejora de la tolerancia al estrés por cobre en plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L.) mediante la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares. *teor. Exp. planta física*. 29, 37–49.
<https://10.1007/s40626-016-0081-7>
- Saito, M., Stribley, D. P., & Hepper, C. M. (1993). Succinate dehydrogenase activity of external and internal hyphae of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus mosseae* (Nicol. & Gerd.) Gerdmann and Trappe, during mycorrhizal colonization of roots of leek (*Allium porrum* L.), as revealed by in situ histochemical staining. *Mycorrhiza*, 4, 59-62. <https://doi.org/10.1007/BF00204059>
- Salas López, R; Gómez Fernández, D; Silva López, JO; Rojas Briceño, NB; Oliva, M; Terrones Murga, RE; Iliquín Trigos, D; Barboza Castillo, E; y Barrera Gurbillón, MA. (2020). Aptitud de la tierra para el cultivo de café (*Coffea arabica*) en

- Amazonas, Perú: Uso integrado de AHP, GIS y RS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9 (11), 673. <http://dx.doi.org/10.3390/ijgi9110673>
- Sales, F., Tristão, M., Sara, L., Lopez, A., Andrade, D. E., Adriana, D. P., Silveira, D. A. (2006). Fungos micorrízicos arbusculares na formação de mudas de cafeeiro, em substratos orgânicos comerciais. *Bragantia*, 65(4), 649–658. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052006000400016>.
- Salzer, P., & Boller, T. (2000). Elicitor induced reactions in mycorrhizae and their suppression. *Current Advances in Mycorrhizae Research*. Section I: Signaling mechanisms in mycorrhizal symbiosis. APS Press, 1-10.
- Sanchez de Prager, M. (2007). Las Endomicorrizas: Expresión bioedáfica de importancia en el trópico. Palmira. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- Sánchez S, T. (2017). Efecto de inóculos de hongos micorrízicos arbusculares en plantas clonales de café (*Coffea arabica* L.) variedad Caturra en condiciones de invernadero, Rodríguez de Mendoza, Región Amazonas. (Tesis para optar el título profesional de ingeniero agrónomo). Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias,. Chachapoyas, Perú. <http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/1300/TESISTITO%20SANCH EZ%20SANTILLAN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sanchez, J. (2013). Manual para la producción de un café de calidad. Perú: Universidad de San Jose Costa Rica.
- Sang J, K; Ju-Kyeong, E; Eun-Hwa, L; Park, H. & Ahn-Heum, E. (2018). Efectos de los hongos micorrízicos arbusculares y las condiciones de suelos en el crecimiento de las plantas encultivo, en Corea. *Micobiología*, 45(1): 20-24. <https://doi.org/10.5941/MYCO.2017.45.1.20>
- Sharma, D., Kapoor, R., & Bhatnagar, A. K. (2008). Arbuscular mycorrhizal (AM) technology for the conservation of *Curculigo orchioides* Gaertn.: An endangered medicinal herb. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24(3), 395–400. <https://doi.org/10.1007/S11274-007-9488-2/TABLES/4>
- Siavosh S.K. (2016). La acidez del suelo; una limitante común para la producción de café. Avances técnicos. CENICAFE No. 466. Colombia. 12 p.

