

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN - TARAPOTO

ESCUELA DE POSGRADO

PROGRAMA DE DOCTORADO EN PRODUCCIÓN VEGETAL Y  
ECOSISTEMAS AGROFORESTALES



Efectos de la inoculación de micorrizas arbusculares sobre la tolerancia a roya en clones de café (*Coffea arabica* L.) Var. Caturra y Pache en Moyobamba, Perú

Tesis para optar el Grado Académico de Doctor en Producción Vegetal y Ecosistemas Agroforestales

**AUTOR:**

Geomar Vallejos Torres

**ASESOR:**

Dr. Agustín Cerna Mendoza

Tarapoto - Perú

2021



Esta obra está bajo una [Licencia  
Creative Commons Atribución-  
NoComercial-Compartirigual 2.5 Perú.](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/)

Vea una copia de esta licencia en  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN – TARAPOTO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN PRODUCCIÓN VEGETAL Y  
ECOSISTEMAS AGROFORESTALES**



**Efectos de la inoculación de micorrizas arbusculares sobre la tolerancia a  
roya en clones de café (*Coffea arabica* L.) Var. caturra y pache en  
Moyobamba, Perú**

**Tesis para optar el Grado Académico de Doctor en Producción Vegetal y  
Ecosistemas Agroforestales**

**AUTOR:**

**Geomar Vallejos Torres**

**ASESOR:**

**Dr. Agustín Cerna Mendoza**

**Tarapoto-Perú**

**2021**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN – TARAPOTO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN PRODUCCIÓN VEGETAL Y  
ECOSISTEMAS AGROFORESTALES**



**Efectos de la inoculación de micorrizas arbusculares sobre la tolerancia a  
roya en clones de café (*Coffea arabica* L.) Var. caturra y pache en  
Moyobamba, Perú**

**Tesis para optar el Grado Académico de Doctor en Producción Vegetal y  
Ecosistemas Agroforestales**

**AUTOR:**

**Geomar Vallejos Torres**

**ASESOR:**

**Dr. Agustín Cerna Mendoza**

**Tarapoto-Perú**

**2021**

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN – TARAPOTO

## ESCUELA DE POSGRADO

### PROGRAMA DE DOCTORADO EN PRODUCCIÓN VEGETAL Y ECOSISTEMAS AGROFORESTALES



**Efectos de la inoculación de micorrizas arbusculares sobre la tolerancia a roya en clones de café (*Coffea arabica* L.) Var. caturra y pache en Moyobamba, Perú**

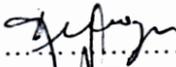
**AUTOR:**

**Geomar Vallejos Torres**

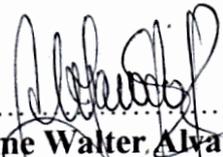
**Sustentada y aprobada el 23 de junio del 2021, por el siguiente jurado:**

  
.....  
**Blgo. Dr. Winston Franz Ríos Ruíz**

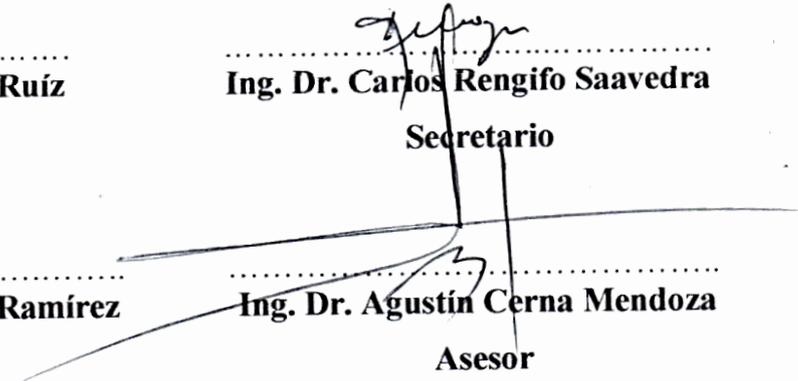
**Presidente**

  
.....  
**Ing. Dr. Carlos Rengifo Saavedra**

**Secretario**

  
.....  
**Ing. Dr. Jaime Walter Alvarado Ramírez**

**Miembro**

  
.....  
**Ing. Dr. Agustín Cerna Mendoza**

**Asesor**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN – TARAPOTO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN PRODUCCIÓN VEGETAL Y  
ECOSISTEMAS AGROFORESTALES**



**Efectos de la inoculación de micorrizas arbusculares sobre la tolerancia a  
roya en clones de café (*Coffea arabica* L.) Var. caturra y pache en  
Moyobamba, Perú**

**Tesis para optar el Grado Académico de Doctor en Producción Vegetal y  
Ecosistemas Agroforestales**

**El suscrito y asesor declaran que el presente trabajo de tesis es original, en su  
contenido y forma.**

.....  
**Ing. M. Sc. Geómar Vallejos Torres**  
Ejecutor

.....  
**Dr. Agustín Cerna Mendoza**  
Asesor

## Declaratoria de autenticidad

**Geomar Vallejos Torres**, con DNI N° 01162440, egresado de la Escuela de Posgrado, Programa de Doctorado en Producción Vegetal y Ecosistemas Agroforestales de la Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto, autor de la tesis titulada: **Efectos de la inoculación de micorrizas arbusculares sobre la tolerancia a roya en clones de café (*Coffea arabica* L.) Var. caturra y pache en Moyobamba, Perú.**

Declaro bajo Juramento:

1. La Tesis presentada es de mi autoría
2. La redacción se ha realizado, teniendo en cuenta las citas y referencias bibliográficas para las fuentes de consulta.
3. La información plasmada en esta tesis, no fue auto plagiada
4. Los datos en los resultados son reales, no fueron alterados, ni copiados; por lo tanto, la información de esta investigación debe considerarse como aporte a la realidad investigada.

Por lo antes mencionado, asumo la responsabilidad y las posibles consecuencias de mi accionar deriven, sometiéndome a las normas vigentes de la Universidad Nacional de San Martín. - Tarapoto.

Tarapoto, 23 de junio de 2021.



.....  
**Ing. M. Sc. Geomar Vallejos Torres**

DNI N° 01162440

**Formato de autorización NO EXCLUSIVA para la publicación de trabajos de investigación, conducentes a optar grados académicos y títulos profesionales en el Repositorio Digital de Tesis**

**1. Datos del autor:**

Apellidos y nombres:	Vallejos Torres Geomar	
Doctorado / Maestría / Segunda Especialidad:	Doctorado.	Teléfono: 956477427
Correo electrónico :	gvallejos@gmail.com	DNI: 01162440

(En caso haya más autores, llenar un formulario por autor)

**2. Datos Académicos**

Facultad de:	Ciencias Agrarias
Programa de:	Doctorado en Producción Vegetal y Ecosistemas Agroforestales

**3. Tipo de trabajo de investigación**

Tesis	<input checked="" type="checkbox"/>	Trabajo de investigación	<input type="checkbox"/>
Trabajo de suficiencia profesional	<input type="checkbox"/>		

**4. Datos del Trabajo de investigación**

Título :	Efectos de la inoculación de micorrizas arbusculares sobre la tolerancia a Noya en clones de café (Coffea arabica L.) var. Caturra y producción Mayababo.
Año de publicación:	2021

**5. Tipo de Acceso al documento**

Acceso público *	<input checked="" type="checkbox"/>	Embargo	<input type="checkbox"/>
Acceso restringido **	<input type="checkbox"/>		

Si el autor elige el tipo de acceso abierto o público, otorga a la Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto, una licencia **No Exclusiva**, para publicar, conservar y sin modificar su contenido, pueda convertirla a cualquier formato de fichero, medio o soporte, siempre con fines de seguridad, preservación y difusión en el Repositorio de Tesis Digital. Respetando siempre los Derechos de Autor y Propiedad Intelectual de acuerdo y en el Marco de la Ley 822.

En caso que el autor elija la segunda opción, es necesario y obligatorio que indique el sustento correspondiente:


**6. Originalidad del archivo digital.**

Por el presente dejo constancia que el archivo digital que entrego a la Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto, como parte del proceso conducente a obtener el título profesional o grado académico, es la versión final del trabajo de investigación sustentado y aprobado por el Jurado.

## 7. Otorgamiento de una licencia *CREATIVE COMMONS*

Para investigaciones que son de acceso abierto se les otorgó una licencia *Creative Commons*, con la finalidad de que cualquier usuario pueda acceder a la obra, bajo los términos que dicha licencia implica

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>

El autor, por medio de este documento, autoriza a la Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto, publicar su trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Digital de Tesis, al cual se podrá acceder, preservar y difundir de forma libre y gratuita, de manera íntegra a todo el documento.

Según el inciso 12.2, del artículo 12º del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales - RENATI "Las universidades, instituciones y escuelas de educación superior tienen como obligación registrar todos los trabajos de investigación y proyectos, incluyendo los metadatos en sus repositorios institucionales precisando si son de acceso abierto o restringido, los cuales serán posteriormente recolectados por el Repositorio Digital RENATI, a través del Repositorio ALICIA".



Firma y huella del Autor

## 8. Para ser llenado en el Repositorio Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto.

Fecha de recepción del documento:

23 / 08 / 2021



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN - T.  
Repositorio Digital de Ciencia, Tecnología e  
Innovación de Acceso Abierto - UNSM-T.

Ing. M. Sc. Alfredo Ramos Perea  
Responsable

\***Acceso abierto:** uso lícito que confiere un titular de derechos de propiedad intelectual a cualquier persona, para que pueda acceder de manera inmediata y gratuita a una obra, datos procesados o estadísticas de monitoreo, sin necesidad de registro, suscripción, ni pago, estando autorizada a leerla, descargarla, reproducirla, distribuirla, imprimirla, buscarla y enlazar textos completos (Reglamento de la Ley No 30035).

\*\* **Acceso restringido:** el documento no se visualizará en el Repositorio.

## **Dedicatoria**

A Dios Padre Celestial por brindarme la salud, oportunidad de vivir y poder cumplir mis metas y propósito en este planeta tierra.

A mi esposa Nery Gaona Jimenez, razón de mi vida por la confianza, cariño, amor y apoyo en todo momento y a mi hija: Camila Vallejos Gaona con mucho amor y aprecio.

A mis hermanos; Dely, Loribet, Dolmiza, Silmer, Rogelio, Engelbert y Doris con mucho cariño y respeto siempre unidos todos durante los años de vida

## **Reconocimiento**

A los **Docentes del Doctorado de Producción Vegetal y Ecosistemas Agroforestales de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de San Martín-Tarapoto**, por sus sabias enseñanzas y aprendizajes en los cursos desarrollados.

Al Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana por ser parte de mi formación profesional como posgrado tanto en las áreas de maestría y doctorado.

Al Dr. César Marín Daza, Departamento de Ecosistemas y Medio Ambiente, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Universidad de O'Higgins-Chile, por sus sabias y valiosos aportes científico al presente estudio.

## Agradecimiento

Al Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana con la Dirección del **Ing. Dr. Luis Alberto Arévalo López** por darme la oportunidad, apoyo técnico y científico durante los meses de ejecución de la tesis; asimismo a las revisiones y mejoras del informe final de la tesis.

Al Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica – FONDECYT por financiar el presente trabajo de investigación en el marco de las actividades del proyecto “**Generación de tecnologías de adaptación a los efectos negativos del cambio climático como un modelo sostenible y exitoso de la caicultura en la región San Martín**” con Contrato N°20-2018-FONDECYT-BM-IADT-AV.

A la Universidad Nacional de San Martín, en especial a la Facultad de Ciencias Agrarias con la Decanatura del Ing. Dr. Orlando Ríos Ramírez por las facilidades y apoyo técnico a la presente tesis.

Al Ing. **Dr. Agustín Cerna Mendoza** por su valioso apoyo en el asesoramiento de la presente Tesis, quien brindo las orientaciones y aporte científico a la investigación.

A mis amigos y colegas Decny Omar Chinchay, Osmar Villalobos, Miguel Ángel Tenorio Cercado y Jorge Max Navarro por su apoyo incondicional en la toma de datos y evaluación de indicadores de tesis.

## Índice general

	Pág.
Dedicatoria.....	vii
Reconocimiento .....	viii
Agradecimiento .....	ix
Índice general .....	x
Índice de tablas .....	xiii
Índice de figuras .....	xiv
Resumen .....	xvi
Abstract.....	xvii
 Introducción.....	 1
 CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	 5
1.1. Generalidades del cultivo del cafeto.....	5
1.1.1. Cultivo del café en el Perú.....	5
1.1.2. Variedades de café cultivadas en la región San Martín.....	5
1.2. Nutrición (N y P) y clorofila en <i>C. arabica</i> .....	6
1.2.1. Nitrógeno y fosforo .....	6
1.2.2. Clorofila.....	7
1.3. Hongo <i>H. vastatrix</i> en el cafeto.....	8
1.3.1. Patogenicidad .....	8
1.3.2. Ciclo biológico. ....	9
1.4. Hongos micorrízicos arbusculares (HMA).....	10
1.4.1. Generalidades de los HMA .....	10
1.4.2. Efectos de los HMA en el cultivo de café .....	10
1.5. Glomalina presente en suelos micorrizados. ....	11
1.6 Estrés en los vegetales .....	11
1.7. Enzimas antioxidantes .....	12
1.8. Microbios productores de fitohormonas .....	14
 CAPÍTULO II MATERIAL Y MÉTODOS .....	 15
2.1. Localización del área de estudio.....	15

2.2. Condiciones climáticas durante el estudio. ....	16
2.3. Características del área antes de instalar la parcela de investigación.....	17
2.4. Características del suelo de la parcela de investigación. ....	17
2.5. Análisis molecular de plantas matrices de café seleccionadas en campo... ..	18
2.6. Producción de plántulas de café por propagación vegetativa.....	19
2.7. Propagación e inoculación con HMA a plántulas clonadas de café.....	19
2.8. Obtención y preparación de <i>H. vastatrix</i> .....	21
2.9. Infección con <i>H. vastatrix</i> a plántulas propagadas de café.....	22
2.10. Establecimiento de plántulas de café micorrizadas en campo.....	22
2.11. Evaluaciones realizadas.....	23
2.11.1. Estimación de la longitud de micelio extraradical. ....	23
2.11.2. Evaluación de la colonización micorrízica. ....	24
2.12. Determinación del estado nutricional de <i>Coffea arabica</i> . ....	25
2.12.1. Determinación del nitrógeno (N) y fósforo (P). ....	25
2.13. Determinación del crecimiento y floración de <i>Coffea arabica</i> . ....	26
2.14. Extracción y cuantificación de la glomalina y catalasa en suelos micorrizados .....	27
2.14.1. Glomalina total (GT).....	27
2.14.2. Determinación de la Catalasa.....	45
2.15. Determinación de la resistencia a <i>H. vastatrix</i> en <i>Coffea arabica</i> . ....	28
2.15.1. Incidencia a roya en plántulas de café.....	28
2.15.2. Severidad a roya en plántulas de café. ....	28
2.16. Diseño estadístico.....	30
CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	31
3.1. Resultados .....	31
3.1.1. Micorrización en plantas de café logradas por propagación vegetativa .....	31
3.1.2. Crecimiento de plantas micorrizadas de café (altura, número de ramas, área foliar y floración). ....	34
3.1.3. Estado nutricional en clones micorrizadas de café. ....	39
3.1.4. Glomalina y catalasa en clones de café en caturra y pache. ....	43
3.1.5. Correlación entre las procedencias de HMA y la patogenicidad del hongo <i>H.</i> <i>vastatrix</i> en clones de café en las variedades de caturra y pache. ....	46
3.2. Discusión.....	47
3.2.1. Micorrización en plantas de café logradas por propagación vegetativa .....	47

3.2.2.Crecimiento de plantas micorrizadas de café (altura, número de ramas, área foliar y floración). .....	51
3.2.3.Estado nutricional en clones micorrizadas de café. ....	53
3.2.4.Glomalina y catalasa en clones de café caturra y pache. ....	54
3.2.5.Correlación entre las procedencias de HMA y la patogenicidad del hongo H. vastatrix en clones de café en las variedades de caturra y pache. ....	57
 CONCLUSIONES.....	 62
 RECOMENDACIONES .....	 64
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	 65
 ANEXOS.....	 86

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Valores de las condiciones climáticas evaluadas .....	16
<b>Tabla 2.</b> Característica físico-químico de suelos en parcela de investigación.....	17
<b>Tabla 3.</b> Procedencia de los consorcios y especies de HMA en la rizósfera de <i>C. arabica</i> .....	20
<b>Tabla 4.</b> Grado o calificación para la severidad a roya en plantas de café .....	29
<b>Tabla 5.</b> Análisis de varianza para la longitud de micelio en plantas micorrizadas de <i>C. arabica</i> . Datos transformados Ln (x). .....	31
<b>Tabla 6.</b> Análisis de varianza para la colonización micorrízica (%) en plantas micorrizadas de <i>C. arabica</i> . Datos transformados Ln (x).....	32
<b>Tabla 7.</b> Análisis de varianza para la altura de planta (cm) micorrizadas de <i>C. arabica</i> . Datos transformados Ln (x). .....	34
<b>Tabla 8.</b> Análisis de varianza para el número de ramas en plantas micorrizadas de <i>C.</i> <i>arabica</i> . Datos transformados Ln (x).....	35
<b>Tabla 9.</b> Análisis de varianza para el área foliar (cm <sup>2</sup> ) en plantas micorrizadas de <i>C.</i> <i>arabica</i> . Datos transformados Ln (x).....	36
<b>Tabla 10.</b> Análisis de varianza para el número de flores en plantas micorrizadas de <i>C.</i> <i>arabica</i> . Datos transformados Ln (x).....	38
<b>Tabla 11.</b> Análisis de varianza para el contenido de nitrógeno (%) en plantas micorrizadas de <i>C. arabica</i> . Datos transformados Ln (x).....	39
<b>Tabla 12.</b> Análisis de varianza para el contenido de fósforo (%) en plantas micorrizadas de <i>C. arabica</i> . Datos transformados Ln (x).....	40
<b>Tabla 13.</b> Análisis de varianza para el índice de contenido de clorofila en plantas micorrizadas de <i>C. arabica</i> . Datos transformados Ln (x).....	42
<b>Tabla 14.</b> Análisis de varianza para la glomalina (mg/g) en plantas micorrizadas de <i>C.</i> <i>arabica</i> . Datos transformados Ln (x).....	43
<b>Tabla 15.</b> Análisis de varianza para la catalasa (U/g) en plantas micorrizadas de <i>C.</i> <i>arabica</i> . Datos transformados Ln (x).....	44
<b>Tabla 16.</b> Correlación entre la colonización micorrízica y la patogenicidad del hongo <i>H. vastatrix</i> en clones de café en las variedades de caturra y pache.....	46

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Ubicación Geográfica del área de estudio.....	15
<b>Figura 2.</b> Condiciones climáticas evaluados durante el desarrollo del estudio .....	16
<b>Figura 3.</b> Dendograma UPGMA estimada por la distancia de provesti para individuos de <i>C. arabica</i> , nótese dos grupos: Caturra + Nacional (celeste) y Pache + Nacional (rojo). .....	18
<b>Figura 4.</b> Producción de clones de café.....	19
<b>Figura 5.</b> Proceso de propagación e inoculación micorrízica.....	20
<b>Figura 6.</b> Proceso de preparación de roya .....	21
<b>Figura 7.</b> Infestación de roya a plántones de café .....	22
<b>Figura 8.</b> Establecimiento de parcela experimental.....	23
<b>Figura 9.</b> Evaluación de micelio extraradical en plántones de caturra y pache.....	24
<b>Figura 10.</b> Colonización micorrízica en raíces teñidas de café. ....	25
<b>Figura 11.</b> Crecimiento y floración en plantas clonadas y micorrizadas de café .....	26
<b>Figura 12.</b> Escala de severidad para <i>Hemileia vastatrix</i> (SAGARPA, 2013) .....	29
<b>Figura 13.</b> Patogenicidad de roya en plantas clonadas y micorrizadas .....	29
<b>Figura 14.</b> Longitud de micelio (cm) evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café. ....	32
<b>Figura 15.</b> Colonización micorrízica (%) evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.....	33
<b>Figura 16.</b> Altura de planta (cm) evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café. ....	34
<b>Figura 17.</b> Número de ramas evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.....	36
<b>Figura 18.</b> Área foliar (cm <sup>2</sup> ) evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.....	37
<b>Figura 19.</b> Número de flores evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.....	38
<b>Figura 20.</b> Contenido de nitrógeno (%) evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.....	40
<b>Figura 21.</b> Contenido de fósforo (%) evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.....	41

<b>Figura 22.</b> Índice de contenido de clorofila evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café. ....	42
<b>Figura 23.</b> Glomalina (mg/g) evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.....	24
<b>Figura 24.</b> Catalasa (U/g) evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.....	45
<b>Figura 25.</b> Correlación entre la colonización micorrízica y la incidencia al hongo <i>H. vastatrix</i> en clones de café en las variedades de caturra y pache. ....	46
<b>Figura 26.</b> Correlación entre la colonización micorrízica y la severidad al hongo <i>H. vastatrix</i> en clones de café en las variedades de caturra y pache. ....	47

## Resumen

Entre el 2011 y 2013, algunos países productores de café en América del Sur, Central y Perú sufrieron graves afectaciones por la presencia de la roya, generando grandes pérdidas económicas con implicaciones sociales. En el presente estudio, se evaluó el efecto de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en el estado de nutrientes, crecimiento, glomalina, catalasa y resistencia a roya en café en la provincia de Moyobamba, Perú a partir de plantas clonadas de caturra y pache, a las cuales se inocularon 2 000 esporas de HMA por consorcio seleccionado procedente de las provincias de Moyobamba, El Dorado y Huallaga. Después de 110 días en vivero los plantones fueron infestados con roya y a los 160 días estas fueron establecidas en campo mediante un diseño factorial de 4A X 2B, caracterizado por el análisis de concentraciones de HMA y variedades clonales de café. Se evaluaron la micorrización, estado nutricional, crecimiento morfológico de la planta, glomalina catalasa y patogenicidad. La micorrización, muestra diferencias significativas en plantas clonadas de caturra con aplicación de HMA procedente del Huallaga con 48,20 cm para el micelio y colonización micorrízica, de 64, 81 %, la altura de plantas, número de ramas, área foliar y flores muestran diferencias significativas en plantas clonadas de caturra y pache con aplicación de micorrizas arbusculares (MA) procedente del Huallaga y El Dorado con promedios de 57,3 cm, 14,2 ramas, 1 406,3 cm<sup>2</sup> y 16 flores. El contenido de nitrógeno y fósforo evaluado en hojas, no muestra diferencias significativas en los tratamientos evaluados, pero si el índice de contenido de clorofila con aplicación de MA procedente del Huallaga, Moyobamba y El Dorado con valores que van desde 58,4 a 60,7. La incidencia y severidad a roya evaluada en hojas de café, muestra diferencias significativas en plantas clonadas de caturra y pache con aplicación de MA procedente del Huallaga con valores que van desde 18 a 14,3 %. La glomalina y la catalasa mostraron valores de 12,34 mg/g y 6,99 U/g. El estudio ha demostrado la importancia que tienen los consorcios de Hongos HMA, debido a su efecto positivo sobre el crecimiento en plantas de café en campo, contenido de clorofila y efecto bioprotector de los consorcios de HMA, traduciéndose en la reducción de la incidencia y severidad a roya; asimismo afectan el contenido de glomalina y catalasa en el suelo.