- Sieverding, E. (1991). Vesicular–arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems. In Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).
- Sieverding, E. (1991). Vesicular–arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems. In Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).
- Simmons, C. R. (1994). The physiology and molecular biology of plant 1, 3- β -D-glucanases and 1, 3; 1, 4- β -D-glucanases. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 13(4), 325-387.
- Smith, S. E., & Gianinazzi-Pearson, V. (1990). Phosphate uptake and arbuscular activity in mycorrhizal *Allium cepa* L.: effects of photon irradiance and phosphate nutrition. *Australian Journal of Plant Physiology*, 17, 177-188.
- Smith, S., & Read, D. (2008). Mycorrhizal Symbiosis. In Mycorrhizal Symbiosis. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6>
- Sofo, A., Scopa, A., Maria, N., & Vitti, A. (2015). Ascorbate peroxidase and catalase activities and their genetic regulation in plants subjected to drought and salinity stresses. *International Journal of Molecular Sciences*, 16, 13561–13578. <https://doi.org/10.3390/ijms160613561>
- Sousa Cruz, R., Henrique, F., Araújo, V., Cabral França, A., & Graziotti, P. H. (2019). Crescimento pós-plantio de cultivares de *Coffea arabica* inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares. *Revista Craibeiras de Agroecologia*, 4(1). <https://www.seer.ufal.br/index.php/era/article/view/8059>
- Stürmer, Sidney Luiz, & Kemmelmeier, K. (2021). The Glomeromycota in the Neotropics. *Frontiers in Microbiology*, 1–18. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.553679>
- Thilagar, G., & Bagyaraj, D. J. (2015). Influence of different arbuscular mycorrhizal fungi on growth and yield of chilly. Proceedings of the *National Academy of Sciences*, India Section B: Biological Sciences, 85, 71-75.
- Torres-Arias, Y., Fors, R. O., Nobre, C., Gómez, E. F., & Berbara, R. L. L. (2017). Production of native arbuscular mycorrhizal fungi inoculum under different environmental conditions. *Brazilian Journal of Microbiology*, 48, 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.10.012>
- Trejo, D., Ferrera-Cerrato, R., García, R., Varela, L., Lara, L., & Alarcón A. (2011). Efectividad de siete consorcios nativos de hongos micorrízicos arbusculares en

- plantas de café en condiciones de invernadero y campo, México. *Revista chilena de historia natural*, 84(1), 23-31. <https://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2011000100002>
- Trejo-Aguilar, D. (2018). Hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento de café (*Coffea arabica* L.) variedades garnica, catimor, caturra y catuaí. *Agro Productividad*, 11(4). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/352>
- Trinidad-Cruz, J. R., Quiñones-Aguilar, E. E., Hernández-Cuevas, L. V., López-Pérez, L., & Rincón-Enríquez, G. (2017). Hongos micorrízicos arbusculares asociados a la rizosfera de *Agave cupreata* en regiones mezcaleras del Estado de Michoacán, México. *Scientia Fungorum*, 45(1), 13-25. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-31802017000100013
- Trouvelot, A., Kough, J. L., & Gianinazzi-Pearson, V. (1985). Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthode d'estimation ayant une signification fonctionnelle. *Physiological and Genetical Aspects of Mycorrhizae: Proceedings of the 1st European Symposium on Mycorrhizae*, 217–221. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=8758731>
- USDA, Servicio Agrícola Extranjero. (2023). Café: Mercados y comercio mundial. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/home/statsByCountry>
- Vallejos-Torres, G., Saboya, A., & Arévalo, L. (2021). Efecto bioprotector de micorrizas arbusculares en la reducción de Roya (*Hemileia vastatrix*) en la región San Martín. *Revista Agrotecnología Amazónica*, 1(1), 34-44. <https://doi.org/10.51252/raa.v1i1.122>
- Wu, Q. S., Zou, Y. N., Xia, R. X., & Wang, M. Y. (2007). Five *Glomus* species affect water relations of Citrus tangerine during drought stress. *Botanical Studies*, 48, 147-154.
- Yang, Y., Tang, M., Sulpice, R., Chen, H., Tian, S., & Ban, Y. (2014). Arbuscular mycorrhizal fungi alter fractal dimension characteristics of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings through regulating plant growth, leaf water status, photosynthesis, and nutrient concentration under drought stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 33, 612–625. <https://doi.org/10.1007/s00344-013-9410-0>.