**Palabras clave:** Café, catalasa, glomalina, micorrización, patogenicidad, roya amarilla.

## Abstract

Between 2011 and 2013, some coffee-producing countries of South America, Central America and Peru were severely affected by the presence of rust, generating large economic losses with social implications. In the present study, the effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on nutrient status, growth, glomalin, catalase and rust resistance was evaluated in coffee in the province of Moyobamba, Peru from cloned plants of caturra and pache, which were inoculated with 2,000 AMF spores per selected consortium from the provinces of Moyobamba, El Dorado and Huallaga. After 110 days in the nursery, the seedlings were infested with rust and after 160 days they were established in the field using a 4A X 2B factorial design, characterized by the analysis of AMF concentrations and clonal coffee varieties. Mycorrhization, nutritional status, plant morphological growth, glomalin catalase and pathogenicity were evaluated. Mycorrhization showed significant differences in plants cloned from caturra with application of AMF from Huallaga, with 48.20 cm for mycelium and mycorrhizal colonization of 64, 81 %, plant height, number of branches, leaf area and flowers showed significant differences in plants cloned from caturra and pache with application of AMF from Huallaga and El Dorado with averages of 57.3 cm, 14.2 branches, 1,406.3 cm<sup>2</sup> and 16 flowers. The nitrogen and phosphorus content evaluated in leaves did not show significant differences in the treatments evaluated, but the chlorophyll content index with application of AM from Huallaga, Moyobamba and El Dorado showed values ranging from 58.4 to 60.7. The incidence and severity of rust evaluated in coffee leaves showed significant differences in cloned plants of caturra and pache with application of MA from Huallaga with values ranging from 18 to 14.3%. Glomalin and catalase showed values of 12.34 mg/g and 6.99 U/g. The study has demonstrated the importance of AMF fungi consortia, due to their positive effect on the growth of coffee plants in the field, chlorophyll content and bioprotective effect of AMF consortia, resulting in the reduction of the incidence and severity of rust; they also affect the content of glomalin and catalase in the soil.

**Key words:** coffee, catalase, glomalin, mycorrhization, pathogenicity, yellow rust.



## Introducción

Sin duda la producción agrícola es una de las actividades más importantes en el Perú y el mundo, debido a los sembríos de diversos cultivos como el cacao, café, arroz, etc que son cultivos pilares para la sostenibilidad alimentaria y mucho más en estos tiempos de emergencia en el mundo; razón por la cual la producción agrícola debe continuar expandiéndose para satisfacer la demanda de alimentos por la población (Pretty *et al.*, 2010; Tilman *et al.*, 2011). Una limitante para ampliar las áreas de producción del café es la presencia de roya, considerado una enfermedad fúngica severa ya que afecta la producción de café en casi todos los países dedicados al cultivo (Silva *et al.*, 2006). El hongo de *H. vastatrix* afecta las hojas, causando lesiones cloróticas en la parte inferior ocasionando la defoliación y por ende la muerte de la planta, generando pérdidas de hasta un 30 % si no se controla la enfermedad (Rozo *et al.*, 2012).

En el Perú y otras partes del mundo se combatio esta enfermedad con aplicación de fungicidas agrícolas, contribuyendo significativamente a la contaminación de aguas, suelos y ambiente (Tubiello *et al.*, 2015; Bauer *et al.*, 2016) y por ende la reducción de la biodiversidad presente en el suelo debido a la degradación de sus hábitats (Tilman *et al.*, 2017). Al mismo tiempo se debe tener en cuenta la actividad enzimática ya que se considera como un indicador temprano de cambios en el nivel de intensidad de los procesos biológicos y el nivel de degradación del suelo, y generalmente se correlaciona con sus propiedades físicas y químicas (Wyszkowska *et al.*, 2016). De acuerdo a lo mencionado es necesario buscar alternativas que garanticen la sostenibilidad ambiental (Foley *et al.* 2011; Horton, 2017) y la seguridad alimentaria para el futuro.

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) pueden formar simbiosis con la mayoría de las especies de plantas y beneficiar directamente a los diferentes cultivares a través del aumento de tolerancia a la roya amarilla del cafeto (Jung *et al.*, 2012), tolerancia a la sequía y las condiciones adversas del suelo (Augé, 2004; Daei *et al.*, 2009). A pesar de los posibles beneficios, muchos factores pueden limitar las micorrizas, por lo tanto, su uso en los cultivares de café, redes de hifas a través de la labranza (Bowles *et al.*, 2017b), alta aplicación de fertilizantes inorgánicos y fungicidas (Mader *et al.* 2002; Wilson *et al.*, 2009), asimismo, las variedades de café podrían reducir la capacidad de las plantas para formar una

simbiosis efectiva de HMA (Pérez-Jaramillo et al. 2016; Leff *et al.*, 2017). Muchos estudios han demostrado que la inoculación de HMA aumentó en gran medida el desarrollo de plantas y la concentración de glomalina rizosférica (Xie *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2017, 2016).

En el Perú, el café es uno de los principales productos de exportación y representa casi la mitad de las exportaciones agropecuarias. El desarrollo de la propagación del café por enraizamiento de brotes puede ayudar a lograr una disponibilidad y estabilidad del producto con granos de calidad y en cantidad, libres de contaminantes, plagas, y enfermedades como la roya. Todos estos factores conducen a mejorar la seguridad alimentaria, siendo la caficultura uno de los indicadores de sustentabilidad de los pequeños caficultores posicionados en zonas rurales del Perú.

Particularmente en la Región San Martín, el café es un fuerte soporte a la economía regional, debido a que se cultivan aproximadamente 100 927,00 ha, involucrando directamente a 44 857,00 productores, con un universo de aproximadamente 224 285,00 personas dependientes de esta actividad (MINAGRI, 2014). Existen reportes que indican que los HMA contribuyen a la reducción de la roya, sin embargo, al parecer ninguna investigación hasta la fecha ha evaluado cómo los HMA influyen en la tolerancia a la roya amarilla del café en aspectos morfológicos y de producción.

En el presente estudio, se empleó un diseño factorial de 4A X 2B, caracterizado por el análisis de cuatro concentraciones de HMA y dos variedades clonales de café, realizado en 10 meses en campo; para determinar cómo las micorrizas influyen en el crecimiento y resistencia a roya en fincas de café (caturra y pache) en la región San Martín. Específicamente probamos las hipótesis de que las micorrizas arbusculares (MA) influyen positivamente: (i) en el estado de los nutrientes de plantas (nitrógeno, fósforo y contenido de clorofila), (ii) crecimiento de las plantas (altura, número de ramas, área foliar y número de flores), (iii) enzimas presentes en el suelo rizosférico (glomalina y catalasa) y (iv) resistencia al hongo *H. vastatrix* (incidencia y severidad).

**Objeto de investigación;** Determinar el efecto de los HMA en el estado de nutrientes, crecimiento, enzimas y resistencia a roya en café en la provincia de Moyobamba

**Formulación del Problema;** ¿Existe correlación positiva entre la colonización micorrízica y la incidencia al hongo *H. vastatrix* en clones de café en las variedades de caturra y pache?

**Objetivo General;** Evaluar el efecto de los HMA en el crecimiento morfológico, estado de nutrientes y clorofila; catalasa y resistencia a roya en plantas de café a los 10 meses de establecido en un suelo de de la provincia de Moyobamba.

**Objetivos Específicos:**

- Determinar el efecto de cuatro consorcios de hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento de las plantas (altura, número de ramas y hojas) en clones de café en las variedades de caturra y pache en Moyobamba.
- Determinar el efecto de cuatro consorcios de hongos micorrízicos arbusculares en el estado de nutrientes (N, P y contenido de clorofila) en clones de café en las variedades de caturra y pache en Moyobamba.
- Determinar el efecto de cuatro consorcios de hongos micorrízicos arbusculares en las enzimas presentes en el suelo rizosférico (glomalina y catalasa) en clones de café en las variedades de caturra y pache en Moyobamba.
- Determinar el efecto de cuatro consorcios de hongos micorrízicos arbusculares en la resistencia al hongo *H. vastatrix* (incidencia y severidad) en clones de café en las variedades de caturra y pache en Moyobamba.

**Campo de acción de la investigación;** El campo de acción de la presente investigación consistió en la observación y evaluación de indicadores relacionados a la micorrización, morfología, estado nutricional, enzimas y resistencia a roya en clones de café en las variedades de caturra y pache, evaluadas en la provincia de Moyobamba, región San Martín.

**Hipótesis de investigación:**

- Los consorcios de hongos micorrízicos arbusculares tienen efecto positivo en el crecimiento de las plantas (altura, número de ramas y hojas) en clones de café en las variedades de caturra y pache en Moyobamba.
- Los consorcios de hongos micorrízicos arbusculares tienen efecto positivo sobre el estado de nutrientes (N, P y contenido de clorofila) en clones de café en las variedades de caturra y pache en Moyobamba.
- Los consorcios de hongos micorrízicos arbusculares tienen efecto positivo en las enzimas presentes en el suelo rizosférico (glomalina y catalasa) en clones de café en las variedades de caturra y pache en Moyobamba.

- Los consorcios de hongos micorrízicos arbusculares tienen efecto positivo en la resistencia al hongo *H. vastatrix* (incidencia y severidad) en clones de café en las variedades de caturra y pache en Moyobamba.

**Aporte Teórico de la Investigación;** La presente investigación generará nuevos conocimientos sobre los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y su efecto sobre la morfología, estado nutricional, catalaza y resistencia a roya en clones de café en las variedades de caturra y pache, evaluadas en la provincia de Moyobamba, región San Martín.

**Novedad del Estudio de Investigación;** El presente trabajo de investigación contribuirá a fortalecer las plantaciones de café afectadas con roya en su fase inicial desde la planta hasta la prefloración y mejorar la biofertilización utilizando hongos micorrízicos arbusculares.

**Relevancia Social y Ambiental;** Los daños y pérdidas causados por la roya amarilla en fincas cafetaleras, los altos costos de los fertilizantes y la contaminación de los suelos, agua y ambiente por los mismos ha generado pérdidas en la economía de los pequeños productores específicamente de café provocando abandono familiar, abandono de sus fincas y migraciones a la capital. La aplicación de HMA mejorará y promoverá una producción de calidad con una reducción en el uso de los fertilizantes y haciendo uso de biofertilizantes amigable al medio ambiente.

# CAPÍTULO I

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1.1. Generalidades del cultivo del cafeto

#### 1.1.1. Cultivo del café en el Perú

En el Perú, se cultivan 430 000 hectáreas y San Martín representa el 23,2 % de la producción nacional (MINAGRI, 2014). El cultivo del café se da principalmente en los valles interandinos de la selva alta, con predominancia de las variedades arábicos; catimore, típica, caturra, pache y otras como Borbón; el 90 % de estas plantas crecen bajo sombra, 75 % de la producción se consigna en altitudes superior a 1 200 msnm, con una producción de media de 14 qq/ha. Siendo los mayores productores en el país los departamentos de Junín, San Martín, Cajamarca y Cusco quienes poseen el 24; 23; 17 y 11 % respectivamente de la producción (El Cafetalero, 2013; MINAGRI, 2014).

#### 1.1.2. Variedades de café cultivadas en la región San Martín.

El café predominante en el Perú es el arábico en los cultivares de Typica, Bourbon, Pache, Caturra y Catimor. (Galindo, 2011 y Barreto, 2007). A continuación, se detalla una breve descripción de cultivares más desarrolladas en la región San Martín.

**Variedad Typica;** Llega a alcanzar una altura promedio de 3,5 m sin sombra. Es un arbusto en algunas veces deriva de un tronco vertical con abundantes ramas productoras. Las ramas laterales forman ángulos entre 50 y 70 grados con el eje o tallo central. Presenta hojas lanceoladas de estructura fina y área lisa. Las nuevas hojas que se desarrollan son de color bronceado. Presenta frutos y semillas de regular tamaño. El rendimiento de esta variedad es bajo, pero con buena calidad de taza.

**Variedad Bourbon;** Sus plantas producen múltiples troncos con una potencial respuesta a la poda. Su abundancia de ramas sobrepasa a la typica formando con el tallo principal un ángulo recto. Las hojas maduras son de color verde pálido y las nuevas de color verde claro. Producen un 20 a 30 % más café que la variedad Typica, con una producción menor a otras variedades. El fruto generalmente es mediano a pequeño, con mayor rapidez en la maduración y tienden a caerse con las lluvias y los vientos, razón por la cual deben

cosecharse a tiempo. Prospera muy bien entre 1 000 y 2 000 metros de altura con una calidad de taza excelente.

**Variedad Caturra;** Proviene de una mutación de la variedad Bourbon originario del Brasil con una alta producción y buena calidad en taza, es exigente de una fertilización óptima. La planta es de porte bajo (2,5 m), tronco grueso con inserción de muchas ramas formando un ángulo cerrado con el tronco lo que lo hacen un alto productor. Sus hojas son grandes de color verde oscuro. Las ramas laterales forman un ángulo bien cerrado con el tronco. Con adaptabilidad a muchos pisos altitudinales generalmente entre los 500 y 1 700 metros con precipitaciones anuales entre 2 500 - 3 500 mm. A mayor altitud aumenta la calidad, pero disminuye la producción.

**Variedad Pache;** Cafeto de porte bajo, con mucha presencia de ramas secundarias. El color de la guía es rojo vinoso al igual que el color de las cerezas al madurar. Sus frutos maduros son resistentes a la presencia de lluvia y vientos. Crece muy bien entre 1 000 a 1 700 msnm.

**Variedad Catimor;** Es un cruce entre Timor y caturra, se considera un cafeto resistente a la roya amarilla *Hemileia vastatrix* (Fischersworing y Robkamp, 2001). Fue creada en Portugal en 1959. La maduración es temprana y la producción es muy alta, por lo que deben ser monitoreados de cerca. Son de porte bajo, tienen grandes frutos y semillas de café.

**Variedad Catuai;** Procede de un cruce artificial entre la variedad Caturra y la Mundo Nuevo (Brasil), de porte bajo, pero con alta producción debido a sus abundantes ramas que se insertan en el tallo principal. Las nuevas hojas nuevas presentan coloración verde claro. Los frutos están bien impregnados en las ramas.

## 1.2. Nutrición (N y P) y clorofila en *C. arabica*

### 1.2.1. Nitrógeno y fosforo

Se considera que la planta del café tiene altas demandas nutricionales debido a la gran cantidad de nutrientes que se pierden cuando se cosechan los frutos. Así, el estado nutricional de la propia planta se caracteriza por ser un factor que influye sustancialmente tanto en el crecimiento como en la reproducción de la planta (Quintela, Silva, Bomfim-Silva,

Silva, & Bebé, 2011; Covre *et al.*, 2016). Durante el período reproductivo, los frutos del cafeto drenan preferentemente los carbohidratos y los nutrientes minerales de la planta; sin embargo, esta fase coincide con la fase de crecimiento vegetativo más grande, que también demanda grandes cantidades de nutrientes (Partelli, Vieira, Silva y Ramalho, 2010, Covre *et al.*, 2018).

Dieciséis elementos son esenciales para el crecimiento de un arbusto de café saludable. Estos están categorizados en macronutrientes y micronutrientes. El nitrógeno, fósforo y potasio constituyen los nutrientes primarios debido a las grandes cantidades requeridas por la planta del café. Plantas que carecen de N (nitrógeno) sufren de muerte regresiva, especialmente donde hay poca sombra y agua insuficiente. Bajas presencias de P (fósforo) del suelo obstaculizarán el desarrollo de las raíces y contribuirán a la muerte regresiva. La muerte regresiva provoca la pérdida de rendimiento. Cuando son severas, las plantas pueden morir. Cada nutriente tiene un síntoma de deficiencia (Edward *et al.*, 2005). El café tiene una demanda muy alta de nutrientes y absorbe grandes cantidades del suelo. El café de alto rendimiento consume un total anual de aproximadamente 135 kg de N y 34 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Mitchell, 1988).

Dado que los hongos MA generalmente mejoran el estado de P de sus plantas hospedantes en condiciones de baja disponibilidad de P, se espera que la simbiosis MA apoye la actividad rizobiana y aumente la fijación biológica de nitrógeno (FBN). Con una alta disponibilidad de P, la simbiosis de MA generalmente no mejora aún más el contenido de P de la planta huésped (Smith y Read, 2008) y, por lo tanto, es poco probable que aumente el BNF a través de una mejor nutrición de P.

### **1.2.2. Clorofila**

La clorofila (Chl), es importante en manejo de cultivos agrícolas, ya que es un indicador confiable de tasas fotosintéticas, contenido de nitrógeno y salud de las hojas. Esto es debido a que la clorofila en hojas está asociada con la capacidad de asimilación de CO<sub>2</sub> de la planta, que está directamente relacionado con la tasa fotosintética y cuántica rendimiento debido a su asociación con la bioquímica de la hoja, como Contenido de Rubisco (Lawlor, 1995). En el café, la clorofila está estrechamente asociado con contenido de N y niveles de rendimiento, por lo tanto, se puede usar para estimar rendimientos (Reis *et al.*, 2009).

Además, el contenido de Chl es un indicador del estado del cultivo, ya que varía con factores de estrés bióticos y abióticos, como sequía, enfermedades de las plantas, infestación de plagas y desequilibrios de nutrientes (Pompelli *et al.*, 2010). Por lo tanto, predecir el contenido de Chl en el café es necesario para el manejo del cultivo de café y la estimación del rendimiento en niveles local, regional y nacional.

### **1.3. Hongo *H. vastatrix* en el cafeto.**

#### **1.3.1. Patogenicidad**

El género *Hemileia* es miembro del filo Basidiomycota, clase Pucciniomycetes, orden Pucciniales (hongos de la roya), se distingue de otros géneros de roya por la combinación única de tres características morfológicas: soros suprastomáticos en forma de ramo; urediniosporas ovoides a reniformes con un lado ventral liso y un lado dorsal convexo de delicado a toscamente equinulado; y teliosporas angulares-globosas a muy irregulares (Ritschel, 2005).

#### **Síntomas y efectos del ataque de roya**

Los síntomas y el ciclo general de la roya del café son bien conocidos y han sido descritos por varios autores (Rayner, 1961; Nutman y Roberts, 1963; Montoya y Chaves, 1974). Brevemente, aparecen pequeñas manchas de color amarillo pálido (1-3 mm de diámetro) y se expanden (hasta 20 mm de diámetro) en el lado envés de las hojas. La uredinia se forma en las manchas cloróticas donde se producen urediniosporas de color naranja amarillento en forma de polvo. Aparecen manchas amarillas cloróticas en el envés de las hojas, que se vuelve necrótico. Las urediniosporas producidas en plantas infectadas son el principal inóculo primario de las epidemias de roya del café. Las urediniosporas aterrizan, germinan y forman un apresorio en el envés de las hojas. Se forma una clavija de penetración y la cámara substomática es colonizada por el micelio intercelular y la haustoria. Los primeros síntomas de la enfermedad aparecen como manchas cloróticas. Al final del período latente, se forman uredinios y las urediniosporas de color naranja amarillento se liberan fácilmente a los alrededores, eventualmente escapando del dosel. El número de urediniosporas producidas en el uredinio se ve afectado significativamente por la resistencia del huésped, especialmente en el café conilón. Con el tiempo, se forman telios y teliosporas diploides (2n) y germinan produciendo pro-micelios (basidios) y basidiosporas

(n) en cuatro esterigmas. Hasta ahora, se desconoce el papel de las basidiosporas en el ciclo de vida de los hongos. Los intentos de infectar el café y otras plantas con basidiosporas no han tenido éxito. Las etapas picnial y aecial de los hongos aún no se encuentran en la naturaleza. Por lo tanto, la enfermedad se considera una roya autóica y macrocíclica, donde ocurren las etapas de uredia, telia y basidia en los cafetos (Zambolin, 2016).

Con respecto a la epidemiología, las urediniosporas producidas en plantas enfermas pueden propagarse a largas distancias por el viento, alcanzando 1 000 m en la atmósfera y potencialmente alcanzando plantaciones de café ubicadas a miles de millas de la fuente (Martínez *et al.*, 1975). Dentro del dosel, la lluvia juega un papel importante en la propagación del patógeno debido a las gotas de lluvia que salpican de una hoja a otra (Kushalappa y Chaves 1980 ). El rango de temperatura óptimo para la germinación de urediniosporas se estima en 21-25 °C en ausencia de luz (Nutman y Roberts. 1963; Rayner 1961; Montoya y Chaves 1974; Capucho *et al.*, 2013a).

### **1.3.2. Ciclo biológico.**

Su acción infectiva de *H. vastatrix* en el cafeto se da inicio con la vista de síntomas de la enfermedad en el envés de las hojas, y que al avanzar los días estas se van tomando pálidas incrementándose en tamaño; dando lugar a las manchas amarillas o naranja, semejante a un polvo fino amarillo, a partir de allí se inicia la esporulación del hongo (Cadena, 1982; Rivillas, Serna, Cristancho, y Gaitán, 2011). Se requiere de agua libre para el inicio de esporas por un tiempo determinado (6 horas) y favoreciéndose con temperaturas entre 21-25 °C y condiciones de obscuridad. El apresorio para formarse requiere de un periodo de 5,3-8,5 horas. Germinado el hongo, este ingresa por el envés de las laminas foliares (Rivillas *et al.*, 2011). Luego el hongo desarrolla los haustorios en las células de las hojas, poniendo en contacto con las células de la planta y con éstos extraen los nutrientes para su crecimiento. Después de los 30 días, el hongo ha colonizado, por lo tanto, está lo suficientemente maduro como para diferenciarse en estructuras llamadas soros, que son las encargadas de producir nuevas urediniosporas (Avelino, Willocquet y Savary, 2004).

La incidencia de la roya puede alcanzar hasta un 90 % en variedades susceptibles bajo condiciones climáticas favorables. La tasa de defoliación de las hojas en la cosecha depende del nivel de incidencia de la roya. En un año posterior a un año epidémico, debido a que la

producción es baja, la incidencia de la roya puede no alcanzar el 25 % incluso en condiciones climáticas favorables (Zambolim, 2016). La severidad de la roya del café parece estar fuertemente asociada con la carga de frutos (Zambolim *et al.*, 1992). En la Amazonía peruana, la producción de café en el 2013 se vio seriamente afectada por el patógeno de la roya del café (Avelino *et al.*, 2015). Vallejos-Torres *et al.*, 2020 identificaron y propagaron plantas de café que toleraron esta epidemia.

#### **1.4. Hongos micorrízicos arbusculares (HMA).**

##### **1.4.1. Generalidades de los HMA**

La simbiosis con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) afecta  $\leq 80\%$  de plantas terrestres, la mayoría de las cuales son plantas cultivadas (Wipf *et al.*, 2019). Las hifas de HMA penetran en la epidermis de la raíz para colonizar la célula cortical y forman arbusculas, compuestas de hifas fúngicas envainadas en una forma modificada de la membrana plasmática de células corticales denominada la membrana periarbuscular. Esta interacción permite a las plantas mejorar el uso de los recursos naturales del suelo y responder mejor a las limitaciones abióticas (Gianinazzi *et al.*, 2010; Lenoir *et al.*, 2016) que encuentran en su entorno, especialmente cambios climáticos (Torres *et al.*, 2018), estrés por sequía (Symanczik *et al.*, 2018), salinidad (Ruiz-Lozano *et al.*, 2012) o contaminación por metales pesados (Shi *et al.*, 2018; Torres *et al.*, 2018). Además, las plantas micorrízicas también responden mejor a las limitaciones bióticas y a menudo muestran una mayor tolerancia a patógenos - resistencia inducida por micorrizas - que ocurre en una amplia variedad de especies de plantas (Pozo y Azcon-Aguilar, 2007; Cameron *et al.*, 2013).

##### **1.4.2. Efectos de los HMA en el cultivo de café**

La longitud del micelio extraradical de los HMA se correlaciona con la longitud de las plantas de café (Del Águila *et al.*, 2018). Del mismo modo, Al-Areqi *et al.* (2014) reportó que las plantas de café inoculadas con HMA en su estado vegetativo inicial producen mayor biomasa radicular.

Estas investigaciones dan cuenta que los HMA influyen muestran efectos positivos en el crecimiento morfológico del cafeto, Siendo mayor su efecto en los consorcios que muestran diversidad de especies adaptados a la zona (Trejo *et al.*, 2011). El impacto potencial de las

especies de HMA depende siempre y cuando se realice una adecuada adaptación y selección de cepas para un buen suministro de nutrientes y de la riqueza del sustrato en el que se desarrollan las plantas. Otro factor importante radica en la aplicación de compost, este genera efectos positivos sobre el número de ramas influenciado por la diversidad de especies en el consorcio de HMA Omia 10, por la riqueza del sustrato y las características del suelo, considerando que el uso de suelo en plantas evaluadas en campo sobre un área con antecedentes de vegetación secundaria de tres años (Vallejos-Torres *et al.*, 2019). La longitud del micelio extraradical determina la presencia de los HMA en el suelo circundante a las raíces donde ocurre la simbiosis (Helgason y Fitter, 2009).

La viabilidad de utilizar consorcios de HMA se debe a la eficiente colonización de raíces (Durán *et al.*, 2018). Los HMA primero colonizan las raíces de las plantas hospedantes y luego el suelo circundante, ambos a través de sus hifas (Jansa *et al.*, 2013).

### **1.5. Glomalina presente en suelos micorrizados.**

Un papel importante de los hongos MA en los agroecosistemas agrícolas y naturales es la reducción de la erosión del suelo y la mejora de la estructura del suelo (Vlček y Pohanka, 2019), debido a la presencia de glomalina, una proteína altamente estable producida por las esporas e hifas de Glomeromycota (Gao *et al.*, 2019). Fue descrito por Wright y Upadhyaya *et al.* (1996) y sus propiedades se destacan en varias publicaciones (Borie *et al.*, 2008; Nobre *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2018); sin embargo, su estudio sigue siendo controvertido debido a la falta de especificidad en sus determinaciones (Araujo *et al.*, 2015) y la identidad aún desconocida de la proteína (Gao *et al.*, 2019). Por esta razón, la glomalina se mide como proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (GRSP). La glomalina es una proteína secretada por las hifas y esporas de hongos micorrízicos arbusculares (AM) y que se cuantifica del suelo como proteína del suelo relacionada con la glomalina (Wright y Upadhyaya, 1996).

### **1.6. Estrés en los vegetales**

El estrés abiótico es generado por rangos inapropiados de aspectos físicos del ambiente, como temperatura, niveles de CO<sub>2</sub>, radiación solar, etc., mientras que el estrés biótico es causado por la presencia de patógenos, parásitos, depredadores y otros organismos competidores del espacio y los nutrientes. La capacidad de un organismo a sobrevivir y recuperarse de

condiciones desfavorables, dependerá de sus mecanismos adaptados a la zona (Oliveros-Bastidas *et al.*, 2009).

El estrés abiótico se basa en aspectos ambientales que cambian los procesos fisiológicos y metabólicos de las plantas (Taiz y Zeiger, 2010). Este aspecto es considerado como la causa central de la pérdida de más de 50 % de los principales cultivos de interés agrícola en el mundo (Boyer, 1982; Bray *et al.*, 2000), así mismo, de la reducción del crecimiento en plantas (Sah *et al.*, 2016) que afecta más de 95 % de la superficie agrícola (Cramer *et al.*, 2011). Esta situación se empeora con el cambio climático, a su vez modifica las condiciones climáticas del ambiente como la temperatura y disturbios en los patrones de precipitación pluvial, entre otros (IPCC, 2007). Para el cultivo del café Rezende *et al.* (2010), plantean que el tamaño de los frutos está fuertemente influenciado por las condiciones hídricas de la planta, puesto que en condiciones adecuadas de humedad ocurre la mayor expansión de los frutos, que se traduce en un mayor tamaño. Según estudios de Rena y Maestri (2000), el agua es responsable de la expansión del endocarpio a través de la presión de turgencia ejercida antes de la lignificación, influyendo en el tamaño de la semilla. Por otra parte, Camargo (1985), plantea que la ocurrencia de estrés hídrico en la planta durante la fase de fructificación-desarrollo del fruto, atrasa su crecimiento y aumenta el porcentaje de granos vanos.

### **1.7. Enzimas antioxidantes**

Las enzimas antioxidantes son esenciales para las células aeróbicas, puesto que mantienen en niveles aceptables las concentraciones de especies químicas conocidas como radicales libres. El sistema de defensa antioxidante de las células vivas, constituye un mecanismo adaptativo de gran relevancia, destacándose las actividades enzimáticas de la superóxido dismutasa (SOD), glutatión peroxidasa (GPx) y catalasa (CAT) (Delgado-Roche y Martínez-Sánchez, 2010 y Fernández *et al.*, 2010).

**La superóxido dismutasa (SOD)**, se encarga de catalizar la dismutación del radical superóxido ( $O_2^-$ ), formando oxígeno y peróxido de hidrógeno (Allen, 1995 y citado por Alvarado, 2002). Posteriormente el peróxido de hidrógeno puede ser destruido por la acción del ascorbato peroxidasa y catalasa. El SOD se encuentra presente en todos los organismos aeróbicos (Halliwell y Gutteridge, 1989) y en todos los componentes subcelulares (Bannister *et al.* 1987).

**La peroxidasa (POD)**, tiene como función oxidar el peróxido de hidrogeno y convertirlo en agua. La actividad de la peroxidasa es estimulada por las concentraciones del ozono ambiental (Lyons *et al.*, 1999). Las peroxidases vegetales son enzimas monoméricas que intervienen en una amplia gama de procesos fisiológicos, tales como: la lignificación, la suberización, el metabolismo de las auxinas, el ensamblado de las proteínas de la pared celular, la tolerancia a sales, el estrés hídrico (Ajithkumar y Panneerselvam, 2014) y la defensa contra el ataque de patógenos (Van Loon *et al.*, 2006). Aparecen en los tejidos vegetales después de la infección por patógenos, y su expresión en plantas superiores puede ser inducida por bacterias (Legaz *et al.*, 2011), hongos (Machado-Assefh *et al.*, 2013) y virus (Quistián y Valadez, 2011).

**El glutatión reductasa (GR)**, es una flavoenzima dependiente del nicotinamín adenín dinucleótido fosfato reducido (NADPH) que cataliza la reducción del glutatión oxidado (GSSG) a glutatión reducido (GSH) el cual será utilizado por el glutatión peroxidasa (GPx) para la reducción del peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y de lipoperóxidos (L-OOH), los cuales son elementos tóxicos. Es decir, específicamente tiene una función de pivoteo en el estrés oxidativo (Cisneros, 1995).

**La catalasa (CAT)**, se encarga de descomponer el peróxido de hidrogeno formado en la celula (Tolbert, 1981), en agua y el oxígeno. La catalasa no utiliza co-substratos y suministra a la celula un mecanismo muy eficiente para eliminar  $H_2O_2$ . La catalasa considerada como enzima tiene el potencial de dismutar  $H_2O_2$  en  $O_2 + H_2O$ , muy importante para la desintoxicación de las ROS durante condiciones de estrés (Gill & Tuteja, 2010). Al igual que las otras enzimas de eliminación de ROS, la catalasa está regulada a nivel transcripcional tras la exposición a altas concentraciones salinas (Nagamiya *et al.*, 2007).

La catalasa (CAT), es una importante enzima antioxidante celular que defiende contra el estrés oxidativo y cataliza la descomposición del peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno. La enzima está ampliamente presente en la naturaleza, lo que explica sus diversas actividades en el suelo (Achuba y Peretiemo-Clarke, 2008). La actividad catalasa junto con la actividad deshidrogenasa se usa para dar información sobre las actividades microbianas en el suelo.

La catalasa está ampliamente asociada con los tejidos de animales, plantas superiores y microorganismos aeróbicos. Las actividades de la catalasa y varias otras enzimas en los suelos se han correlacionado con variables del suelo como tamaño de partícula, contenido de carbono, contenido de nitrógeno, número de microorganismos y fertilidad (Burns, 1978). La actividad de la catalasa puede estar relacionada con la actividad metabólica de organismos aeróbicos y se ha utilizado como indicador de la fertilidad del suelo (Gianfreda y Bollag, 1996; Shiyin *et al.*, 2004; Trasar-Cepeda *et al.*, 2007). La actividad de la catalasa es muy estable en el suelo y muestra una correlación significativa con el contenido de carbono orgánico que disminuye con la profundidad del suelo (Alef y Nannipieri, 1995). García-Gil *et al.* (2000) indicó que la actividad catalasa se incrementó en suelos tratados con fertilizante orgánico debido a la estimulación de la biosíntesis de enzimas mediante la adición de residuos orgánicos. Así mismo, las actividades de catalasa en raíces de frijol colonizadas por *G. clarum* fueron 79, 65 y 150 % más altas que en los controles no micorrízicos, a 4, 6 y 10 semanas después de la siembra respectivamente (Lambais *et al.* 2003)

### **1.8. Microbios productores de fitohormonas.**

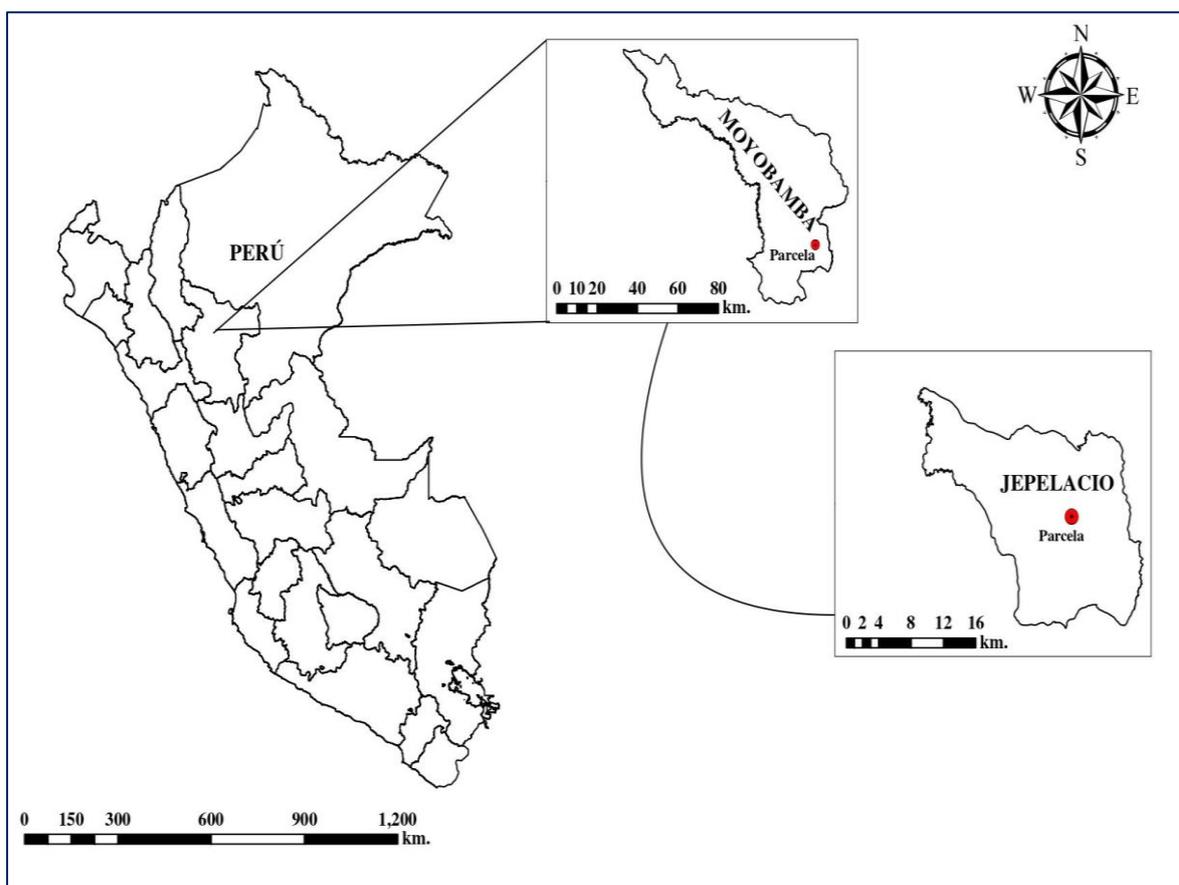
Los suelos son fuentes de diversos organismos, incluidos hongos, bacterias y plantas (Mendes *et al.*, 2013). Las raíces de las plantas están fuertemente colonizadas con microorganismos (en comparación con el suelo y otros hábitats) debido al rico componente de nutrientes de los exudados de las raíces (Hashem *et al.*, 2016). A su vez, los microbios sintetizan compuestos biológicamente activos, que incluyen fitohormonas (auxinas, citoquininas, giberelinas y ABA), compuestos antifúngicos, enzimas y solutos compatibles. Estos metabolitos microbianos juegan un papel vital en el crecimiento, la nutrición y el crecimiento de las plantas (Egamberdieva *et al.*, 2017a). Pueden estimular el crecimiento de las plantas, proporcionar resistencia a diversos factores de estrés abióticos y bióticos, mejorar la adquisición de nutrientes y proteger a las plantas de varios patógenos transmitidos por el suelo (Cho *et al.*, 2015).

## CAPÍTULO II

### MATERIAL Y MÉTODOS

#### 2.1. Localización del área de estudio.

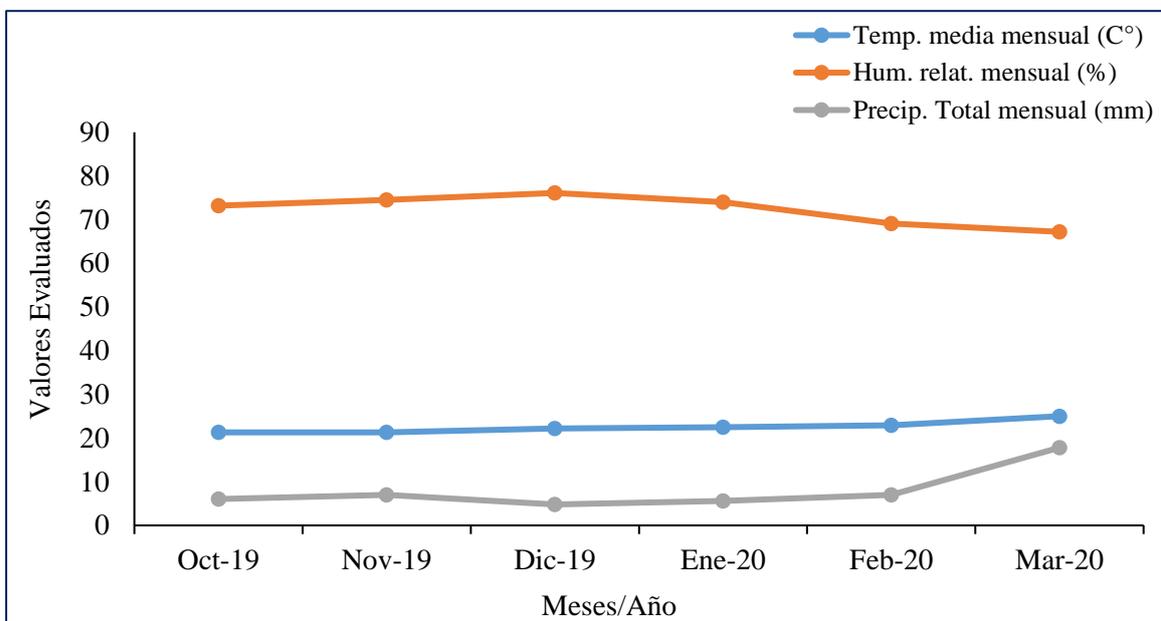
El presente estudio se llevó a cabo en la parcela experimental “Campo Verde” del señor Segundo Aladino Tuesta Valles, localizada en la localidad de Barranquita, distrito de Jepelacio, provincia de Moyobamba y región de San Martín con una altitud de 1 050 msnm; cuyas coordenadas son: 18M 290514 y UTM 9316814. De donde se colectaron las muestras de suelo consistente en suelo rizosférico en plantas de café. Asimismo, la colonización micorrízica y longitud de micelio se identificaron en el laboratorio de Instituto de investigaciones de la Amazonia Peruana - IIAP y Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales – LCTV de la Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, región de San Martín, Perú.



**Figura 1.** Ubicación Geográfica del área de estudio

## 2.2. Condiciones climáticas durante el estudio.

Se evaluaron las condiciones climáticas de la parcela de investigación desde octubre de 2019 a marzo de 2020; con temperaturas que fluctuaban entre 21,3 a 25 °C, una humedad relativa de 67,2 a 76,1 % y una precipitación de 4,8 a 88,1 %. (SENAMHI, 2020).



**Figura 2.** Condiciones climáticas evaluados durante el desarrollo del estudio en campo.

**Tabla 1**

*Valores de las condiciones climáticas evaluadas*

Meses	Temp. media mensual (C°)	Hum. relat. mensual (%)	Precip. total mensual (mm)
Oct-19	21,3	73,2	6,01
Nov-19	21,3	74,5	6,97
Dic-19	22,2	76,1	4,8
Ene-20	22,5	74	5,63
Feb-20	22,9	69,1	6,96
Mar-20	25	67,2	17,8

### **Sombra temporal o permanente y su respectivo distanciamiento.**

Se ha instalado una parcela sin cobertura boscosa inicial, sin embargo, se ha permitido que algunos árboles rebrotem cuya finalidad brinde sombra raleada. Dichos árboles fueron

pashaco, cacao y otros arbustos; ya que se conoce que los cafetales de altura, con policultivo o árboles de sombra, albergan mayor diversidad de HMA. Razon por la cual se conservó los rebrotes de algunos tocones en una baja presencia de sombra de aproximadamente un 30 %

### 2.3. Características del área antes de instalar la parcela de investigación

La parcela en estudio se estableció en una zona semiplano con pendiente de 5%, el área estuvo conformado por un bosque secundario con árboles agroforestales como pashaco (*Apuleia molaris*), cacao (*Theobroma cacao*), naranja (*Citrus sinensis*) la cual fue limpiada y diseñada la instalación de la parcela en un área total de 1 085.75 m<sup>2</sup> (50,5 m x 21,5 m), y un área neta de 216 m<sup>2</sup>. Las plantas de café fueron sembradas a un distanciamiento de 1,5 m x 1,5 m con una población de 384 plantas y 96 plantas evaluables.

### 2.4. Características del suelo de la parcela de investigación.

Se realizó ocho análisis de caracterización de suelos una por cada subparcela después de culminado el estudio, colectado a una profundidad de 20 cm teniendo en total nueve muestras compuestas. Para la colecta se usó una pala haciendo un hueco en forma de “V”, posteriormente se colectó 1 kg de suelo a una bolsa plástica limpia cerrada y marcado con el nombre del terreno muestreado cuyos resultados se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 2**

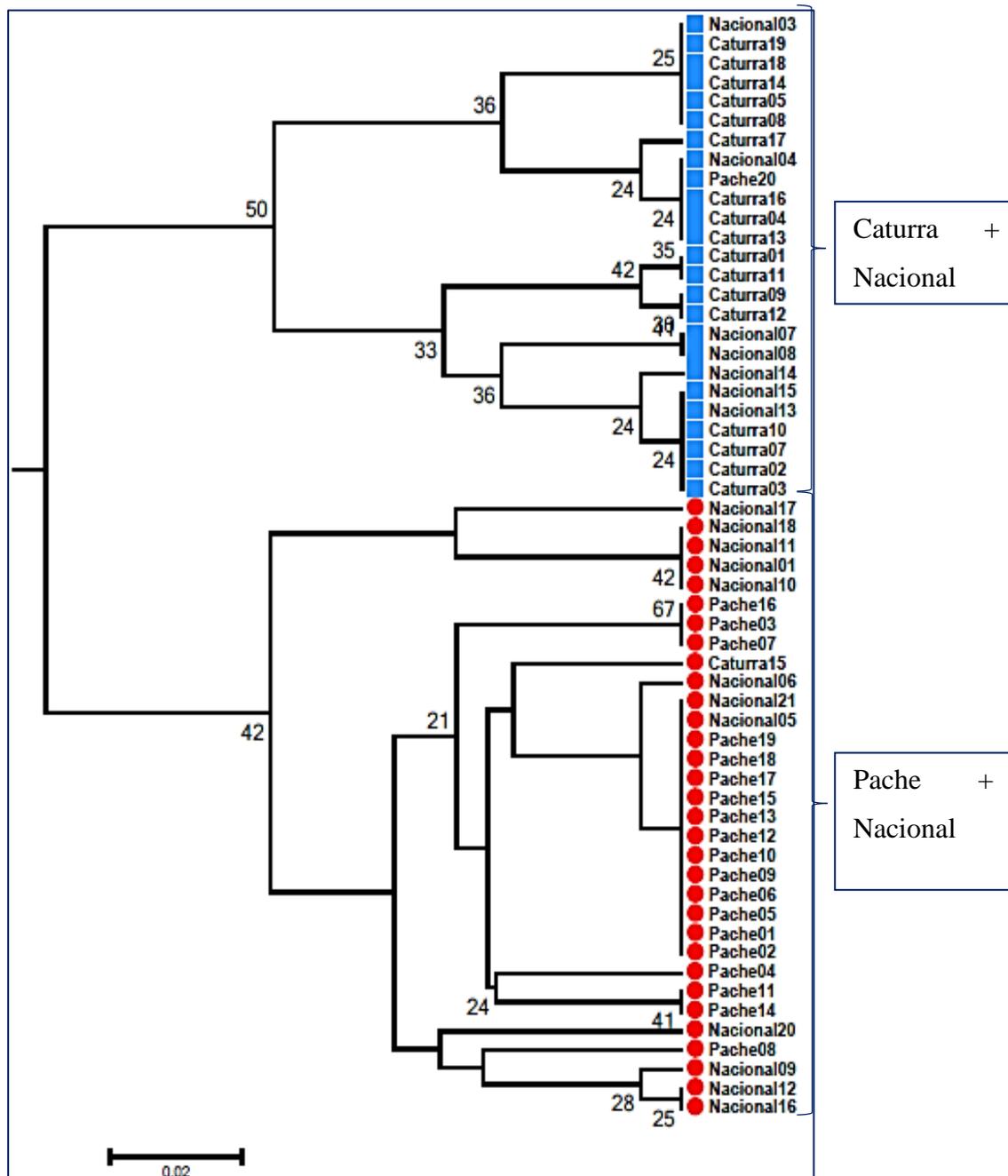
*Característica físico-químico de suelos en parcela de investigación*

<b>Fuente</b>	<b>Arena (%)</b>	<b>Limo (%)</b>	<b>Arcilla (%)</b>	<b>CE (dS/m)</b>	<b>pH</b>	<b>MO (%)</b>	<b>N (%)</b>	<b>P (ppm)</b>	<b>K (ppm)</b>
Caturra-Sin HMA	40,96	18	41,04	0,38	7,02	6,65	0,30	14,85	308
Pache-Sin HMA	28,24	21	50,76	0,45	6,6	5,71	0,26	16,86	396
Caturra- C. Moyob.	22,24	18	59,76	0,27	6,42	4,86	0,22	11,64	513
Pache- C. Moyob.	28,24	21	50,76	0,28	6,43	5,4	0,24	13,72	272
Caturra- C. Dorad.	34,24	18	47,76	0,36	7,16	5,39	0,24	24,71	320
Pache- C. Dorad.	28,24	24	47,76	0,17	6,63	3,32	0,15	7,82	381
Caturra- C. Huall.	28,24	24	47,76	0,12	6,88	4,38	0,2	13,55	409
Pache- C. Huall.	37,24	21	47,76	0,34	7,49	4,49	0,2	13,37	364

Fuente: ICT, 2020

**2.5. Análisis molecular de plantas matrices de café seleccionadas en campo.**

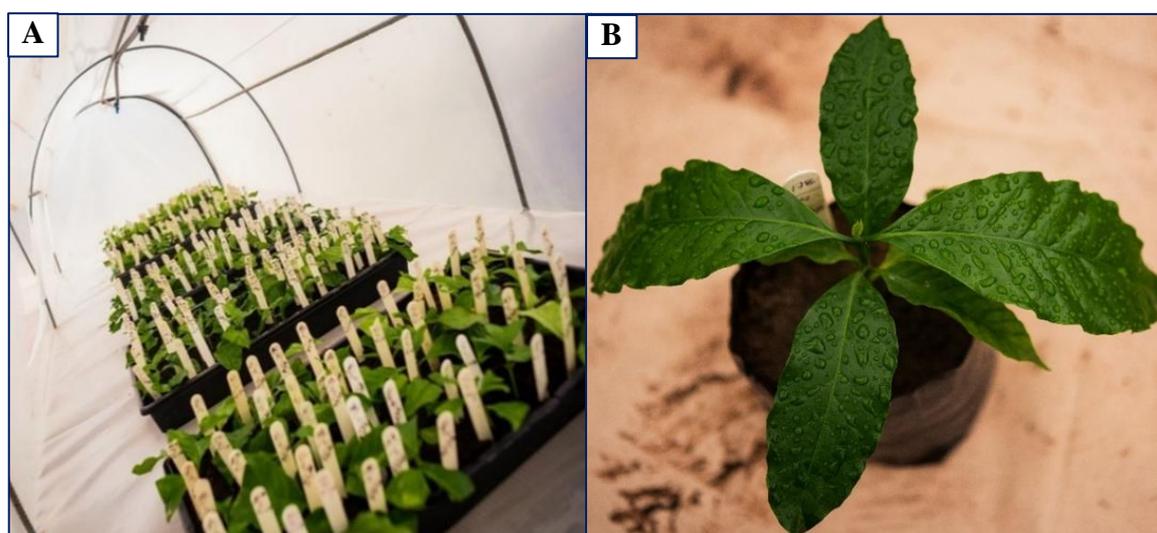
Este estudio de caracterización genética se realizó anteriormente con la finalidad de determinar con precisión las plantas selectas de café con grado de severidad a roya de 1 a 5 (Hiroshi *et al.*, 2009) en las variedades de caturra y pache. La variación genética dentro cada agrupación, mostraron diferenciación genética altamente significativo entre el Dendograma.