ANEXOS

ANEXO 1: Resultados de análisis de suelo.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN - TARAPOTO
 FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
 LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUAS Y FOLIARES



SOLICITANTE : MAYCOL GERMÁN OROSCO

FECHA DE REPORTE: 20/09/2022

PROVINCIA: SAN MARTÍN (S+A)

N°	Análisis mecánico			Clase Textural	pH	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	M.O. %	N %	P ppm	K ppm	OC	Cationes Cambiables (meq/100g)						% Sat. Bas.	% Ac. Interc.
	% Arena	% Arcilla	% Limo									Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	Al ³⁺ +H ⁺		
1	33.25	32	34.75	F Arcilloso	6.12	152.2	2.56	0.1	8.45	145.23	7.5	6.56	0.35	0.4	0.2	0	0	100	0.00

pH	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	% M.O.	% N	P ppm	K ppm	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Al ³⁺	Al ³⁺ +H ⁺
6.12	152.23	2.56	0.1152	8.45	145.23	6.56	0.35	0.2	0	0
Moderadamente ácido	No hay problemas de sales	Medio	Normal	Medio	Medio	Bajo	Muy bajo	Muy bajo		

d.a. \rightarrow 1.33 t/m³

Clasificación del suelo	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Clasificación	% M.O.	ppm P	ppm K	Escala de pH	pH
No hay problemas de sales	<2000	Bajo	<2	<7	<100	Extremadamente ácido	<4.5
Ligeros problemas de sales	2000 - 4000	Medio	2.0 - 4.0	7.0 - 10.0	100 - 240	Fuertemente ácido	>4.5 - 5.4
Medios problemas de sales	4000 - 8000	Alto	>4	>14	>240	Moderadamente ácido	>5.4 - 6.5
Fuerte problemas de sales	8000 - 16000					Neutro	>6.5 - 7.3
Muy fuertemente salino	> 16000					Moderadamente alcalino	>7.3 - 8.3
						Fuertemente alcalino	> 8.3


 Ing. Cristian Verde Castro
 Ing. Agrónomo Especialista
 U.N.S.M. - TARPOTO
 Facultad de Ciencias Agrarias



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN - TARAPOTO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUAS Y FOLIARES



SOLICITANTE : MAYCOL GERMÁN OROSCO

FECHA DE REPORTE: 20/09/2022

PROVINCIA: LAMAS (S+A)

N°	Análisis mecánico			Clase Textural	pH	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	M.O. %	N %	P ppm	K ppm	CIC	Cationes Cambiables (meq/100g)						% Sat. Bas.	% Aci. Inter
	% Arena	% Arcilla	% Limo									Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³	Al ⁺³ +H ⁺¹		
2	25.2	42.25	32.55	Arcilla	5.43	115.3	2.21	0.1	6.12	102.32	6.1	5.21	0.23	0.3	0.2	0.23	0.45	96	7.36

pH	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	% M.O.	% N	P ppm	K ppm	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	Al ⁺³	Al ⁺³ +H ⁺
5.43	115.32	2.21	0.09945	6.12	102.32	5.21	0.23	0.18	0.23	0.45
Moderadamente ácido	No hay problemas de sales	Medio	Bajo	Bajo	Medio	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Bajo	Bajo

d.a → 1.27 t/m³

Clasificación del suelo	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Clasificación	% M.O.	ppm P	ppm K	Escala de pH	pH
No hay problemas de sales	<2000	Bajo	< 2	< 7	< 100	Extremadamente ácido	< 4.5
Ligeros problemas de sales	2000 - 4000	Medio	2.0 - 4.0	7.0 - 10.0	100 - 240	Fuertemente ácido	> 4.5 - 5.4
Medios problemas de sales	4000 - 8000	Alto	> 4	> 14	> 240	Moderadamente ácido	> 5.4 - 6.5
Fuerte problemas de sales	8000 - 16000					Neutro	> 6.5 - 7.3
Muy fuertemente salino	> 16000					Moderadamente alcalino	> 7.3 - 8.3
						Fuertemente alcalino	> 8.3


 Ing. Carlos Verde Gilbrera
 Lab. de Análisis de Suelos y Agua
 UNSM - TARAPOTO
 Facultad de Ciencias Agrarias



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN - TARAPOTO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUAS Y FOLIARES



SOLICITANTE : MAYCOL GERMÁN OROSCO

FECHA DE REPORTE: 20/09/2022

PROVINCIA: DORADO (S+A)