**Figura 3.** Dendograma UPGMA estimada por la distancia de provesti para individuos de *C. arabica*, nótese dos grupos: Caturra + Nacional (celeste) y Pache + Nacional (rojo).

## 2.6. Producción de plántulas de café por propagación vegetativa.

El material vegetal tomada para este estudio se basó en la colecta de brotes a partir de jardines clonales con la que cuenta el IIAP, estos fueron depositados en microtuneles de enraizamiento por 50 días, después de este periodo los brotes enraizados fueron replicados en bolsas almacigueras con sustrato de suelo mezclado con arena. En esta etapa se aplicaron 2 000 esporas de hongos micorrízicos arbusculares. Cada brote replicado fue llevado a un vivero de aclimatación para su endurecimiento y conversión en plantones (Vallejos-Torres *et al.*, 2020).



**Figura 4.** Producción de clones de café. Nota: A. Establecimiento de material vegetativo en microtúneles y B. Plantón de café clonado y micorrizado.

## 2.7. Propagación e inoculación con HMA a plantones clonados de café.

Se tomó consorcios micorrízicos que conserva el IIAP en bancos micorrízicos que fueron multiplicados en plantas trampas de arroz (*Oriza sativa*) y maíz (*Zea mays*). Las esporas de HMA se colectaron en suelos, siguiendo el protocolo de Gerdemann y Nicolson (1963) y cuantificadas e identificadas a nivel de morfoespecie con base a las descripciones del INVAM, (2017). La inoculación con HMA al cafeto se baso en la aplicación de 2 000 esporas del correspondiente consorcio de micorrizas a cada clon, luego estas plantas pasaron a completar su rustificación en vivero. Se verificó que el HMA tenga contacto con el sistema radicular de las plantas clonadas de cafeto (Vallejos-Torres *et al.*, 2019). En el estudio se utilizaron 3 consorcios de HMA colectados de plantas de café tolerantes a la roya amarilla en las provincias de Moyobamba, El Dorado y Huallaga.

Se realizó el aislamiento e identificación de esporas viables de hongos micorrízicos arbusculares (HMA), mediante el análisis bioinformático de secuencias de ADN. El consorcio de la provincia del Huallaga presentó un mayor número de esporas viables con 310 esporas, seguido de Moyobamba con 239 y El Dorado 118 esporas viables. Finalmente se realizaron la identificación morfológica de las especies y géneros de los HMA presentes en 03 consorcios (Tabla 2).

**Tabla 3**

*Procedencia de los consorcios y especies de HMA en la rizósfera de C. arabica*

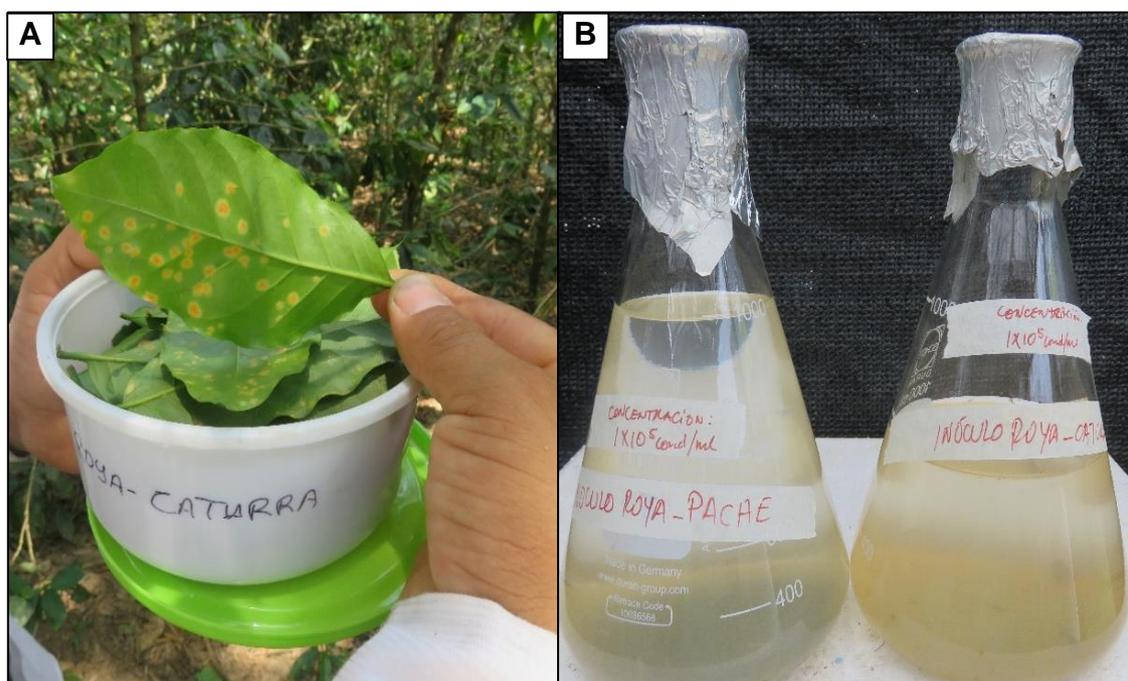
Procedencia de los HMA	Especies identificadas de HMA
HMA autóctono (material de la zona)	<i>Acaulospora</i> sp1, <i>Funneliformis geosporum</i> , <i>Glomus macrocarpum</i> , <i>Rhizophagus</i> sp1.
Consorcio Moyobamba	<i>Acaulospora mellea</i> , <i>Acaulospora</i> sp1., <i>Glomus geosporum</i> , <i>Glomus</i> sp 1. <i>sinuosum</i> y <i>Glomus</i> sp 2.
Consorcio El Dorado	<i>Acaulospora rugosa</i> , <i>Acaulospora spinosissima</i> , <i>Acaulospora lacunosa</i> , <i>Glomus sinuosum</i> y <i>Ambispora appendicula</i> .
Consorcio El Huallaga	<i>Acaulospora mellea</i> , <i>Acaulospora</i> sp 1, <i>Acaulospora</i> sp 2., <i>Glomus macrocarpum</i> y <i>Glomus</i> sp2.



**Figura 5.** Proceso de propagación e inoculación micorrízica. Nota: A. Propagación masiva de micorrizas arbusculares y B. Inoculación micorrízica de material clonado del café.

## 2.8. Obtención y preparación de *H. vastatrix*.

Se colectaron hojas infestadas con roya en plantaciones de café en las variedades de caturra y pache, ubicadas en la Provincia de Lamas, Departamento de San Martín; a una altitud de 874 msnm. Las hojas fueron seleccionadas por la presencia de pústulas del hongo de color amarillo - anaranjado y luego almacenadas y transportadas en recipientes plásticos secos al laboratorio de fitopatología del Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana. Se realizó la extracción de las urediniosporas, como principal inóculo primario de la roya del café, quienes aterrizan, germinan por el micelio intercelular y la haustoria, en la cual aparecen los síntomas de la enfermedad como manchas cloróticas y luego en amarillo-naranja (Zambolim et al, 2016). Esto se obtuvo con la ayuda de una micropipeta donde se extrajo la solución inoculante y se llenó por capilaridad la cámara Neubauer, donde se realizó el conteo de las urediniosporas haciendo uso del microscopio hasta determinar la concentración de por ml. Una vez registrada la concentración en la solución madre, se realizó la formulación del inoculante. Cabe indicar que para los dos inoculantes de roya (pache y caturra) se formuló a concentración de  $1 \times 10^5$  urediniosporas/ml., esta suspensión se asperjó en el envés de las hojas de café mediante un aspersor manual a razón de 1ml/planta.



**Figura 6.** Proceso de preparación de roya. Nota: A. Colecta de muestras foliares con roya y B. Preparación de urediniosporas de *H. vastatrix*.

## 2.9. Infección con *H vastatrix* a plántones propagadas de café.

A los 120 días después que los plántones de café fueran inoculados con los hongos micorrízicos y después de comprobar una colonización del 20%, se procedió a inocular con roya, mediante un atomizador para obtener un rociado uniforme en los plántones de las unidades experimentales. Esta infestación se realizó con mucho criterio evitando la infestación a las demás parcelas o unidades; así mismo, se contó con plántones adicionales para generar un área de amortiguamiento entre parcelas.



**Figura 7.** Infestación de roya a plántones de café. Nota: A. Producción clonal de caturra y pache y Infestación con roya a plántones de café.

## 2.10. Establecimiento de plántones de café micorrizadas en campo.

Antes de iniciado con la instalación de la parcela de café se diseñó el croquis experimental del ensayo, consistente en un diseño completamente al azar con arreglo factorial con 8 tratamientos, 16 unidades experimentales por tratamiento y 3 bloques. El área fue alineada mediante el método de triángulo rectángulo 3,4 y 5 metros donde se diseñó 3 bloques con distanciamiento de 2 metros entre ellos y entre plantas se manejó el distanciamiento de 1,5 metros entre plantas x 1,5 metros entre calle, recomendado por Nigussie *et al.* (2017).

Una vez diseñado las parcelas de investigación se procedió a realizar la apertura de los hoyos cavando 20 cm de largo, 20 cm de ancho y 30 cm de profundidad. Con la finalidad que la planta tenga buena aeración y facilite el crecimiento de las raíces, inmediatamente se procedió a plantar los plántones en campo definitivo respetando los tratamientos en estudio de acuerdo a los diseños establecidos de cada trabajo de investigación.



**Figura 8.** Establecimiento de parcela experimental. Nota: A. Traslado de plántones clonados de café micorrizadas a campo y B. Siembra de plántones clonados.

## 2.11. Evaluaciones realizadas.

### 2.11.1. Estimación de la longitud de micelio extraradical.

El cálculo de la longitud de micelio extraradical se realizó a partir de la colecta de 10 g de suelo, en tres sectores diferentes alrededor de la planta del acfeto, distanciado a 30 cm del tallo principal. Teniéndose en cuenta a 15 cm de profundidad de suelo. Estas muestras se recogieron en bolsas Ziploc y trasladados al laboratorio, que a su vez fueron secadas a temperatura ambiente. Se realizó a partir de ello la tinción del MER haciendo uso la metodología de intersección de cuadrantes (Carballar, 2009) con el siguiente procedimiento:

1 g de suelo seco fue pesado en una balanza analítica, este se depositó en un vaso precipitado con un volumen de 250 ml, se depositó 5 ml de vinagre blanco para dispersar los agregados del suelo y acidificar los segmentos de micelios. Luego se agregó 20 ml de solución de tinta “Artesco” al 15 % disuelto en ácido acético y se dejó reposar por 30 minutos a temperatura ambiente. Después de los 30 minutos, se vació agua destilada al vaso precipitado hasta completar los 100 ml. Seguidamente el suelo se depositó en baño María a 90 °C por un tiempo de 90 minutos, moviéndose constantemente cada 30 minutos. Cumplido los 90 minutos las muestras de suelo tratadas fueron pasadas por un tamiz de malla de 38  $\mu\text{m}$ . El material restante en el tamiz se depositó en el mismo vaso precipitado y se agregó 30 ml de agua destilada. Continuando con las muestras, estas se depositaron por segunda oportunidad en baño María (90 °C) por un minuto y se agregaron 70 ml de agar-agar al 0,64 % en concentración peso/volumen, a su vez se dejó reposar por 5 minutos, hasta obtener una concentración final de 0,45 % de la solución. Finalizado los cinco minutos, las muestras se movieron con una jeringa de 20 ml con el fin de mezclarlo completamente.

Concluyendo la cuantificación se tomaron 10 ml de la solución y se depositó a una placa Petri, conteniendo en su base externa una rejilla de papel cuadriculada de 0,5 cm<sup>2</sup>. Para la cuantificación de la longitud de micelio extraradical, las muestras dispuestas en las placas Petri fueron observadas en un estéreo microscopio a 4,5 X y con ayuda de un contómetro se cuantificó las intersecciones Hifa-Línea. El conteo de micelio se realizó en toda el área de la placa Petri haciendo un desplazamiento vertical y en recorrido ordenado, cuidando que todas las intersecciones de las líneas tanto verticales como horizontales sean contabilizadas. La cantidad numérica obtenida se trasformó a longitud de micelio por unidad de peso de suelo utilizando la ecuación 1, fórmula propuesta por Newman, (1966).

$$R = \frac{\pi AN}{2H} \dots\dots\dots (1)$$

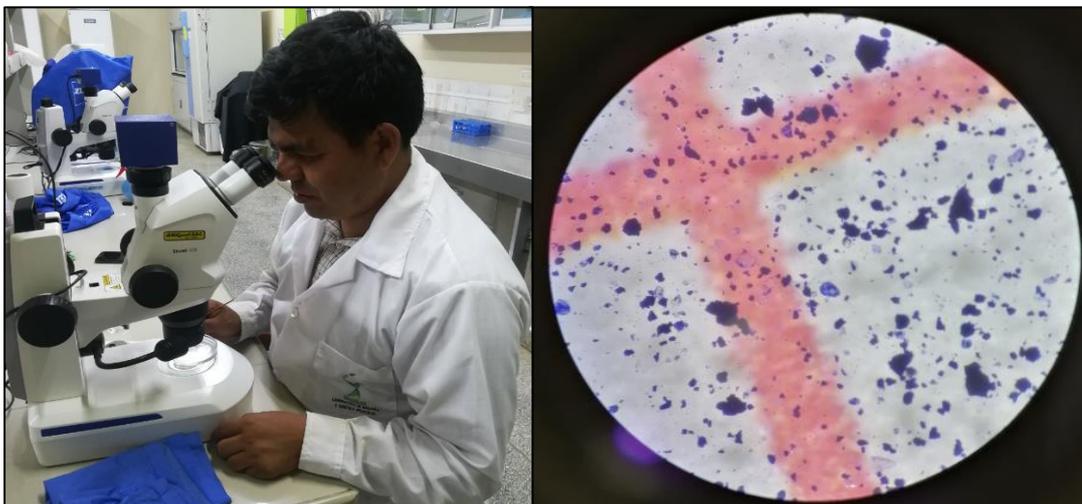
Donde:

R = Longitud de micelio por unidad de peso de suelo

A = Área de la placa

N = Número de intersecciones

H = Longitud total de las líneas de la placa (cm)



**Figura 9.** Evaluación de micelio extraradical en plantones clonados de caturra y pache

### 2.11.2. Evaluación de la colonización micorrízica.

El proceso de tinción de raíces se realizó utilizando raíces (secundarias y terciarias) de dos variedades clonadas de café (caturra y pache), siguiendo la metodología de tinción propuesta por (Phillips y Hayman, 1970) con modificaciones. Cada muestra se conformó de 20

segmentos de raíces (10 raíces por cada campo) y de 1,5 cm de longitud, las cuales se montaron en láminas porta objeto, quedando listas para su evaluación en el microscopio.

El proceso de evaluación de la colonización micorrízica se realizó mediante la metodología propuesta por Brundrett *et al.* (1996), que consistió en ubicar en la mira del microscopio un segmento de la raíz y dividirlo en 3 zonas de observación (superior, intermedio e inferior). Cada zona se observó minuciosamente y se marcó en un cuadernillo la presencia y ausencia de estructuras micorrízicas (vesículas, arbuscúlos e hifas), proceso que se hizo con los 20 segmentos montados en la lámina portaobjeto.

Para el cálculo de la colonización micorriza de HMA en las raíces de las plantas trampa se llevó a cabo a través de la siguiente fórmula matemática.

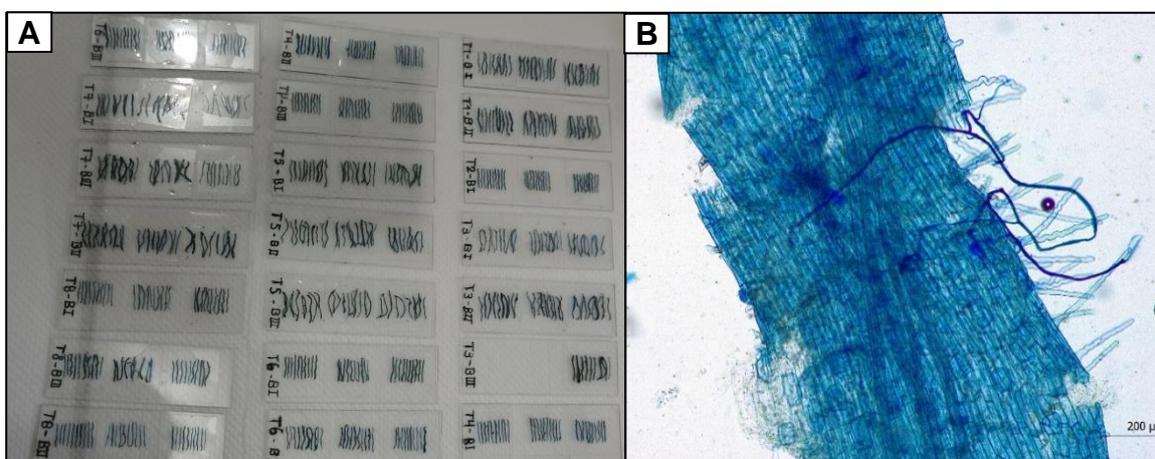
$$\% \text{ CM} = (n/N) \times 100$$

Donde:

% CM= Porcentaje de colonización micorrízica.

N= Número total de segmentos evaluados.

n= número total de zonas con presencia de estructuras micorrízicas.



**Figura 10.** Colonización micorrízica en raíces teñidas de café. Nota: A. Vista de las raíces teñidas y montadas en láminas porta objeto y B. Presencia de estructuras micorrízica (micelio).

## 2.12. Determinación del estado nutricional de *Coffea arabica*.

### 2.12.1. Determinación del nitrógeno (N) y fósforo (P).

Se realizó a partir de muestras de hojas iniciales en su madurez colectadas a media mañana a la mitad de las ramas en cuatro puntos cardinales acuerdo a los tratamientos en la parcela de investigación. Se colectaron 4 a 6 hojas por cada repetición, siendo estas hojas enteras y

sanas (ICT, 2020). Se colectaron en sobres de papel bien etiquetadas y rotuladas y llevadas al laboratorio donde fue secado en una estufa durante 3 días a 95 °C y su posterior determinación del nitrógeno por la prueba de Kjeldhal y el fósforo mediante la prueba de Digestión HNO<sub>3</sub>:HClO<sub>4</sub> (4:1) /Espectr.UV-Vis ( $\lambda=420$  nm). El nitrógeno es un indicador útil de nutrición vegetal (Royer et al. 2013), al igual que el fósforo (Berdeni et al. 2018).

### 2.13. Determinación del crecimiento y floración de *Coffea arabica*.

Se determinó la altura de planta medida en centímetros desde el nivel del suelo hasta la yema apical del ortotrópico (Castanheira, 2019), para ello se utilizó una regla milimetrada. La evaluación del área foliar (AF) consistió en colocar todas las hojas de las plantas de café en una superficie oscura y fueron fotografiadas claramente para determinar el área foliar (Del Águila *et al.*, 2018). En el número de ramas se consideraron aquellas completamente formadas. El café es considerado como una planta de día corto, esto indica que de 8 a 11 horas de luz diurna induce la iniciación de la flor, en razón a ello se evaluó la floración a las 3 pm. La floración se registró a los 300 días de establecido la parcela como la fecha en la que el 50 % de los botones florales tenía más de una flor abierto. Estas evaluaciones sirvieron para ver el crecimiento y el incremento de altura de los diferentes tratamientos en estudio en respuesta al efecto por parte de los HMA-N en las plantas de café.



**Figura 11.** Crecimiento y floración en plantas clonadas y micorrizadas de café.  
Nota: A. Evaluación de la altura, B. Número de ramas, C. Área foliar y D. Número de flores.

## **2.14. Extracción y cuantificación de la glomalina y catalasa en suelos micorrizados**

Las muestras se tomaron antes del riego y se pesó un gramo de suelo tamizado a 2 mm. Se debe conocer el contenido de humedad para hacer las correcciones de peso seco del suelo. Según Sieverding (2008), las muestras pueden guardarse en nevera a 4 °C, antes de su procesamiento. Este análisis fue realizado en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

### **2.14.1. Glomalina total (GT)**

Análisis que se realizó en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) y consiste en usar tubos de vidrio de aproximadamente 30 ml, en los cuales se agregó 1 g de suelo y 8 ml de citrato de sodio 50 Mm, pH 8,0, se agita y se lleva a autoclave a 121 °C y 15 lb de presión/pulg<sup>2</sup> durante una hora. Una vez fríos, el sobrenadante se almacena a 4 °C. El suelo que queda en el fondo de los tubos de la centrifuga se emplea nuevamente para repetir todo el proceso de extracción hasta que el sobrenadante alcance un color dorado, café o rojizo casi transparente en un promedio de 6 a 7 extracciones luego de cuantificar un volumen del sobrenadante una fracción se emplea para su lectura y se guarda nuevamente a 4 °C. Se usa el método de Bradford (1976) para proteínas, sugerido por Wright y Upadhyay (1996) y adaptado por Castillo, Rubio y Borio (2009), referenciado por USDA y del INVAM.

Para cuantificar la glomalina debe prepararse una curva estándar con suero albumina bovino fracción V (BSA) como patrón, en PBS a pH 7,4 reactivo Bradford como colorante. Se prepara una solución madre de BSA, a una concentración de 2,5 mg BSA/ml de PBS. Para construir la curva estándar de calificación se toma exactamente 1 ml de la solución madre y se afora a 100 ml con agua destilada, con esos se obtiene una concentración de 25 ug/ml y se procede de acuerdo a la calibración usando BSA como patrón. Las lecturas se realizan en espectrofotometría a 590 o 595 nm. Para evitar errores en la lectura debe hacerse antes de 5 minutos después de agregar el reactivo de Bradford.

### **2.14.2. Determinación de la Catalasa**

Se tomaron muestras frescas de suelo rizosférico extraída cuidadosamente de alrededor de las plantas de café y enviadas a la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Análisis realizado en la UNALM mediante el método de Johnson y Temple (1964). Esta reacción enzimática se basa en la adición de una determinada cantidad de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al suelo y

en la incubación de la mezcla, durante un período de tiempo determinado en el que actúa la enzima, provocando la descomposición del  $\text{H}_2\text{O}_2$  en  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{O}_2$  según la reacción:  $2 \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ .

## 2.15. Determinación de la resistencia a *H. vastatrix* en *Coffea arabica*.

### 2.15.1. Incidencia a roya en plántulas de café.

La incidencia se determinó por el porcentaje de hojas sintomáticas (Zambolim, 2016). Para la determinación del porcentaje de incidencia de roya en plantas de café en campo se muestrearon 12 plantas por tratamiento, evaluándose en cada una de ellas el total de hojas afectadas por la enfermedad de la roya amarilla.

Se aplicó la siguiente fórmula (Duicela, 2015):

$$I (\%) = \frac{NHR}{NHT} * 100$$

Dónde:

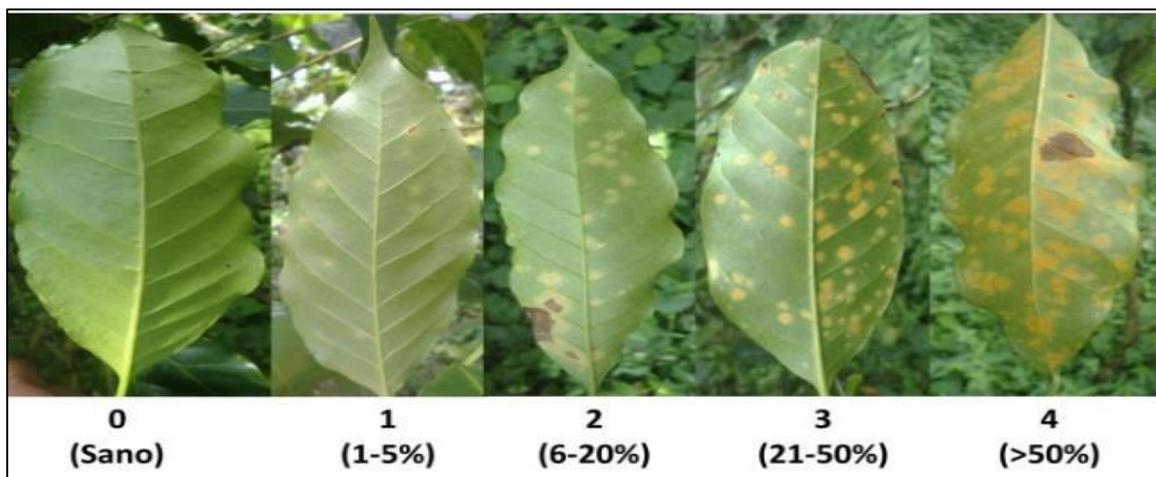
I%	=	Porcentaje de incidencia
NHR	=	Número de hojas con roya evaluada
NHT	=	Número de hojas totales evaluada

### 2.15.2. Severidad a roya en plántulas de café.

La severidad se estimó por el método de Kushalappa y Chávez (1980), el cual estima la proporción de área foliar afectada. La severidad se midió en porcentaje. Se muestrearon 12 plantas por tratamiento, evaluándose en cada una de ellas el grado de la enfermedad, según el porcentaje de daño causado en la hoja.

Se aplicó la siguiente fórmula.

$$Severidad(\%) = \frac{(N0 * 0) + (N1 * 1) + (N2 * 2) + (N3 * 3) + (N4 * 4)}{N * 4} * 100$$



**Figura 12.** Escala de severidad para *Hemileia vastatrix* (SAGARPA, 2013)

**Tabla 4**

*Grado o calificación para la severidad a roya en plantas de café*

Grado o Calificación	Descripción
0	Sano o sin síntomas visibles.
1	Síntomas visibles llegando de 1 a 5 % del área total sana.
2	Las manchas empiezan a unirse, llegando a ocupar del 6 al 20 % del área sana.
3	Las hojas empiezan a necrosarse de manera muy notoria, afectando del 21 al 50 % del área sana.
4	Mayor al 50 % de área foliar se encuentra afectada.



**Figura 13.** Patogenicidad de roya en plantas clonadas y micorrizadas. Nota: A. Evaluación de la incidencia de roya y B. Evaluación de la presencia de roya.

## **2.16. Diseño estadístico**

Se utilizó un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) previo se realizó la prueba de Shapiro-Wilks, en la cual se comprobó que algunas variables no tenían una distribución normal, luego se realizó la prueba de homogeneidad de varianzas, mediante la prueba de Levene, una vez comprobada las dos pruebas estadísticas de comprobación, se realizó el análisis de varianza (ANVA), y un test de comparación de medias (Tukey,  $P < 0,05$ ) (Snedecor y Cochran, 1980). Para realizar este análisis se utilizó el paquete estadístico InfoStat (version 2012e).

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Resultados

De las evaluaciones realizadas en campo (10 meses de instalado el ensayo en campo) entre octubre de 2019 a agosto de 2020, ubicada en el distrito de Japelacio, provincia de Moyobamba y región de San Martín se obtuvieron los siguientes resultados:

##### 3.1.1. Micorrización en plantas de café logradas por propagación vegetativa

##### Longitud de micelio extradicular de HMA evaluado

**Tabla 5**

*Análisis de varianza para la longitud de micelio en plantas micorrizadas de C. arabica.*

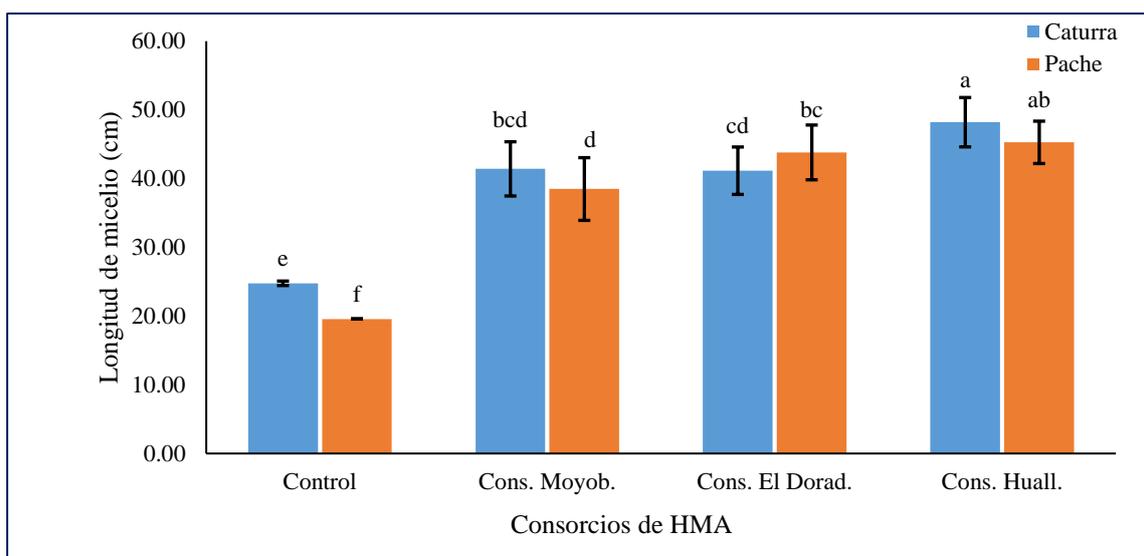
*Datos transformados Ln (x).*

F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Varied. Café	1	0,18	0,18	15	0,0002**
Cons. HMA	3	8,45	2,82	241,14	<0,0001**
Varied. Café*Consortio HMA	3	0,26	0,09	7,38	0,0002**
Error	72	0,84	0,01		
Total	95	11,21			

Interpretación de p: \*\*= Altamente significativo; \*= Significativo; N. S= No Significativo

$\bar{X} = 37,83 \text{ cm}$        $R^2 = 92,0 \%$       C.V. = 3,02 %

El análisis de varianza (Tabla 5) para la longitud de micelio obtenida en los 08 tratamientos, indica que estadísticamente existen diferencias altamente significativas, para los factores en estudio, lo mismo para la interacción entre ellos; aceptándose por tanto que el micelio de los HMA en café depende, entre otras condiciones, de variedades clonales de café y los consorcios de HMA. Se obtuvieron una media de 37,83 cm; con un coeficiente de variabilidad de 3,02 % y un coeficiente de determinación de 92,0 % resultados que están dentro del rango de dispersión aceptable según Calzada (1982).



**Figura 14.** Longitud de micelio (cm) evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.

Según la prueba de Tukey (Fig. 14) para la longitud de micelio extraradical, muestra diferencias significativas en cuatro grupos; un primero conformado por plantas clonadas de caturra y pache con aplicación de micorrizas arbusculares procedente del Huallaga con 48.20 cm; un segundo grupo conformado por plantas clonadas de caturra y pache con aplicación de micorrizas arbusculares procedente de El Dorado y Moyobamba y un tercer y cuarto grupo conformado por plantas clonadas de caturra y pache sin aplicación de micorrizas arbusculares (control) que muestran promedios de micelio de 24,77 y 19,57 cm respectivamente, indicadas en el anexo 12.

### Colonización micorrízica evaluado

**Tabla 6**

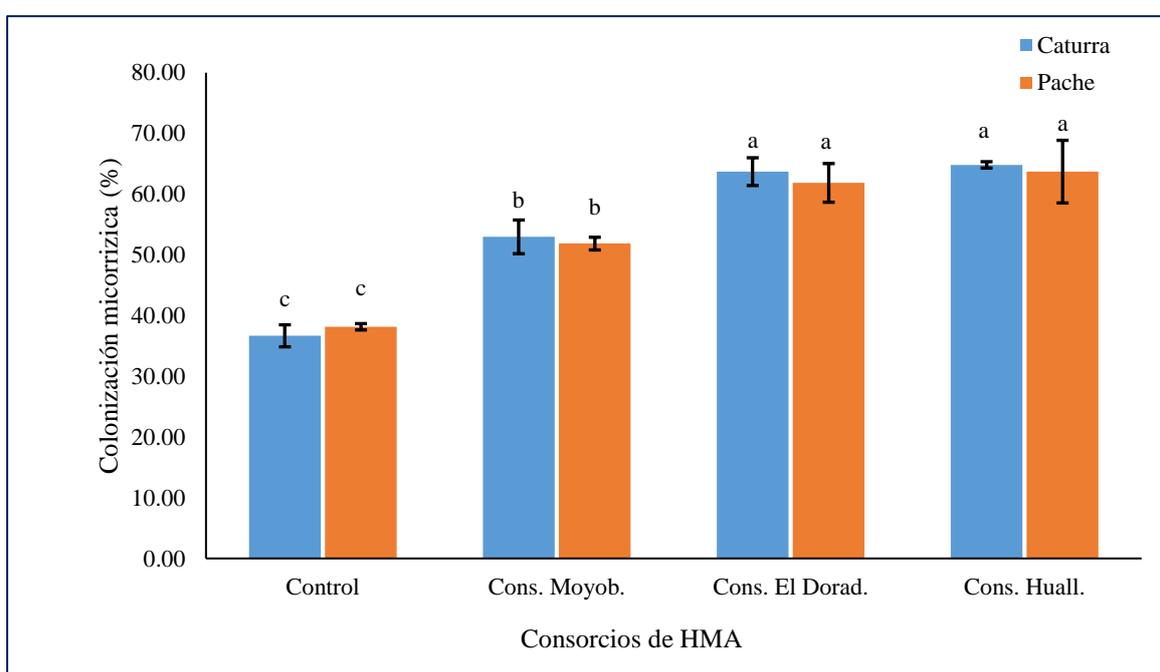
*Análisis de varianza para la colonización micorrízica (%) en plantas micorrizadas de C. arabica. Datos transformados Ln (x).*

<b>F.V.</b>	<b>gl</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Varied. Café	1	0,0013	0,0013	0,32	0,5733N.S.
Cons. HMA	3	4,52	1,51	361,21	<0,0001**
Varied. Café*Consortio HMA	3	0,02	0,01	7,57	0,0051*
Error	72	0,3	0,0042		
Total	95	5,04			

Interpretación de p: \*\*= Altamente significativo; \*= Significativo; N. S= No Significativo

$\bar{X} = 37,86 \%$        $R^2 = 92,0 \%$       C.V. = 1,63 %

El análisis de varianza (Tabla 6) para la colonización micorrízica obtenida en los 08 tratamientos, indica que solo existen diferencias significativas para la aplicación de consorcios micorrízicos y la interacción entre la Variedades clonales de café y consorcios de HMA, aceptándose por tanto que la colonización micorrízica en café depende, entre otras condiciones, de variedades clonales de café y los consorcios de HMA. Se obtuvieron una media de 37,86 cm; con un coeficiente de variabilidad de 1,63 % y un coeficiente de determinación de 92,0 % resultados que están dentro del rango de dispersión aceptable según Calzada 1982.



**Figura 15.** Colonización micorrízica (%) evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.

Según la prueba de Tukey (Fig. 15) para la colonización micorrízica, muestra diferencias significativas en tres grupos; un primero conformado por plantas clonadas de caturra y pache con aplicación de micorrizas arbusculares procedente del Huallaga y El Dorado con promedios que van desde 61,85 hasta 64,81 %; un segundo grupo conformado por plantas clonadas de caturra y pache con aplicación de micorrizas arbusculares procedente de Moyobamba y un tercer grupo conformado por plantas clonadas de pache y caturra sin aplicación de micorrizas arbusculares (control) que muestran promedios de colonización de 38,15 y 36,67 % respectivamente, indicadas en el anexo 12.

### 3.1.2. Crecimiento de plantas micorrizadas de café (altura, número de ramas, área foliar y floración).

#### Altura de planta evaluado

**Tabla 7**

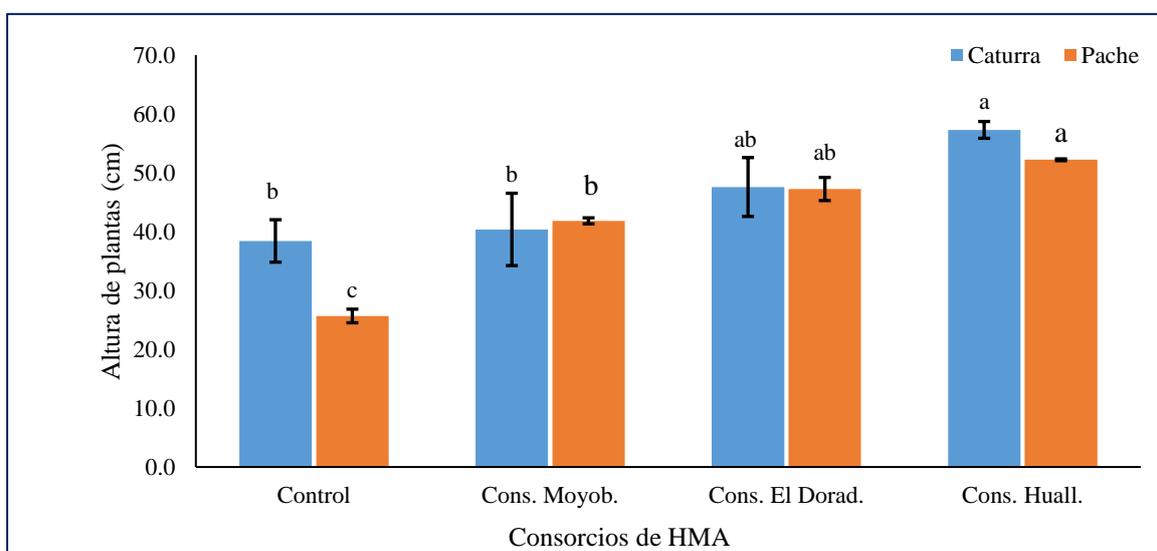
*Análisis de varianza para la altura de planta (cm) micorrizadas de C. arabica. Datos transformados Ln (x).*

F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Variedad Café	1	0,44	0,44	7,51	0,0077**
Consortio. HMA	3	4,83	1,61	27,23	<0,0001**
Variedad Café*Consortio HMA	3	1,09	0,36	6,17	0,0009**
Error	72	4,26	0,06		
Total	95	11,27			

Interpretación de p: \*\*= Altamente significativo; \*= Significativo; N. S= No Significativo

$\bar{X} = 43,8 \text{ cm}$        $R^2 = 79,0 \%$       C.V. = 6,52 %

El análisis de varianza (Tabla 7) para la altura de plantas de café obtenida en los 08 tratamientos, indica que existen diferencias significativas para las variedades clones de café, aplicación de consorcios micorrízicos y la interacción entre la Variedades clonales de café con los HMA, aceptándose por tanto que la altura en plantas de café depende, entre otras condiciones, de variedades clonales de café y los consorcios de HMA. Se obtuvieron una media de 37,86 cm; con un coeficiente de variabilidad de 1,63 % y un coeficiente de determinación de 92,0 % resultados que están dentro del rango de dispersión aceptable según Calzada 1982.



**Figura 16.** Altura de planta (cm) evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.

Según la prueba de Tukey (Fig. 16) para la altura de plantas, muestra diferencias significativas en tres grupos; un primero conformado por plantas clonadas de caturra y pache con aplicación de micorrizas arbusculares procedente del Huallaga y El Dorado con promedios que van desde 47,3 hasta 57,3 cm; un segundo grupo conformado por plantas clonadas de caturra y pache con aplicación de micorrizas arbusculares procedente de Moyobamba y el testigo (sin HMA) con promedios en altura entre 38,4 y 41,8 cm y un tercer grupo conformado por plantas clonadas de pache sin aplicación de micorrizas arbusculares (control) que muestra un promedio de colonización micorrízica de 25,7 cm, indicadas en el anexo 12.

### Número de ramas evaluado

**Tabla 8**

*Análisis de varianza para el número de ramas en plantas micorrizadas de C. arabica.*

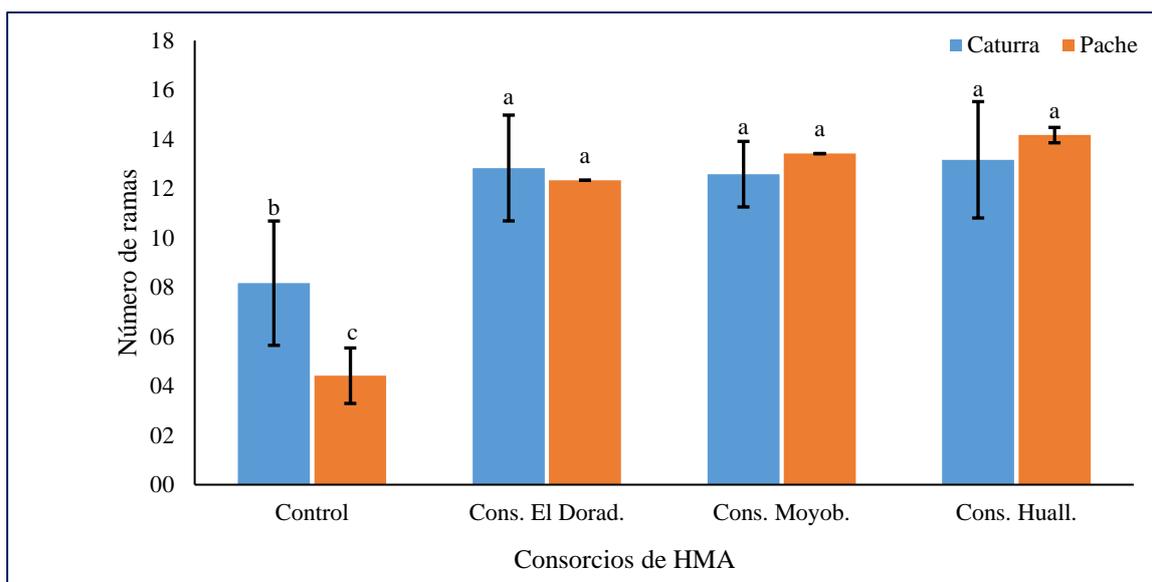
*Datos transformados Ln (x).*

F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Variedad Café	1	0,22	0,22	2,04	0,1575**
Consortio HMA	3	13,74	4,58	42,67	<0,0001**
Variedad Café*Consortio HMA	3	1,57	0,52	4,86	0,0039**
Error	72	7,73	0,11		
Total	95	26,89			

Interpretación de p: \*\*= Altamente significativo; \*= Significativo; N. S= No Significativo

$\bar{X} = 11,38$        $R^2 = 78,0 \%$       C.V. = 14,1 %

El análisis de varianza (Tabla 8) para el número de ramas en plantas de café obtenida en los 08 tratamientos, indica que existen diferencias significativas para las variedades clones de café, aplicación de consorcios micorrízicos, variedades clonales de café y la interacción entre la Variedades clonales de café con los HMA, aceptándose por tanto que el número de ramas en café depende, entre otras condiciones, de variedades de café y los consorcios de HMA. Se obtuvieron una media de 11,38; con un coeficiente de variabilidad de 14,1 % y un coeficiente de determinación de 78,0 % resultados que están dentro del rango de dispersión aceptable según Calzada 1982.



**Figura 17.** Número de ramas evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.

Según la prueba de Tukey (Fig. 17) para el número de ramas, muestra diferencias significativas en tres grupos; un primero conformado por plantas clonadas de caturra y pache con aplicación de micorrizas arbusculares procedente del Huallaga, El Dorado y Moyobamba con promedios que van desde 12,3 hasta 14,2; un segundo y tercer grupo conformado por plantas clonadas de caturra y pache sin aplicación de micorrizas arbusculares que muestra un promedio en número de ramas entre 4,4 a 8,2, indicadas en el anexo 12.

### Área foliar evaluado

**Tabla 9**

*Análisis de varianza para el área foliar (cm<sup>2</sup>) en plantas micorrizadas de C. arabica.*

*Datos transformados Ln (x).*

F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Variedad Café	1	0,83	0,83	15,38	0,0002**
Consortio HMA	3	14,6	4,87	90,2	<0,0001**
Variedad Café*Consortio HMA	3	2,15	0,72	13,26	<0,0001**
Error	72	3,89	0,05		
Total	95	25,08			

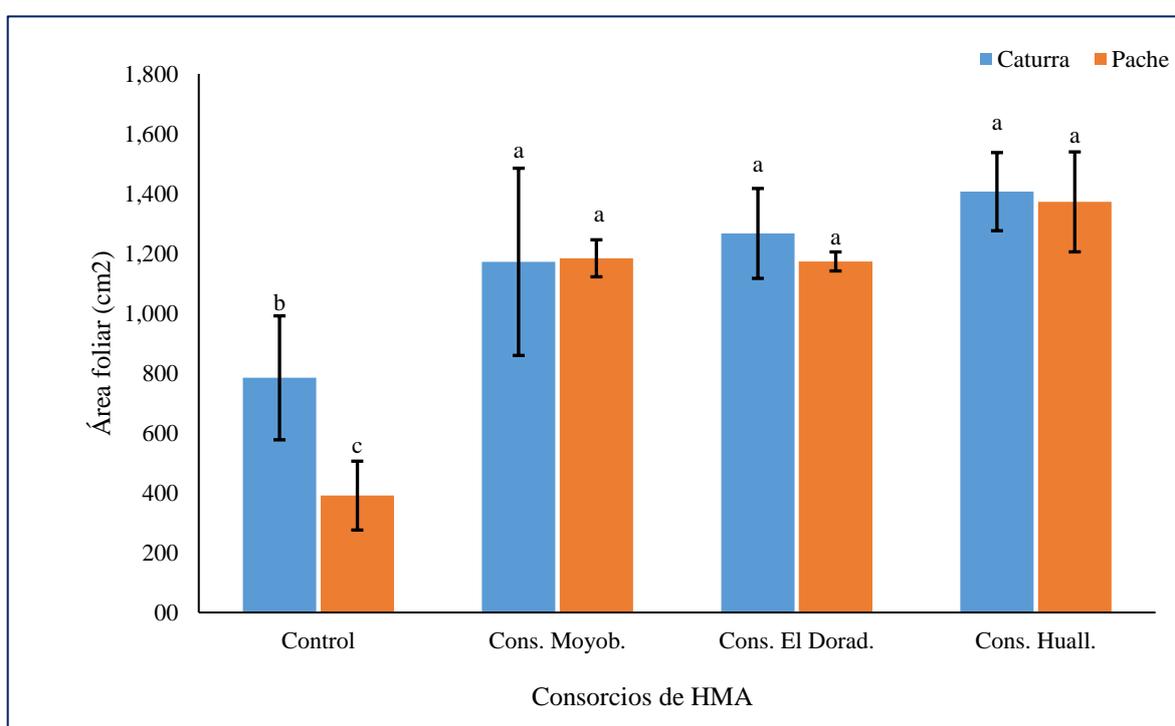
Interpretación de p: \*\*= Altamente significativo; \*= Significativo; N. S= No Significativo

$$\bar{X} = 1093,5 \text{ cm}^2$$

$$R^2 = 85,0 \%$$

$$C.V. = 3,37 \%$$

El análisis de varianza (Tabla 9) para el área foliar en plantas de café obtenida en los 08 tratamientos, indica que existen diferencias significativas para todos los factores a excepción de las variedades clonales de café y consorcios de HMA, aceptándose por tanto que el área foliar en café depende, entre otras condiciones, de variedades de café y los consorcios de HMA. Se obtuvieron una media de 1 093,5 cm<sup>2</sup>; con un coeficiente de variabilidad de 3,37 % y un coeficiente de determinación de 85,0 % resultados que están dentro del rango de dispersión aceptable según Calzada 1982.