N°	Análisis mecánico			Clase Textural	pH	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	M.O. %	N %	P ppm	K ppm	CIC	Cationes Cambiables (meq/100g)						% Sat. Bas.	% Aci. Inter
	% Arena	% Arcilla	% Limo									Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³	Al ⁺³ +H ⁺¹		
3	49	32	19	F Arci Arenoso	6.55	100.2	3.16	0.1	7.45	163.25	8.5	7.42	0.45	0.4	0.2	0	0	100	0.00

pH	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	% M.O.	% N	P ppm	K ppm	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	Al ⁺³	Al ⁺³ +H ⁺
6.55	100.23	3.16	0.1422	7.45	163.25	7.42	0.45	0.21	0	0
Neutro	No hay problemas de sales	Medio	Normal	Medio	Medio	Bajo	Muy bajo	Muy bajo		

d.a → 1.36 t/m³

Clasificación del suelo	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Clasificación	% M.O.	ppm P	ppm K	Escala de pH	pH
No hay problemas de sales	<2000	Bajo	< 2	< 7	< 100	Extremadamente ácido	< 4.5
Ligeros problemas de sales	2000 - 4000	Medio	2.0 - 4.0	7.0 - 10.0	100 - 240	Fuertemente ácido	> 4.5 - 5.4
Medios problemas de sales	4000 - 8000	Alto	> 4	> 14	> 240	Moderadamente ácido	> 5.4 - 6.5
Fuerte problemas de sales	8000 - 16000					Neutro	> 6.5 - 7.3
Muy fuertemente salino	> 16000					Moderadamente alcalino	> 7.3 - 8.3
						Fuertemente alcalino	> 8.3


 Ing. Carlos Verde Guallo
 Lab. de Análisis de Suelos y Aguas
 UNSM - TARAPOTO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN - TARAPOTO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUAS Y FOLIARES



SOLICITANTE : MAYCOL GERMÁN OROSCO

FECHA DE REPORTE: 20/09/2022

PROVINCIA: RIOJA (S+A)

N°	Análisis mecánico			Clase Textural	pH	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	M.O. %	N %	P ppm	K ppm	CIC	Cationes Cambiables (meq/100g)						% Sat. Bas.	% Aci. Inter
	% Arena	% Arcilla	% Limo									Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³	Al ⁺³ +H ⁺¹		
4	52	19	29	F Arenoso	4.02	170.1	2.45	0.1	4.25	85.23	7.2	4.23	0.12	0.2	0.1	2.53	3.78	65	52.51

pH	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	% M.O.	% N	P ppm	K ppm	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	Al ⁺³	Al ⁺³ +H ⁺
4.02	170.12	2.45	0.11025	4.25	85.23	4.23	0.12	0.1	2.53	3.78
Extremadamente ácido	No hay problemas de sales	Medio	Normal	Bajo	Bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy alto	Muy alto

d.a → 1.44 t/m³

Clasificación del suelo	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Clasificación	% M.O.	ppm P	ppm K	Escala de pH	pH
No hay problemas de sales	<2000	Bajo	< 2	< 7	< 100	Extremadamente ácido	< 4.5
Ligeros problemas de sales	2000 - 4000	Medio	2.0 - 4.0	7.0 - 10.0	100 - 240	Fuertemente ácido	> 4.5 - 5.4
Medios problemas de sales	4000 - 8000	Alto	> 4	> 14	> 240	Moderadamente ácido	> 5.4 - 6.5
Fuerte problemas de sales	8000 - 16000					Neutro	> 6.5 - 7.3
Muy fuertemente salino	> 16000					Moderadamente alcalino	> 7.3 - 8.3
						Fuertemente alcalino	> 8.3

Ing. Carlos Verde Gidoau
 Lab. de Análisis de Suelos y Aguas
 UNISM - TARAPOTO
 Facultad de Ciencias Agrarias

ANEXO 2: Análisis foliar.


INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
INVESTIGACIÓN Y PROMOCIÓN TECNOLÓGICA PARA EL DESARROLLO DE LA AGRICULTURA TROPICAL
ESTACION EXPERIMENTAL
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS
REPORTE DE ANÁLISIS FOLIAR

N° SOLICITUD : 0045-01-33
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTIN
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - UNSM
 TIPO DE MATRIZ : FOLIAR (HOJAS DE CAFÉ)

FECHA DE MUESTREO : SIN DATO
 FECHA DE RECEP. LAB : 22/02/2023
 FECHA DE REPORTE : 08/03/2023

Item	Número de la muestra			N	P	Totales	
	Lab.		Campo				%
01	23	02	0247	T1 P3	4.50	0.13	1.87
02	23	02	0248	T1 P4	4.47	0.11	1.89
03	23	02	0249	T1 P5	4.47	0.12	2.18
04	23	02	0250	T2 P6	6.54	0.04	1.19
05	23	02	0251	T2 P6	6.05	0.04	1.61
06	23	02	0252	T2 P13	6.60	0.05	1.31
07	23	02	0253	T3 P6	3.88	0.09	2.03
08	23	02	0254	T3 P7	3.89	0.08	2.00
09	23	02	0255	T3 P8	3.85	0.08	2.14

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 TAYHUATO - PISA

 Cesar O. Aranda Hernandez, MSc
 JEFE DE OPTO. DE SUELOS

MÉTODOS:	
NITRÓGENO	Kjeldahl
FOSFORO	Digestión (M33) Espectr. UV-Vis (M513 01)
POTASIO	Digestión (M33) Espectr. Absorción Atómica

La Banda de Shicayo, 08 de Marzo del 2023

Nota: Elaboración no es responsable por la metodología utilizada por el cliente en la muestra del presente reporte.


INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES - INSTITUTO DE INVESTIGACIONES Y SERVICIOS TECNOLÓGICOS
INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS
REPORTE DE ANÁLISIS FOLIAR

Nº SOLICITUD	: 2045-03-21	FECHA DE MUESTREO	: SIN DATO
SOLICITANTE	: UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN	FECHA DE RECEP. LAB	: 22/02/2023
PROCEDENCIA	: SAN MARTÍN - UNISM	FECHA DE REPORTE	: 03/03/2023
TIPO DE MATRIZ	: FOLIAR (HOJAS DE CAFÉ)		

Nº	Número de la muestra				N	P	Potasio
	Lab.		Campo				
01	23	02	0296	T4 P5	4.06	0.06	1.47
02	23	02	0257	T4 P12	4.04	0.09	1.55
03	23	02	0298	T4 P14	4.34	0.09	1.53
04	23	02	0299	T5 P2	4.26	0.13	1.93
05	23	02	0200	T5 P4	4.60	0.12	2.01
06	23	02	0261	T5 P5	4.17	0.14	2.00
07	23	02	0262	T6 P4	7.01	0.05	1.40
08	23	02	0263	T6 P7	7.11	0.05	1.25
09	23	02	0264	T6 P15	6.51	0.04	1.69

 INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
 DEPARTAMENTO DE SERVICIOS

 Cesar O. Aranda Armandes, MSc
 JEFE DE OFICINA DE SUELOS

MÉTODOS:	
NITROGENO	Espectro
FOSFORO	Espectro I-AO1 / Espect. UA / UA (I-AO1 m)
POTASIO	Espectro I-AO1 / Espect. Absorbencia

La Banda de Shilcayo, 08 de Marzo del 2023

Nota: El cliente es responsable por la veracidad de los datos que se le reportan.


INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES

 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRARIAS PARA EL DESARROLLO DE LA ALIMENTACIÓN
 CENTRO DE INVESTIGACIONES Y SERVICIOS

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS
REPORTE DE ANÁLISIS FOLIAR

 N° SOLICITUD : 004-0123
 SOLICITANTE : UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
 PROCEDENCIA : SAN MARTÍN - UNOSM
 TIPO DE MUESTRA : FOLIAR (HOJAS DE CAFÉ)

 FECHA DE MUESTREO : SIN DATO
 FECHA DE RECEP. LAB : 22/02/2023
 FECHA DE REPORTE : 09/03/2023

N°	Número de la muestra				N	P	Peso
	Lab.			Campo			
01	23	02	0265	T7 P5	4.02	0.07	2.05
02	23	02	0266	T7 P6	4.24	0.08	1.95
03	23	02	0267	T7 P9	4.24	0.12	2.30
04	23	02	0268	T8 P3	4.08	0.08	1.39
05	23	02	0269	T8 P5	3.75	0.06	1.00
06	23	02	0270	T8 P6	4.17	0.08	1.48
07	23	02	0271	T9 P3	4.47	0.11	2.15
08	23	02	0272	T9 P6	4.23	0.13	2.17
09	23	02	0273	T9 P8	4.46	0.11	2.21