**Figura 18.** Área foliar (cm<sup>2</sup>) evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.

Según la prueba de Tukey (Fig. 18) para el área foliar, muestra diferencias significativas en tres grupos; un primero conformado por plantas clonadas de caturra y pache con aplicación de micorrizas arbusculares procedente del Huallaga con promedios de 1 406,3 y 1 372,00 cm<sup>2</sup>; un segundo y tercer grupo conformado por plantas clonadas de caturra y pache sin aplicación de micorrizas arbusculares que muestra un promedio en área foliar de 784,07 y 390,53 cm<sup>2</sup>, indicadas en el anexo 12.

## Número de flores evaluados

**Tabla 10**

*Análisis de varianza para el número de flores en plantas micorrizadas de C. arabica.*

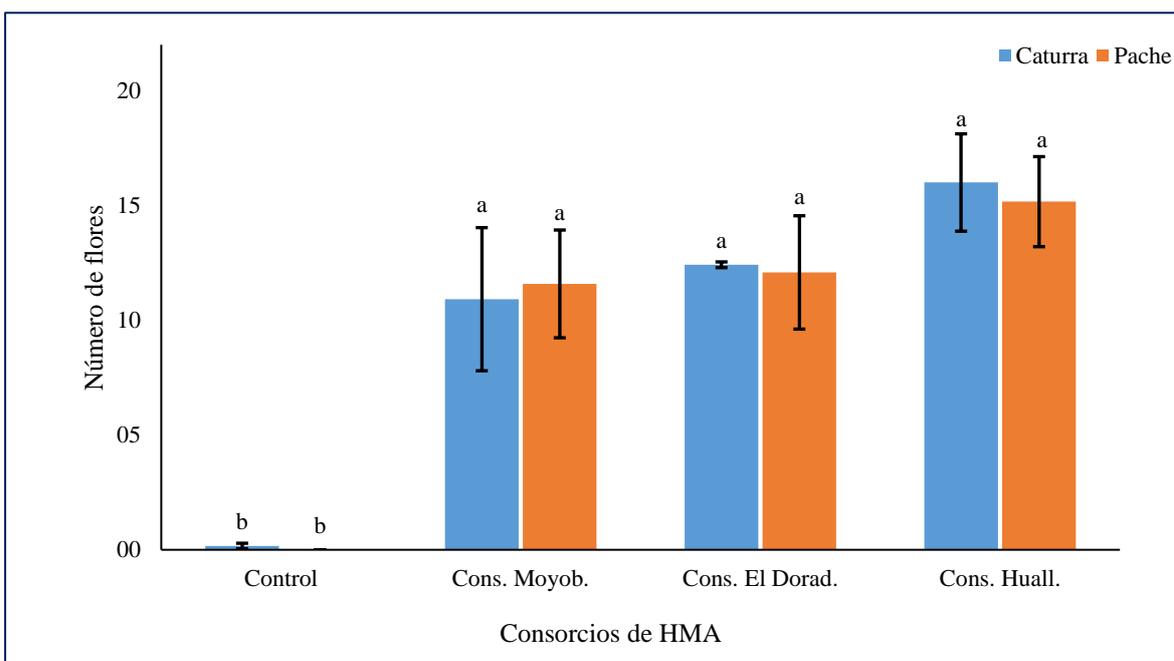
*Datos transformados Ln (x)*

F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Variedad Café	1	0,0025	0,0025	0,0037	0,9517N.S.
Consortio HMA	3	215,55	71,85	106,58	<0,0001**
Variedad Café*Consortio HMA	3	1,07	0,36	0,53	0,663N.S.
Error	72	48,54	0,67		
Total	95	279,48			

Interpretación de p: \*\*= Altamente significativo; \*= Significativo; N. S= No Significativo

$\bar{X} = 9,79$        $R^2 = 83,0 \%$       C.V. = 11,3 %

El análisis de varianza (Tabla 10) para el número de flores en plantas de café obtenida en los 08 tratamientos, indica que existen diferencias significativas solo para la aplicación de consorcios de HMA, aceptándose por tanto que el número de flores en café depende, entre otras condiciones, de la aplicación micorrízica. Se obtuvieron una media de 9,79 flores por planta; con un coeficiente de variabilidad de 11,3 % y un coeficiente de determinación de 83,0 % resultados que están dentro del rango de dispersión aceptable según Calzada 1982.



**Figura 19.** Número de flores evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.

Según la prueba de Tukey (Fig. 19) para el número de flores, muestra diferencias significativas solo en dos grupos diferenciados por un primer grupo conformado por los consorcios de HMA procedente del Huallaga, en las variedades de caturra y pache con valores de 13,1 y 14,1 respectivamente de flores por planta de café; un segundo grupo conformado por plantas clonadas de caturra y pache sin aplicación de micorrizas arbusculares que muestra un promedio en número de flores de 8,1 y 4,4 respectivamente, indicadas en el anexo 12.

### 3.1.3. Estado nutricional en clones micorrizadas de café.

#### Contenido de nitrógeno foliar evaluado

**Tabla 11**

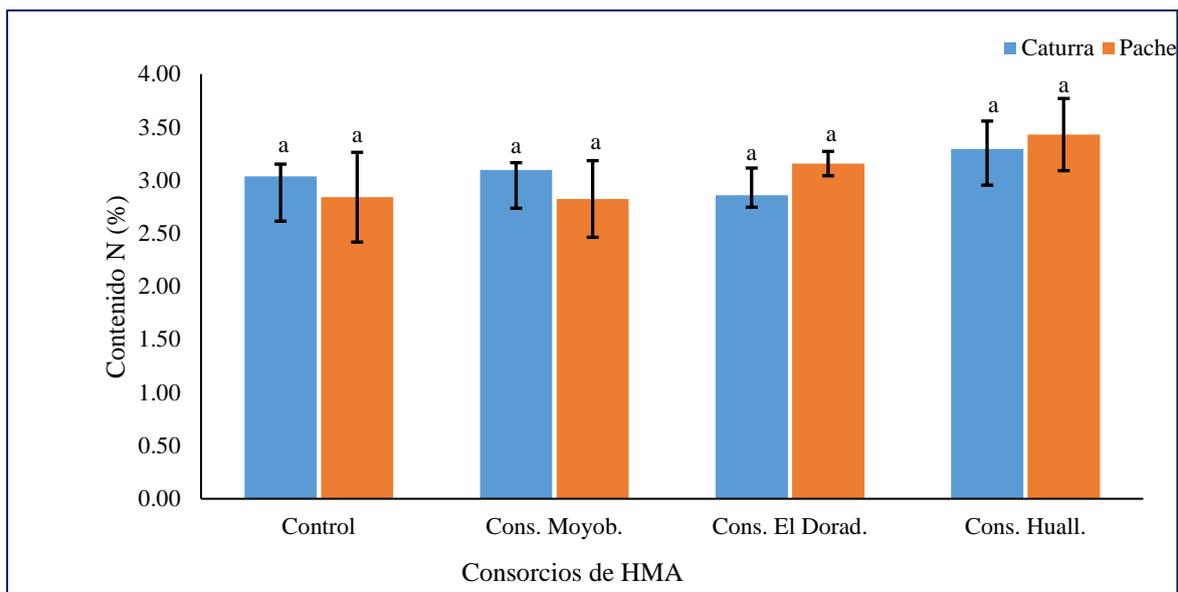
*Análisis de varianza para el contenido de nitrógeno (%) en plantas micorrizadas de C. arabica. Datos transformados Ln (x).*

F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Variedad Café	1	7,98	7,98	0,05	0,816N.S.
Consortio HMA	3	411,42	137,14	0,92	0,453NS
Variedad Café*Consortio HMA	3	187,63	62,54	0,42	0,741NS
Error	16	2383,63	148,98		
Total	23	2990,65			

Interpretación de p: \*\*= Altamente significativo; \*= Significativo; N. S= No Significativo

$\bar{X} = 3,051 \%$        $R^2 = 20,0 \%$       C.V. = 49,83 %

El análisis de varianza (Tabla 11) para el contenido de nitrógeno en hojas de plantas de café obtenida en los 08 tratamientos, indica que no existen diferencias significativas en ninguno de los factores estudiados; por lo tanto, el nitrógeno foliar en café depende no depende entre otras condiciones, de las variedades clonales de café y la aplicación micorrízica. Se obtuvieron una media de 3,051 % por planta; con un coeficiente de variabilidad de 49,83 % y un coeficiente de determinación de 20,0 % de resultados que están dentro del rango de dispersión aceptable según Calzada 1982.



**Figura 20.** Contenido de nitrógeno (%) evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.

Según la prueba de Tukey (Fig. 20) para el contenido de nitrógeno evaluado en hojas, no muestra diferencias significativas en ninguno de los tratamientos evaluados, siendo las plantas clonadas de pache y caturra con aplicación de micorrizas arbusculares procedente del Huallaga tanto en pache como en caturra quienes mostraron los mejores resultados con 3,43 y 3,29 % respectivamente y los menores valores lo muestra plantas clonadas sin HMA y aplicación de micorrizas arbusculares procedente de Moyobamba con promedios de 2,84 y 2,82 % respectivamente, indicadas en el anexo 13.

### Contenido de fósforo evaluado

**Tabla 12**

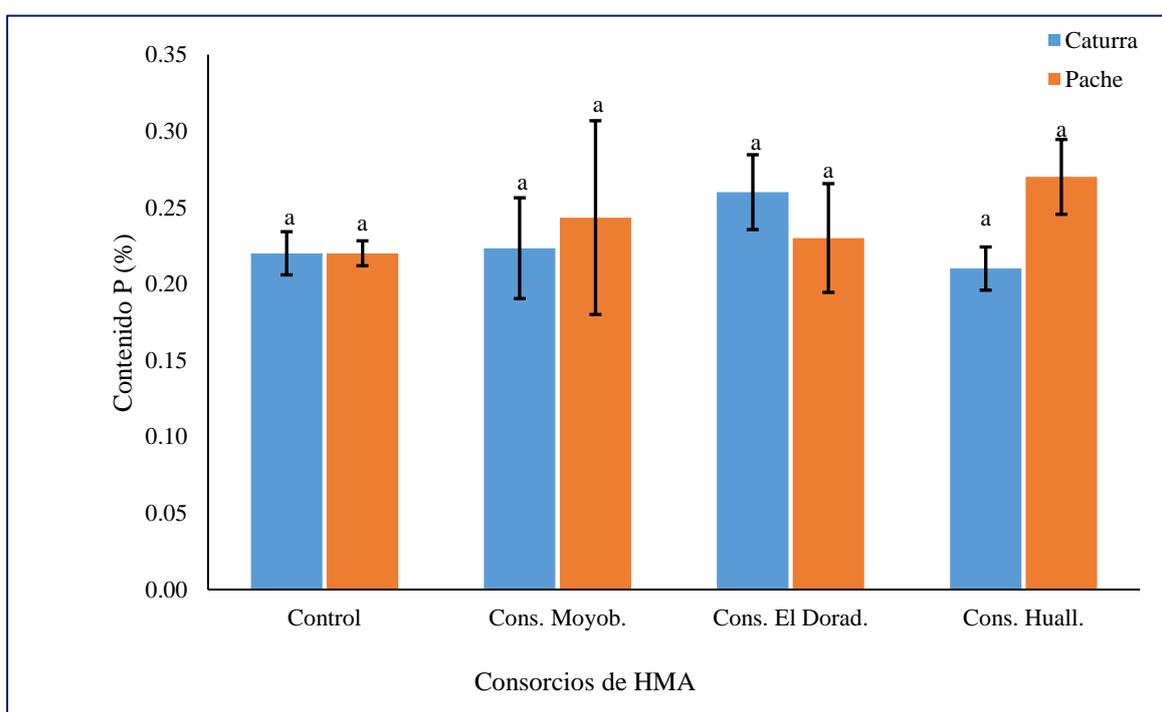
*Análisis de varianza para el contenido de fósforo (%) en plantas micorrizadas de C. arabica. Datos transformados Ln (x).*

F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Variedad Café	1	0,02	0,02	0,26	0,615NS
Consortio HMA	3	0,14	0,05	0,59	0,633NS
Variedad Café*Consortio HMA	3	0,51	0,17	2,08	0,143NS
Error	16	1,3	0,08		
Total	23	1,96			

Interpretación de p: \*\*= Altamente significativo; \*= Significativo; N. S= No Significativo

$\bar{X} = 0,234 \%$        $R^2 = 20,0 \%$       C.V. = 49,83 %

El análisis de varianza (Tabla 12) para el contenido de fósforo en hojas de plantas de café obtenida en los 08 tratamientos, indica que no existe diferencias significativas en la interacción de variedades clonales de café y consorcios de HM; por lo tanto, se acepta que el fósforo foliar en café depende, entre otras condiciones, de las interacciones de café, consorcios micorrízicos. Se obtuvieron una media de 0,23 % por planta; con un coeficiente de variabilidad de 49,83 % y un coeficiente de determinación de 20 resultados que están dentro del rango de dispersión aceptable según Calzada 1982.



**Figura 21.** Contenido de fósforo (%) evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.

Según la prueba de Tukey (Fig. 21) para el contenido de fósforo evaluado en hojas, no muestra diferencias significativas en ninguno de los tratamientos, siendo las plantas clonadas de pache y caturra con aplicación de micorrizas arbusculares procedente de Huallaga y El Dorado quienes mostraron los mejores valores en fósforo con 0,27 y 0,26 % respectivamente y los valores más bajos lo muestra plantas clonadas de caturra con aplicación de micorrizas arbusculares de El Huallaga con 0,21 % y plantas clonadas de caturra y pache sin HMA ambos con valores de 0,22 %, indicadas en el anexo 13.

## Contenido de clorofila evaluado

**Tabla 13**

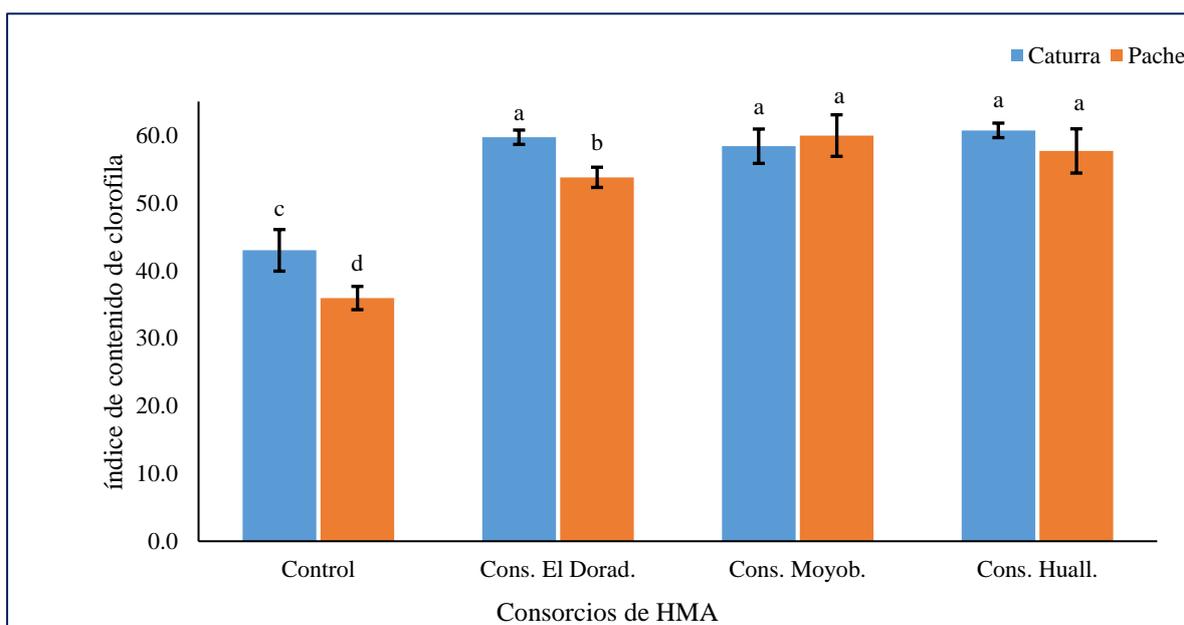
*Análisis de varianza para el índice de contenido de clorofila en plantas micorrizadas de C. arabica. Datos transformados Ln (x).*

F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Variedad Café	1	0,13	0,13	45,64	<0,0001**
Consortio HMA	3	2,86	0,95	323,35	<0,0001**
Variedad Café*Consortio HMA	3	0,14	0,05	15,45	<0,0001**
Error	71	0,21	0,003		
Total	94	3,53			

Interpretación de p: \*\*= Altamente significativo; \*= Significativo; N. S= No Significativo

$$\bar{X} = 53,60 \quad R^2 = 92,0 \% \quad C.V. = 1,37 \%$$

El análisis de varianza (Tabla 13) para el índice de contenido de clorofila en plantas de café obtenida en los ocho tratamientos, indica que existen diferencias significativas para todos los factores en estudio y los consorcios micorrízicos. Por tanto, la clorofila en café depende, entre otras condiciones, de las variedades clonales de café, aplicación micorrízica y la interacción de ambos. Se obtuvieron una media de 53,60; con un coeficiente de variabilidad de 1,37 % y un coeficiente de determinación de 94,0 % resultados que están dentro del rango de dispersión aceptable según Calzada 1982.



**Figura 22.** Índice de contenido de clorofila evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.

Según la prueba de Tukey (Fig. 22) para el índice de contenido de clorofila en hojas, muestra diferencias significativas en cuatro grupos; un primero conformado por plantas clonadas de caturra y pache con aplicación de micorrizas arbusculares procedente del Huallaga, Moyobamba y El Dorado con valores que van desde 58,4 a 60,7; un segundo grupo conformado por plantas clonadas de pache con aplicación de micorrizas arbusculares procedente de El Dorado con un promedio de índice de clorofila de 53,8 y un tercer y cuarto grupo conformado por plantas clonadas de caturra y pache sin aplicación de micorrizas arbusculares (control) que muestran promedios de 43 y 36 respectivamente, indicadas en el anexo 13.

### 3.1.4. Glomalina y catalasa en clones de café en las variedades de caturra y pache.

#### Glomalina evaluada en suelos

**Tabla 14**

*Análisis de varianza para la glomalina (mg/g) en plantas micorrizadas de C. arabica.*

*Datos transformados Ln (x).*

F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Variedad Café	1	49,73	49,73	3,08	<0,098NS
Consortio HMA	3	234,24	78,08	4,84	<0,013**
Variedad Café*Consortio HMA	3	178,39	59,46	3,69	<0,034**
Error	16	258,11	16,13		
Total	23	720,47			

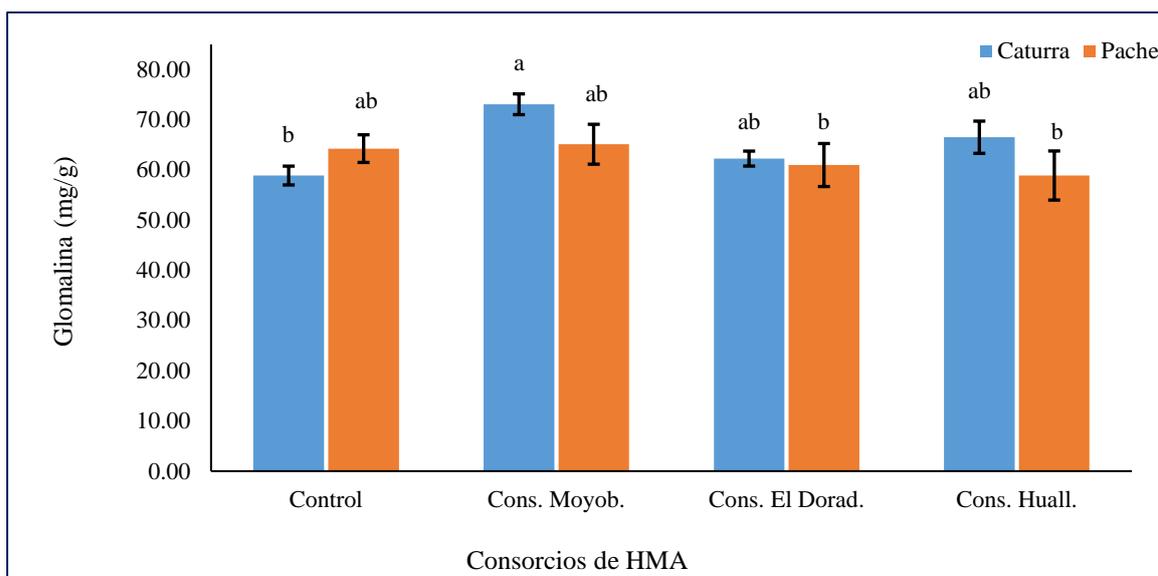
Interpretación de p: \*\*= Altamente significativo; \*= Significativo; N. S= No Significativo

$\bar{X} = 63,74 \text{ mg/g}$

$R^2 = 64 \%$

C.V. = 6,30 %

El análisis de varianza (Tabla 14) para el contenido de glomalina en suelo de plantas de café obtenida en los 08 tratamientos, indica que existen diferencias significativas para el factor consorcios de HMA y la interacción de micorrizas y variedades de café, aceptándose por tanto que la glomalina en café depende, entre otras condiciones, de los HMA y la interacción de mabos factores. Se obtuvieron una media de 63,74 mg/g; con un coeficiente de variabilidad de 6,30 % y un coeficiente de determinación de 64,0 % resultados que están dentro del rango de dispersión aceptable según Calzada 1982.



**Figura 23.** Glomalina (mg/g) evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.

Según la prueba de Tukey (Fig. 23) para el contenido de glomalina evaluada en suelos de café, muestra diferencias significativas en tres grupos; un primer grupo conformado por plantas clonadas de caturra con aplicación de micorrizas arbusculares procedente de Moyobamba con 73,08 mg/g; un segundo grupo conformado por plantas clonadas de pache y caturra con y sin aplicación de micorrizas arbusculares y un tercer grupo conformado por plantas clonadas de pache y caturra con y sin aplicación de micorrizas con 58,88 mg/g, indicadas en el anexo 13.