 Instituto de Cultivos Tropicales
 TAYACAJO - PERÚ

 Cesar O. Frade Arriandot, MSc
 JEFE DE OFICINA DE SERVICIOS

ACTOR:	
INOCUO:	Epitel
FOSFORO:	Digestión HNO ₃ - Espectro UV/Vis (3-475 nm)
POTASIO:	Digestión HNO ₃ - Espectro Fluorimétrico

La Banda de Shicayo, 08 de Marzo del 2023

Nota: El laboratorio no es responsable por la información aplicada para la toma de la muestra y el método reportado.


INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS Y GANADERAS DE LA UNIVERSIDAD PERUANA
ENTREGA DE SERVICIOS
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS
REPORTE DE ANÁLISIS FOLIAR

N° SOLICITUD	:	3045-94-03	FECHA DE MUESTREO	:	SN DATO
SOLICITANTE	:	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN	FECHA DE RECEPCIÓN	:	23/03/2023
PROCEDENCIA	:	SAN MARTÍN - UNSM	FECHA DE REPORTE	:	08/03/2023
TIPO DE MATRIZ	:	FOLIAR (HOJAS DE CAFÉ)			

N°	Número de la muestra				N	P	Potasio
	Lab.	Campa					
01	23	02	0274	T10 P2	6.17	0.08	2.45
02	23	02	0275	T10 P6	6.03	0.06	1.67
03	23	02	0276	T10 P8	6.33	0.05	1.16
04	23	02	0277	T11 P3	5.59	0.03	1.81
05	23	02	0278	T11 P8	5.40	0.03	1.91
06	23	02	0279	T11 P9	5.93	0.03	1.83
07	23	02	0280	T12 P3	4.90	0.03	2.20
08	23	02	0281	T12 P5	1.43	0.03	2.19
09	23	02	0282	T12 P8	1.39	0.03	2.38

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES
UNIVERSIDAD PERUANA
[Firma]
César O. Aranda Alvarado, MSc
JEFE DE OPTO DE SUELOS

MÉTODOS:	
NITRÓGENO	Spectral
FOSFORO	Digestión HNO ₃ (Aspirador) (30-30) (MTC) (M)
POTASIO	Digestión HNO ₃ (Aspirador) (30-30) (MTC) (M)

La Banda de Shilcayo, 08 de Marzo del 2023

Nota: El presente es un reporte preliminar de laboratorio y puede estar sujeto a modificaciones.

ANEXO 3: Comparación de altura de las plántulas de *Coffea arabica* L.

Rh. dunense *Rh. variabile* *Control*
El Dorado

Rh. dunense *Rh. variabile* *Control*
Lamas

Rh. dunense *Rh. variabile* *Control*
Rioja

Rh. dunense *Rh. variabile* *Control*
San Martin

Características físico-químicas
del suelo sobre el potencial
simbiótico de hongos
micorrízicos arbusculares en
plántulas de *Coffea arabica* L.,
Tarapoto

por MAYCOL GERMAN OROSCO

Fecha de entrega: 13-mar-2025 01:48p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2613701330

Nombre del archivo: TESIS_Maycol_German_Orosco_09.03.2025.docx (9.9M)

Total de palabras: 23545

Total de caracteres: 126677

Características físico-químicas del suelo sobre el potencial simbiótico de hongos micorrízicos arbusculares en plántulas de *Coffea arabica* L., Tarapoto

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
2	repositorio.unsm.edu.pe Fuente de Internet	3%
3	tesis.unsm.edu.pe Fuente de Internet	2%
4	Submitted to Universidad Nacional de San Martín Trabajo del estudiante	2%
5	repositoriodigital.ipn.mx Fuente de Internet	1%
6	es.scribd.com Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.unapiquitos.edu.pe Fuente de Internet	<1%