### Catalasa evaluada en suelos

**Tabla 15**

*Análisis de varianza para la catalasa (U/g) en plantas micorrizadas de C. arabica. Datos transformados Ln (x).*

F.V.	gl	SC	CM	F	p-valor
Variedad Café	1	3,13	3,13	77,02	0,0001**
Consortio HMA	3	17,15	5,72	140,55	0,00001**
Variedad Café*Consortio HMA	3	8,45	2,82	69,23	<0,0001**
Error	16	0,65	0,04		
Total	23	29,38			

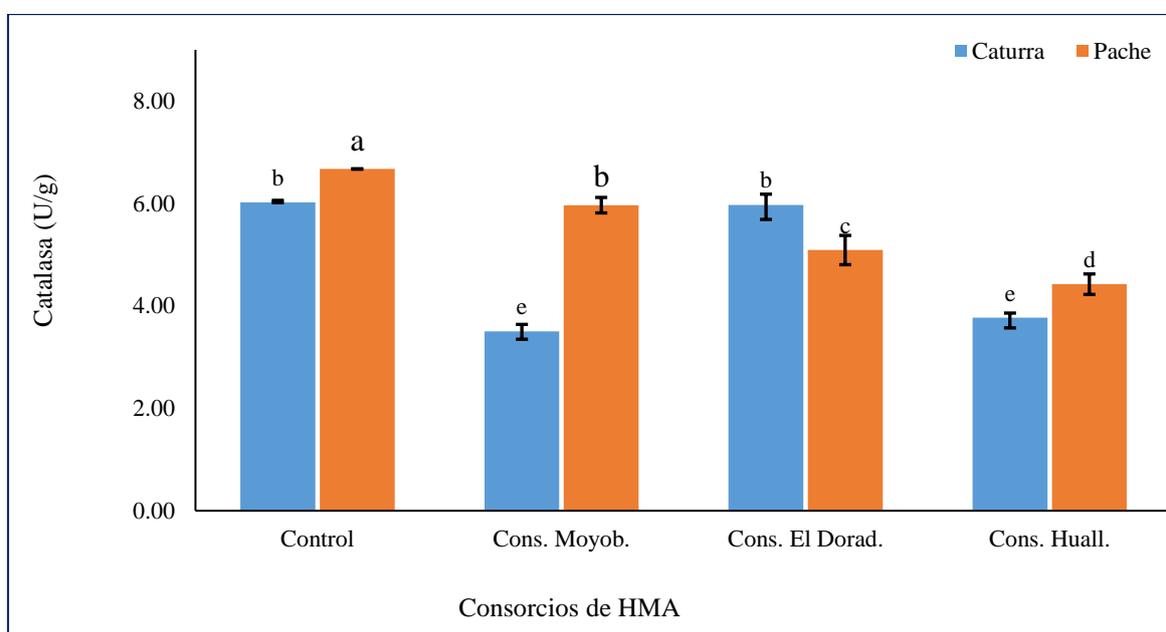
Interpretación de p: \*\*= Altamente significativo; \*= Significativo; N. S= No Significativo

$\bar{X} = 5,17 \text{ U/g}$

$R^2 = 98 \%$

C.V. = 3,90 %

El análisis de varianza (Tabla 15) para el contenido de catalasa (Cat) en suelo de plantas de café obtenida en los 08 tratamientos, indica que existen diferencias significativas en los factores de variedades de café, consorcios de HMA y la interacción de ambos factores, aceptándose por tanto que la catalasa en café depende, entre otras condiciones, de los clones de las variedades de caturra y pache y la aplicación micorrízica. Se obtuvieron una media de 5,17 U/g; con un coeficiente de variabilidad de 3,90 % y un coeficiente de determinación de 98 % resultados que están dentro del rango de dispersión aceptable según Calzada 1982.



**Figura 24.** Catalasa (U/g) evaluada en campo, bajo diferentes consorcios de HMA y variedades clonales de café.

Según la prueba de Tukey (Fig. 24) para el contenido de catalasa evaluada en suelos de café, muestra diferencias significativas en los diferentes tratamientos, tal es así que plantas de caturra micorrizadas con el consorcio de Moyobamba y Huallaga mostraron los niveles mas bajos con 3,50 y 3,77 U/g respectivamente y los valores mas altos lo muestra el tratamiento control, indicadas en el anexo 13.

### 3.1.5. Correlación entre las procedencias de HMA y la patogenicidad del hongo *H. vastatrix* en clones de café en las variedades de caturra y pache.

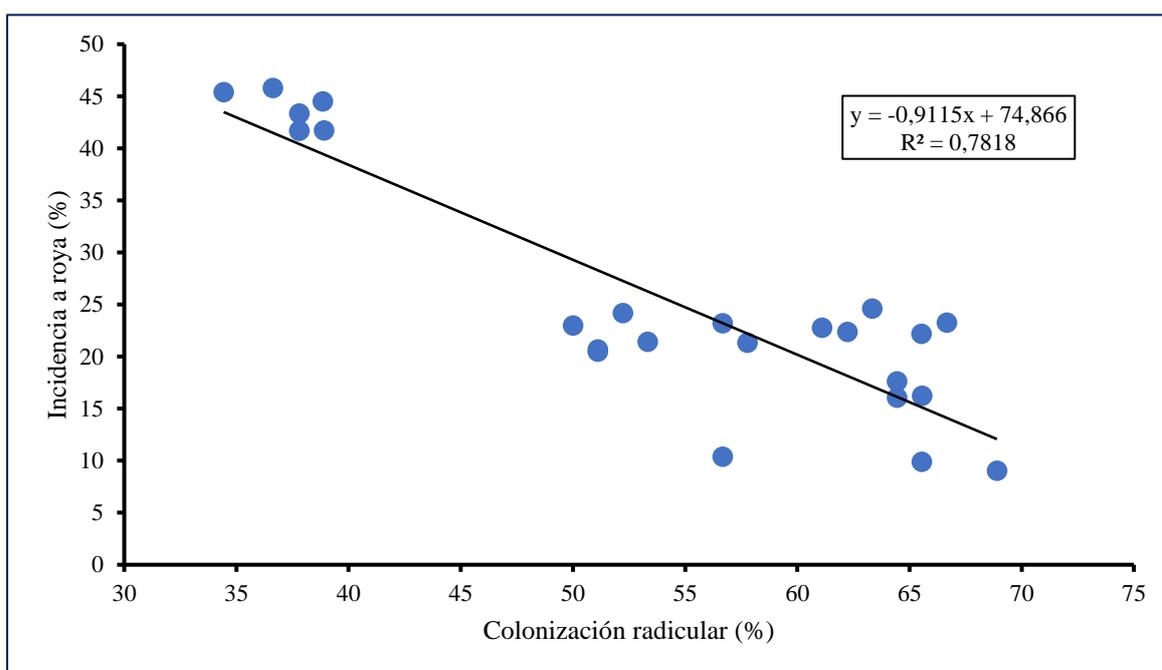
#### Correlación de la colonización micorrízica y la incidencia a roya

**Tabla 16**

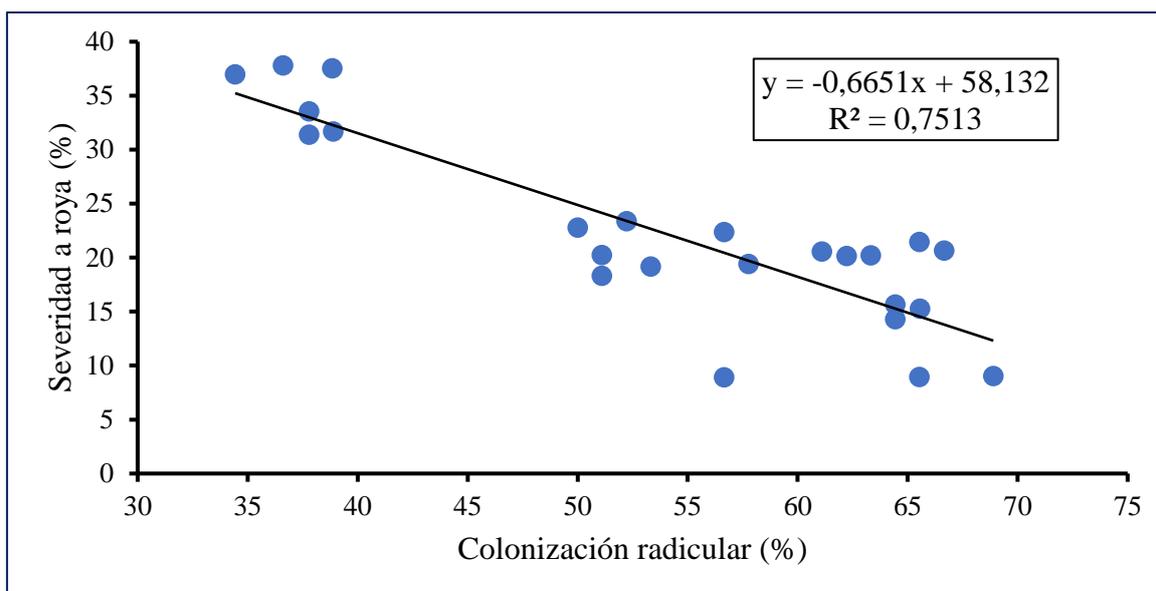
*Correlación entre la colonización micorrízica y la patogenicidad del hongo *H. vastatrix* en clones de café en las variedades de caturra y pache.*

Correlación	Indicador	Resultado
Colonización* Incidencia a roya	Pearson	0,884
	R <sup>2</sup>	0,782
	Pendiente	-0,912
	Formula	y=-9115x + 74.8866
	Tipo	Correlación inversa
Colonización * Severidad a roya	Pearson	0,867
	R <sup>2</sup>	0,751
	Pendiente	-0,665
	Formula	y=-0,6651x + 58,132
	Tipo	Correlación inversa

#### Correlación de la colonización micorrízica y la incidencia y severidad a roya



**Figura 25.** Correlación entre la colonización micorrízica y la incidencia al hongo *H. vastatrix* en clones de café en las variedades de caturra y pache.



**Figura 26.** Correlación entre la colonización micorrízica y la severidad al hongo *H. vastatrix* en clones de café en las variedades de caturra y pache.

Se ha comparado el nivel de infección por roya de dos clones de café (caturra y pache) cultivados bajo campo con aplicación de consorcios de micorrizas arbusculares, bajo condiciones ambientales no controladas, independientemente de los HMA y los clones de café: todas las plantas de café se infectaron a 40 después de establecido en campo. La tabla 15 muestra que las correlaciones entre la colonización micorrízica en HMA con la incidencia y severidad a roya en plantad de café, fueron favorables. Este resultado nos sugiere que la colonización de HMA ha influenciado en la reducción de la presencia a roya en plantas de cafeto, y que los consorcios de HMA-N, específicamente el procedente del Huallaga, han sido efectivos en todos los tratamientos inoculados en comparación al testigo sin inóculo de HMA-N. En consecuencia, el mejor indicador para estudiar la influencia de los diferentes entre tratamientos de roya parece ser la incidencia y severidad no solo porque discriminó mejor los diferentes tratamientos sino también porque tendrá el mayor impacto para los agricultores caficultores.

## 3.2. Discusión

### 3.2.1. Micorrización en plantas de café logradas por propagación vegetativa

#### a) Micelio extraradical

Su amplio micelio extraradical de los consorcios el Dorado y Huallaga en los clones de caturra y pache favorece el vínculo entre el suelo y la planta (Rojas-Mego *et al.*, 2014).

Facilitando explorar un área mayor de suelo que las raíces, Rajitor y Piotrowska-Seget, 2016), permitiendo de esta manera transportar nutrientes minerales (Smith y Smith, 2011). A su vez los clones de caturra y pache micorrizadas con consorcios Huallaga y El Dorado crecieron en suelos con pH variado entre 6,42 a 7,49 y fosforo disponible entre 7,82 a 24,71 ppm. Mientras que el pH de los suelos donde crecieron los clones caturra y pache sin aplicación micorrízica vario entre 6,60 a 7,02 y fosforo entre 14,85 a 16,86 ppm (Tabla 2) y una humedad relativa ambiental entre 67,2 a 76,1 % (Fig. 2). El micelio extrarradical sobrevive en variaciones ambientales considerables, como el pH del suelo, la humedad y la disponibilidad de nutrientes (Smith y Smith, 2011), siendo esta disponibilidad de nutrientes translocadas mediante la planta y a través de HMA (Smith & Smith, 2011; Bücking y Kafle, 2015).

La importancia del micelio extrarradicular (MER) se ve reflejado en los tratamientos micorrizados a comparación del control sin la aplicación de micorrizas arbusculares (MA) presentado en los 8 tratamientos (Tabla 4). Esto se debe a que los MER funcionan como un sistema radicular complementario, siendo más eficiente en plantas clonadas de café en el consorcio procedente de Huallaga ya que éstos se extienden a zonas lejanas de escasez de nutrientes, llegando en algunos casos a absorber hasta 40 veces más que el sistema radicular, debido a su amplia exploración extrarradicular (Peña-Venegas y Cardona, 2010).

#### **b) Colonización micorrízico**

La colonización micorrízica corresponde al porcentaje que ocupa los HMA en raíces de café. Se observaron que la colonización micorrízica presentaron mejores resultados que los tratamientos testigo que no tenía inóculo, pero sí colonización entre 7,63 a 24,72 % propios de la zona de Japelacio (Figura 14). Resultados similares de colonización en promedio obtuvo Aldrich-Wolfe *et al.* (2020) con  $45 \pm 2$  % en colonización media de la longitud de la raíz en agroecosistemas con café. Asimismo, Del Águila *et al.* (2018) demostraron que la colonización determinó el porcentaje de ocupación de los HMA en las raíces de café (*Coffea arabica* L.), el cual fue de  $31,33 \pm 11,50$  % en comparación con el testigo (sin aplicación de HMA) que varió de 11,50 a 15,83 %. Por otro lado Cruz-Hernández (2014) encontró que las plantas de tabaco que no habían sido sometidos a los inóculos con HMA presentaron porcentajes de colonización micorrízica que oscilan entre 22,3 y 22,7 %. Mientras que las plantas que fueron inoculadas con HMA presentaron un máximo de 48,7 % de colonización micorrízica.

Las condiciones de temperatura y humedad de la zona variaron y a diferencia de otras zonas estas presentan mayor humedad y menor temperatura; por lo tanto estas características ambientales pueden afectar la presencia de los hongos micorrízicos incorporados a diferencia de los HMA autóctonos que si están adaptadas a la zona, por lo tanto presentan un nicho favorable para la biofertilización y bioprotección de la planta de café, esto es validado por Read (1991) quien menciona que las diferentes condiciones climáticas y edáficas dan lugar a dominancia de diferentes tipos de hongos micorrízicos en cada ecosistema. Estos resultados indicaron que podría haber preferencias de nicho entre los HMA que afecten la composición de la comunidad de los HMA (del Mar *et al.*, 2016 y Punaminiya *et al.*, 2010)

Asimismo, los parámetros ambientales y la presencia de arbustos como sombra pudieron haber afectado las poblaciones de HMA en términos de su composición y distribución (Hazard *et al.*, 2013 y Torrecillas *et al.*, 2014). Otras de las razones que afectaron o favorecieron la presencia de HMA fueron los niveles altos de fósforo (P) encontrado en los tratamientos control; ya que ocasiona tasas bajas de colonización de raíces micorrízicas y menor diversidad de HMA (Cheng *et al.*, 2013). Además, se ha sugerido que el pH del suelo tiene un efecto marcado en las comunidades de HMA en agroecosistemas y cultivos (Hazard *et al.*, 2013). En este estudio, se descubrió que el pH es un factor significativo que influye en las comunidades de HMA. De manera similar, algunos estudios concluyeron que el pH es el factor ambiental clave que da forma a las comunidades de HMA (Bainard *et al.*, 2015).

Los HMA del Huallaga presentaron mayor colonización y micelio evaluados, por lo tanto, fueron más eficientes en el crecimiento del cafeto durante los 10 primeros meses de evaluación; esto hace que los HMA del Huallaga tuvieron mayor adaptabilidad, por lo tanto, hubo mayor movimiento de los nutrientes desde el suelo a través de las hifas incluyendo los arbusculos, y finalmente atraviesan la membrana periarbuscular para alcanzar el citoplasma de la planta. El nitrógeno probablemente fue captado en la hifa extra-radical por transportadores de amonio, nitrato o aminoácidos, que lo transportan principalmente como arginina. Dentro de la hifa intra-radical el nitrógeno se liberó de ella en forma de urea y logró ser transportado directamente a la planta (Pamiske, 2008). Rekret *et al.*, (2019) hace mención que el mutualismo entre plantas y hongos micorrízicos arbusculares (AM) es común, y se espera que las poblaciones de plantas se hayan adaptado a las comunidades de

hongos AM que ocupan sus raíces. Sin embargo, debido a que la composición de la comunidad de hongos MA difiere a escalas <1 km, la adaptación local de las poblaciones de plantas a los hongos MA puede ocurrir a escalas espaciales pequeñas. Hay que entender que los tres consorcios micorrízicos empleado en el estudio fueron adaptadas en un solo ambiente intermedio por un periodo de 2 años. La respuesta de crecimiento promedio de las poblaciones de plantas a los hongos micorrízicos fue mayor cuando las poblaciones locales se cultivaron con hongos MA locales. Además, la adaptación local solo se observó en presencia de hongos MA a niveles bajos a intermedio de P como se obtuvo en los suelos donde se estableció la parcela de café.

En un ensayo anterior empleando estos tres consorcios micorrízicos procedentes de Moyobamba, El Dorado y Huallaga, tres condiciones climáticas y dos métodos de propagación del cafeto en las variedades de caturra y pache, mediante parcelas establecidos en las provincias de Moyobamba, Lamas y Huallaga. mostró que todos los consorcios de HMA tuvieron buenas respuestas en términos del desarrollo morfológico de las plantas de café, siendo el Consorcios Moyobamba y El Huallaga quienes mostraron los valores superiores al control (sin HMA); Por tanto, los autores demostraron que la inoculación de plantas de café con micorrizas arbusculares adaptados promueven el crecimiento de la planta de en campo Vallejos- Torres *et al.* (2021). Asimismo, las condiciones climáticas influyen en el crecimiento del cafeto y tolerancia a roya tal es así que la parcela ubicada en Huallaga mostró 42.87 cm de longitud de planta; Moyobamba 32,36 y Lamas 29,58 con temperaturas de 27 ° C, 20,9 y 24, 3° C respectivamente; precipitaciones de 113 mm, 102,6 y 145,7 mm por mes respectivamente y altitudes de 787, 1040 y 1215 msnm respectivamente (Vallejos-Torres *et al.*, 2021). Es probable que el desarrollo y rendimiento del cafeto sea muy susceptible a cambios en clima como la temperatura, humedad, causando aparentes efectos negativos incluyen la disminución de los rendimientos, calidad y aumento de la infección por plagas y enfermedades (Pham *et al.*, 2019).

Estudios indican que plantas sometidas a estrés hídrico, muestran un cambio en el patrón de colonización micorrízica, que se manifiesta como una disminución en el porcentaje de hifas, un incremento en el de vesículas, pero, un mantenimiento del porcentaje de arbusculos (Boyer, 1995); Para el consorcio micorrízicos de El Huallaga no se cedió esto pues los HMA presentaron estructuras completas como micelios, arbusculos, vesículas y sobre todo se

incrementó la colonización enormemente con la esporulación, es decir tuvieron una adaptabilidad mas eficiente traduciéndose en el mejor crecimiento de las plantas del cafeto y reducción de roya en hojas; lo que no sucedió con los consorcios de El Dorado, Moyobamba y el tratamiento control, quienes fueron limitados por las condiciones de la zona ya que la diversidad funcional de la planta en asociación con especies de HMA depende de la adaptación a condiciones ambientales. Stahl y Christensen (1991). Otra de las razones que el consorcio El Huallaga mostro mejores efectos en crecimiento y tolerancia a la roya se debe a su adaptabilidad a las condiciones ambientales de Japelacio, Moyobamba, básicamente la temperatura. Se debe indicar que la altitud y la temperatura presentan correlaciones negativas entre sí, donde por cada 100 m que se ascienden verticalmente se disminuyen entre 0,5 °C y 0,6 °C. Esto también podría ser un factor crucial para la adaptabilidad de las especies de HMA en la región San Martín (Läderach *et al.*, 2011).

### **3.2.2. Crecimiento de plantas micorrizadas de café (altura, número de ramas, área foliar y floración).**

#### **a) Crecimiento morfológico del cafeto**

Plantas clonadas de café en las variedades de caturra y pache con aplicación de MA procedentes de El Huallaga, mostraron los mejores incrementos en altura, número de ramas, área foliar y número de flores (Figuras 16, 17, 18 y 19). Probablemente debido a la incorporación de nutrientes especialmente el fosforo transportado a la planta por el micelio de los HMA. La relación simbiótica que sucede entre los HMA y el sistema radicular de vegetales incrementa la capacidad de absorción de nutrientes disponibles en el suelo provocando un mayor crecimiento vegetativo de plantas, siendo beneficiados los HMA con fuentes carbonadas provenientes de la planta (Martín *et al.*, 2010). Vallejos-Torres *et al.* (2019) evaluaron la presencia de HMA y dosis de compost en plantas de café en campo donde observaron que la altura de planta fue mayor en el consorcio de HMA Omia 10 y la aplicación de 100 g de compost. Mientras que el valor más bajo se obtuvo en el tratamiento testigo in inóculo de HMA y sin la aplicación de compost; del mismo modo, Trejo *et al.* (2011) indicaron que las plantas de café inoculadas con HMA en vivero presentaron mayor altura en comparación a la planta control. Otros autores como (Bhattacharya; Bagyaraj, 2002; Konrad *et al.*, 2014) observaron que los cultivares de café con aplicación de especies y/o aislados de HMA presentan un incremento considerado en la altura.

Estos resultados concuerdan con Del Águila *et al.* (2018) quienes reportaron que las plantas de café inoculadas con HMA muestran mejores características anatómicas en comparación con plantas que no han sido inoculadas con HMA. Es propicio indicar que la selección de los consorcios de HMA procedente del Huallaga mostraron efectividad en la inoculación con HMA, contribuyen en el funcionamiento adecuado de los agrosistemas y ayudan en los procesos de recuperación de suelos degradados (Cruz-Hernández, 2014).

La altura de planta es un indicador importante en la productividad del cafeto, puesto que es un indicador de un mayor número de nudos productivos, por tanto, mayor número de ramas plagiotrópicas (Covre *et al.*, 2016). Asimismo, una mayor área foliar implica mayor superficie para capturar la luz, lo que resulta en tasas fotosintéticas más altas y que conlleva a un mayor crecimiento vegetal (Partelli *et al.*, 2006). Tanto la inoculación con HMA y el uso de clones de caturra y pache mostraron mayor número de flores en tan solo 10 meses de evaluado desde su trasplante a campo. Shamshiri *et al.* (2012) demostró que la inoculación con HMA cambia la fenología de la floración. Los mismos autores indican que los HMA podría atraer más polinizadores, lo que aumenta el éxito reproductivo de las plantas y en beneficio de la supervivencia de *Elsholtzia splendens* bajo estrés de Cu. Sohn *et al.* (2003) encontraron que plantas de *Chrysanthemum morifolium* con aplicación de HMA acertó significativamente el tiempo de floración en comparación con los tratamientos sin HMA. Es probable que una sincronización en las defensas de la planta agilice una mayor producción de hormonas, esto hizo que genere mayor crecimiento de la planta.

Otro de los factores importantes a tener en cuenta en los mayores incrementos de los indicadores de crecimiento por ser un clon logrado a partir de propágulos vegetativos. Plantas de café clonadas a partir de propágulos vegetativos, debido a su tamaño del material vegetativo y su capacidad para fotosintetizar y consumir nutrientes (Grace 1993), pueden tener un mayor potencial que las semillas para una colonización y establecimiento exitosos (Boedeltje *et al.*, 2008). Según Carvalho *et al.* (2010), el número de ramas plagiotrópicas experimenta fuertes efectos ambientales debido a la interacción entre genotipo y medio ambiente.

Los factores ambientales juegan un papel importante en la micorrización, tanto es así que en plantas clonadas de caturra con aplicación de HMA procedente del Huallaga se obtuvieron un 48,20 cm para la longitud de micelio y colonización micorrízica de 64, 81 %, siendo la

humedad relativa superior al 67 % durante los meses de evaluación. Medina (2017), en la época seca se reportó la mayor longitud de micelio extraradical (43,64 cm/g suelo) y mayor número de esporas (158 esporas en 10 g/suelo seco); mientras el mayor porcentaje de colonización (17,86 %) se mostró en la época húmeda. Asimismo, la población de HMA posibilitaron una mejor adaptabilidad debido a un mejor nicho ecológico encontrado en la zona.

### **3.2.3. Estado nutricional en clones micorrizadas de café.**

#### **a) Contenido de nitrógeno y fósforo**

La coherencia entre el micelio y colonización del consorcio Huallaga, El Dorado y Moyobamba mejoro y retroalimenta N y P a las plantas de caturra y pache en campo; se conoce que estos dos nutrientes son esenciales para la simbiosis de micorrizas arbusculares (Kiers *et al.*, 2011 ; Fellbaum *et al.*, 2012 , 2014). Como se observa las plantas micorrizadas de café mostraron una mayor concentración de fósforo que los controles no micorrízicos (Figura 21). En el arroz colonizado por MA, aproximadamente el 70 % del Pi total adquirido es entregado por los hongos simbióticos (Yang *et al.*, 2012). Las plantas pueden aprovechar la simbiosis de MA para optimizar la adquisición de Pi. Casi todo el Pi absorbido por las plantas es aportado por HMA independientemente de la magnitud de la respuesta de crecimiento de la planta (Smith *et al.* 2004). Gracias a la red de hifas extrarradicales en el suelo, los HMA aumentan en gran medida el área de superficie absorbente (hasta 100 veces la de los pelos radiculares) extendiéndose mucho más allá de la zona de agotamiento del P (Javot *et al.*, 2007b).

#### **b) Índice de contenido de clorofila**

La clorofila de las hojas es un indicador clave del verdor de las hojas y, a menudo, se usa para investigar las deficiencias de nutrientes de las hojas y los cambios en la clorofila (Ali *et al.*, 2017). Se han informado correlaciones significativas entre el contenido de clorofila y el nitrógeno de las hojas en muchos cultivos agrícolas (Wang *et al.*, 2014 ; Kalacska, Lalonde y Moore, 2015). La clorofila no solo se usa como sustituto del contenido de nitrógeno de las hojas, sino también como un indicador esencial de la deficiencia de N en la agricultura (Cerovic *et al.*, 2012).

El índice de área foliar se había utilizado ampliamente como una variable biofísica de la vegetación para estimar los rendimientos y el crecimiento de los cultivos en modelos agrícolas (Huang *et al.*, 2015). También representa la capacidad de interceptar la radiación solar, que impulsa la asimilación de CO<sub>2</sub> y la acumulación de materia seca, y se considera un predictor importante del rendimiento potencial de grano (Huang *et al.*, 2016). La radiación solar adecuada favoreció la interceptación de la radiación por las hojas, lo que promovió la fotosíntesis de las hojas y aumentó aún más la biomasa aérea del cultivo de arroz (Liu *et al.*, 2019). Los componentes físicos del ambiente, como temperatura, niveles de CO<sub>2</sub>, radiación solar, etc., fueron favorables, puesto que no alteraron los procesos fisiológicos y metabólicos de las plantas; por lo tanto, las plantas de café micorrizadas tuvieron capacidad de adaptarse debido a un nicho ecológico favorable que se vio influenciado en el crecimiento del cafeto.

Aparentemente en nuestro estudio la clorofila evaluada corresponde a la clorofila a; ya que esta clorofila se ha utilizado para estudiar las respuestas fisiológicas de la planta del cafeto después de ataque de la roya, tal como lo indica (Toniutti *et al.*, 2017) quien realizó mediciones de la clorofila “a” en un estudio sobre la **influencia de las condiciones ambientales y los antecedentes genéticos del café arábica (*C. arabica* L.) en la roya de la hoja (*Hemileia vastatrix*)** donde demostró que bajo la sombra y suficiente fertilización con nitrógeno, la incidencia de la roya es muy baja ya que los componentes de la cadena de transporte de electrones parecen ser útiles indicadores del estado fisiológico de la planta de café y capaces de predecir la capacidad de la planta para resistir a la roya. Las micorrizas tienen efectos significativos sobre el crecimiento de las plantas. Sin embargo, la estabilidad del crecimiento es transitoria, probablemente debido a la competencia entre planta y hongo micorrízico por fotosintatos en los estadios iniciales de la infección en las raíces del cafeto, cuando el hongo consume carbono sin aportar aún beneficios, o bien cuando las condiciones para la fotosíntesis son subóptimas en cuanto a intensidad o calidad lumínica, temperatura, etc (Herrera-Corrales *et al.*, 2014).

### **3.2.4. Glomalina y catalasa en clones de café en las variedades de caturra y pache.**

#### **a) Contenido de glomalina**

Plantas clonadas de caturra con materia orgánica (MO) superior a 5 % presentaron los valores más altos en el contenido de glomalina, tal es el caso de pache sin HMA, caturra y pache con consorcio Moyobamba y plantas de caturra con aplicación de consorcio Huallaga

(Figura 23). Nuestros hallazgos fueron consistentes con Rillig *et al.* (2003 quienes demostraron que la glomalina era un componente significativo de las reservas de C y N del suelo. Asimismo, los resultados logrados evidencia que los HMA presentaron mayores contenidos en glomalina, esta teoría es fundamentada por Leifheit *et al.* (2014); donde indica que un servicio importante de los hongos MA en contextos naturales y agrícolas es la alteración beneficiosa de la estructura del suelo. Por lo tanto, la densa red de hifas del micelio fúngico AM altamente ramificado crea una matriz tridimensional que enreda y entrecruza las partículas del suelo sin compactar el suelo. Se identificó una glicoproteína del suelo como un agente adicional importante en la estabilización de los agregados del suelo (Rillig, 2004 ; Singh *et al.*, 2013). Ya que La agregación del suelo gobierna el agua, el contenido de nutrientes e intercambios gaseosos en el suelo (Rillig y Mummey 2006), glomalina podría desempeñar un papel crucial en la aireación del suelo y drenaje, absorción de nutrientes de las plantas y productividad (Nichols y Wright, 2004). La colonización por hongos AM, la densidad de esporas y la glomalina tienen una distribución espacial distinta patrón, que está influenciado por factores del suelo. Ureasa del suelo, El N disponible y el carbono orgánico son los principales factores del suelo que afectan la distribución de los hongos AM y la glomalina (Guo *et al.*, 2012). Por tanto, el patrón de distribución de Los hongos AM y la glomalina pueden ser útiles para monitorear la desertificación y la degradación del suelo.

#### **b) Contenido de catalasa**

Los resultados mostraron en sí que las actividades de la catalasa varían significativamente con aplicación de micorrízicos arbusculares; el mayor contenido de catalasa se encontró en el clon pache sin aplicación de HMA con 6,67 U/g (Figura 24). Algunos reportes indican que la actividad de CAT no muestra diferencia significativa, tal es así que Yang *et al.* (2015) indica que la actividad de CAT no mostró diferencia significativa entre las plantas micorrízicas y no micorrízicas de *Robinia pseudoacacia*.

Muchos de las investigaciones hacen mención que los HMA mejoran la actividad enzimática de la catalasa, al respecto Wang *et al.* (2021) observó que la catalasa fue 1.4 veces más altas en suelos co-incubados con lombrices de tierra y HMA que en suelos no inoculados; resultados contradictorios a lo encontrado en este estudio, donde se encontró mayor presencia de catalasa en suelos sin aplicación de micorrizas arbusculares (Fig. 24). Otra de las razones pudo haber sido que los HMA en los 10 meses no se pudieron haber adaptado

en su plenitud por el tiempo corto en su evaluación ya que la inoculación, el tiempo de recuperación y su interacción tienen efectos significativos sobre la actividad catalasa en los suelos; por lo tanto, las micorrizas autóctonas presentes en los suelos pudieron haber influenciado con mayor impacto. Esto se respalda con lo encontrado por Qiu *et al.* (2018), donde el inóculo de HMA exótica aumentó notablemente el promedio de catalasa en un 21,3 % en comparación con el control.

Sin embargo, los resultados obtenidos son contradictorios a otros estudios donde hacen mención que la actividad de producción de CAT en la planta inoculada es mayor que la de la planta no inoculada (Jiang *et al.*, 2016). Garg y Aggarwal (2012) observaron que la colonización de *Glomus mosseae* aumentó significativamente las actividades de CAT en *Cajanus cajan* cultivado en suelos contaminados con Cd y/o Pb. Plantas con aplicación de *Acaulospora mellea*, *Acaulospora* sp 1, *Acaulospora* sp 2., *Glomus macrocarpum* y *Glomus* sp2 tuvieron una mayor actividad de CAT que las plantas sin aplicación micorrizica, básicamente en el clon pache. Las actividades de CAT son altamente reguladas por las micorrizas arbusculares y dependen de la nutrición del P. La inducción de actividades de CAT se asoció con la mayor colonización y micelio del hongo micorrízico más infeccioso a contenido medio de P, lo que sugiere que los CAT pueden jugar un papel importante en la regulación del crecimiento fúngico intraradical de HMA es así que las actividades de CAT en las raíces dependieron del tratamiento con P.

La mayor expresión de esta enzima se da en micorrizas maduras (Marqués-Gálvez *et al.*, 2019), favoreciendo la adaptación de la planta huésped al déficit hídrico a través de diversos procesos, siendo la protección frente al daño oxidativo uno de ellos. En este sentido, diferentes estudios han reportado disminuciones en el contenido de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, generalmente correlacionadas con una inducción de la actividad catalasa, en raíces micorrízicas sometidas a estrés por sequía (Pedranzani *et al.* 2016 y Wu *et al.*, 2006). Patai *et al.* (2016), obtuvieron resultados similares donde mostraron que las actividades de CAT en las raíces también aumentaron en las plantas de *Lactuca sativa* inoculado con *Funneliformis mosseae*.

Asimismo, las raíces de las plantas de café micorrizadas estuvieron fuertemente colonizadas por los HMA (en comparación con el suelo y otros hábitats), debido al rico componente de nutrientes de los exudados de las raíces (Hashem *et al.*, 2016). A su vez, los microbios sintetizan compuestos biológicamente activos, que incluyen fitohormonas (auxinas,

citoquininas, giberelinas y ABA), compuestos antifúngicos, enzimas y solutos compatibles. Estos metabolitos microbianos juegan un papel vital en el crecimiento, la nutrición y el desarrollo de las plantas (Egamberdieva *et al.*, 2017a). La planta del cafeto podría obtener mayor eficiencia en la absorción de nutrientes, ya que promueve el crecimiento foliar e intensifica la tasa fotosintética y fortalece las condiciones propias de la planta para tolerar el estrés hídrico (Mejias y Palencia, 2005)

### **3.2.5. Correlación entre las procedencias de HMA y la patogenicidad del hongo *H. vastatrix* en clones de café en las variedades de caturra y pache.**

#### **Correlación de la colonización micorrízica y la incidencia y severidad a roya**

El patógeno *H. vastatrix* afecta las hojas vivas y provoca lesiones cloróticas en la parte inferior de las hojas. Esto reduce el área fotosintética y en ataques severos, puede ocurrir defoliación que lleve a la muerte de las ramas con grandes pérdidas para los agricultores. La incidencia y severidad a roya evaluada en hojas de café, muestra diferencias significativas en plantas clonadas de caturra y pache con aplicación de MA procedente del Huallaga con valores que van desde 18 a 14,3 %. Estos valores se obtuvieron con temperaturas entre 21.3 a 25 ° C en la zona de estudio. La temperatura óptima para la germinación de roya está entre 22 ° C y 24 ° C (de Jong *et al.*, 1987; Rozo *et al.*, 2012). *C. arabica* está sujeta a los ataques más severos con hasta un 30 % de pérdidas si no se controla la enfermedad (Rozo *et al.*, 2012).

La incidencia y severidad a roya disminuye a mayor longitud de micelio y colonización micorrízica tal como lo indica Herrera *et al.* (2019) al evaluar colonización micorrízica en muestras de suelos de plantas de café con y sin infección a roya. Muchos investigadores han demostrado la efectividad de los hongos AM contra muchas enfermedades de las plantas (Al-Ascar y Rashad, 2010; El-Sharkawy, 2010). En plantas de manzana, la inoculación de HMA redujo significativamente la cantidad de material vegetal infectado por el hongo patógeno *N. ditissima* en un promedio de 18 % en comparación con los árboles no inoculados (Bardeni, *et al.* 2018). Mustafa *et al.* (2016) demostró que la protección impartida por dos especies de HMA alcanzó el 74 % y el 34 %, respectivamente, en comparación con el control.

Plantas de café que no fueron inoculadas con micorrizas arbusculares, redujeron la exploración de nutrientes en el área a su vez quedaron a expensas de una diversidad de

microorganismos existente en el suelo. Para cualquier tipo de cultivo, la calidad y cantidad de nutrientes es un factor importante para asegurar un alto rendimiento y cultivos resistentes a plagas y condiciones ambientales desfavorables. Su disponibilidad está determinada por las características físicas, químicas y biológicas del suelo (Baba *et al.*, 2020), y su función principal es permitir las complejas interacciones entre plantas, animales, microorganismos y hongos. Debido a su importancia, la nutrición mineral puede determinar la resistencia contra varias enfermedades, incluida la roya (Spann y Schumann, 2010). Esto sumado a condiciones adversas donde se desarrolló el estudio fueron los que favorecieron la presencia de roya en plantones jóvenes, como es entendido la precipitación y la temperatura pueden aumentar la severidad de CLR causando altos grados de severidad (Haile, 2018; Talhinhos *et al.* 2017; Toniutti *et al.*, 2017). Se registró una incidencia de roya significativamente alta del 31,1 % (Yirga, 2020). Los clones de la variedad caturra mostro los mejores resultados en reducción de roya con aplicación del consorcio micorrizicos de Huallaga compuesto por las especies de *Acaulospora mellea*, *Acaulospora* sp1, *Acaulospora* sp 2., *Glomus macrocarpum* y *Glomus* sp2. Probablemente podría estar relacionado a la presencia de raíces para esta variedad ya que las plantas clonadas de caturra presentaron una mayor longitud y número de raíces con promedios de 2,68 cm y 4,5 en promedio evaluada a los 55 días en vivero (Vallejos-Torres *et al.*, 2020).

La colonización de raíces por hongos AM mejora la resistencia de la planta y desencadena numerosos mecanismos relacionados con la defensa de las plantas. Esta resistencia inducida por micorrizas está regulada por la vía de señalización dependiente del ácido jasmónico (Jung *et al.*, 2012. Se discutieron diferentes mecanismos físicos y fisiológicos en estos aspectos tales como lignificación de la pared celular vegetal, acumulación de varios compuestos antifúngicos (como compuestos fenólicos) y proteínas, que mejoran las reacciones de hipersensibilidad y la inducción de las enzimas relacionadas con la defensa (Abdel-Fattah 2011). Aunque los mecanismos no se comprenden completamente, la HMA puede afectar la resistencia a las enfermedades de la planta huésped a través de varias vías no excluyentes entre sí: (i) aliviar el estrés ambiental como la sequía (Augé, 2004 ; Bowles *et al.*, 2016), (ii) mejorar el huésped nutrición de las plantas y la salud posterior (Smith y Smith, 2011; Cavagnaro, 2014; Bowles *et al.* 2017a), (iii) preparando el sistema inmunológico de las plantas (Jung *et al.*, 2012), y (iv) mediante interacciones sinérgicas con rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas (Cameron *et al.*, 2013 ; Pérez-de-Luque *et al.*, 2017).

Mendonça *et al.* (2016) indican que, a pesar de su susceptibilidad a la roya, los clones 1059, 1064 y 760 mostraron enfermedad de menor gravedad y densidad de lesiones por roya, lo que sugiere la aparición de resistencia incompleta, probablemente debido a la herencia poligénica del rasgo. Aunque la resistencia de las plantas está controlada genéticamente, el medio ambiente y, en particular, las prácticas culturales pueden afectar la tolerancia o resistencia de las plantas a los patógenos al afectar la fisiología de las plantas, el patógeno o ambos (Dordas, 2008). Toniutti *et al.* (2017) observaron que la cantidad de esporas de roya producidas por área foliar infectada fue siempre significativamente menor en los híbridos de café que en la línea endogámica Caturra solo cuando las plantas de café se cultivaron bajo alta intensidad de luz y baja fertilización con nitrógeno. Estos resultados resaltan la superioridad de los híbridos con respecto a la roya en los sistemas agroforestales, debido a que tanto la penetración/colonización del tejido huésped como la intensidad de la esporulación son limitadas.

Aunque los mecanismos de defensa en el huésped deben atenuarse para permitir la infección por hongos MA y la colonización de las raíces, la defensa general debe permanecer activa para hacer frente a los patógenos rizosféricos. En contraste, las plantas de micorrizas a menudo exhiben una mayor resistencia a las enfermedades (Borowicz, 2001; Pozo y Azcon-Aguilar, 2007; Jung *et al.*, 2012; Cameron *et al.*, 2013). Además, las plantas de micorrizas pueden prepararse para reaccionar más rápido y con más fuerza al ataque de patógenos, un fenómeno conocido como resistencia sistémica inducida (ISR) o cebado (Conrath *et al.*, 2006). Estos efectos protectores de la MA son de gran interés para las estrategias sostenibles de protección vegetal (Solaiman *et al.*, 2014). Además, los hongos AM, u otros microbios asociados con su micelio, pueden interferir directamente con los patógenos rizosféricos, ya sea por la liberación de compuestos antimicrobianos o por la competencia directa por el espacio y los recursos.

Muchos de los autores han mencionado la importancia de emplear plantas jóvenes de café obtenidas por propagación vegetativa con tolerancia a roya, especialmente de la variedad caturra, tal es el caso de Toniutti *et al.* (2017) donde la esporulación de roya fue significativamente menor en plantas obtenidas por propagadas vegetativamente que plantones obtenidas por semilla de la variedad caturra; si bien es cierto que esta variedad es susceptible a la roya sin embargo tiene lta calidad de taza (Estrella *et al.*, 2017). Por lo tanto la interacción de dos componentes en un cultivo de café en base al empleo de plantas

de café tolerantes a roya y su aplicación de micorrizas arbusculares podría ser una alternativa viable para la caficultura como potencial en el desarrollo morfológico y sanidad; básicamente en la reducción de roya tal como se muestra en estos resultados donde la variedad caturra con aplicación de HMA fueron las que mostraron los mejores resultados en reducción e incidencia a roya; resultados similares lo muestra Vallejos-Torres *et al.* (2021); donde plantas jóvenes de café de la variedad caturra inoculadas con HMA han mostrado mejor desarrollo en el aspecto morfológico y biométrico y mostraron mayor resistencia a la infección de la roya.

Varios estudios han señalado que las comunidades de HMA que ocurren en diferentes ecosistemas tienen diferente composición de las especies (Öpik *et al.*, 2006 ; Zhao *et al.*, 2017 ), En nuestro estudio se encontró diferentes especies para el cultivo de café colectado en las provincias de El Dorado, Moyobamba y el Huallaga (Tabla 3), influenciado por el medio ambiente, la competencia entre especies y dinámicas espaciales regionales (Lekberg *et al.*, 2007 ). A su vez se pudo notar que cada uno de esas especies mostraron una estructura compacta y completa tanto como hifas, vesículas y arbusculos (Anexo 1 y 2) quienes mostraron eficiencia en el crecimiento del café y mayor nutrición traduciéndose esto en una reducción de la incidencia y severidad a roya (Fig. 25 y 26); lo que no sucedió con las especies autóctonas que mostraron mayor eficiencia para la catalasa, por lo tanto, mayor protección de enfermedades en el sistema radicular del café ya que los HMA influyen en los factores bióticos (Chaudhary *et al.*, 2008 ).

Asimismo, los HMA estuvieron adaptados a un ambiente diferente a la ubicación del estudio, sin embargo; esto pudo haber afectado en su plenitud para una buena colonización y micelio extraradicular ya que es conocido que las fluctuaciones estacionales como los patrones de lluvia (Alguacil *et al.* 2015 ) y la temperatura (Dumbrell *et al.*, 2011 ) influyen en el desarrollo de HMA en el suelo. Los niveles de N disponible (Velázquez *et al.*, 2018 ), P (Zhao *et al.*, 2017 ), el pH del suelo (Melo *et al.*, 2017 ) , humedad del suelo (Deepika y Kothamasi 2015 ) y la materia orgánica (MO) (Wang *et al.*, 2015 ) pueden influir en las comunidades y estructuras de los HMA. Sin embargo, el uso de las micorrizas autóctonas mostraron mayores efectos en la presencia de la catalasa (Figura 24). Es conocido que el uso de micorrizas nativas o autóctonas del suelo puede beneficiar a los programas de restauración, al mejorar la nutrición y el rendimiento de las plantas bajo estrés ambiental y facilitar la adaptación de las plantas tanto en el vivero como en el campo (Maltz y

Treseder 2015 ). La selección de HMA apropiados y la producción de inóculos locales, en cantidad y calidad suficientes, son cuestiones críticas para su aplicación en la agricultura, porque los aislamientos de HMA nativos parecen estar fisiológica y genéticamente adaptados a las condiciones de estrés del entorno objetivo y a su hospedador nativo (de Oliveira *et al.*, 2017).

## CONCLUSIONES

- El estudio ha demostrado parcialmente la importancia que tienen los consorcios de HMA, debido a su efecto positivo sobre el crecimiento en plantas de café en campo; tal como lo demuestra este estudio realizado a nivel de campo por un periodo de 10 meses.
- A nivel de área foliar, las plantas de café inoculadas con hongos micorrízicos arbusculares mostraron los mejores incrementos de clorofila tradiciéndose en mayor área verde con capacidad para realizar fotosíntesis por lo tanto promoverá el rendimiento del café. Sin embargo, los contenidos de fósforo y nitrógeno no mostraron efectos significativos en las plantas micorrizadas y no micorrizadas de caturra y pache.
- La glomalina en café depende, entre otras condiciones, de los clones de las variedades de caturra y pache y la aplicación micorrízica. Por tanto, el patrón de distribución de los hongos AM y la glomalina pueden ser útiles para monitorear la desertificación y la degradación del suelo.
- Se encontró mayor presencia de catalasa en suelos sin aplicación de micorrizas arbusculares, probablemente se deba al corto periodo de evaluación (10 meses) ya que los HMA no tienen que adaptarse en mayor tiempo. Otra de las causas se debió a que los HMA autoctonos presentan mejor respuesta en catalasa por estar adaptadas a la zona.
- El estudio también ha demostrado el efecto bioprotector de los consorcios de Hongos HMA, debido a su efecto positivo sobre la reducción de la incidencia y severidad a roya. Dicha efectividad estuvo en función a la procedencia de los consorcios micorrízicos, pudiendo identificar dentro de ellos los HMA procedentes del Huallaga. Se puede notar claramente que los consorcios Huallaga y Moyobamba muestra cierta tendencia de ser un bioprotector contra la roya amarilla del café y repotenciadores del crecimiento morfológico del café. Se observa reducción en la incidencia a roya en plantas de café tanto en caturra como en pache.

La conservación de estos consorcios Micorrízicos es fundamental, pues promueve el crecimiento de plantas de café en campo mediante una buena colonización de raíces de café.

El desarrollo de estrategias para mejorar la durabilidad de la resistencia a la roya en cultivares de arábica basada en mecanismos genéticos que combinan genes de resistencia parcial y completa junto con prácticas culturales apropiadas, puede ser la mejor manera de controlar esta enfermedad.

## RECOMENDACIONES

- Profundizar en las investigaciones sobre la caracterización genética de los HMA antes y después del estudio, puesto que existe la probabilidad de que algunas especies inoculadas en plantones de café no hayan inoculado y se hayan perdido.
- Profundizar en las investigaciones sobre la caracterización genética de las razas de *Hemileia vastatrix*, puesto que esto nos ayudaría a determinar que razas de hongos están presentes en cada variedad de café estudiada.
- Continuar el estudio considerando parámetros como estrés en los vegetales, enzimas antioxidantes, sistemas antioxidantes no enzimáticos, microbios productores de fitohormonas asociados a la raíz, el papel de las fitohormonas en la respuesta de las plantas al estrés abiótico y producción de especies reactivas de oxígeno.
- Considerando los antecedentes en este tema, y fortaleciendo alguna hipótesis en esta tesis como el caso de los nutrientes, a partir de los resultados obtenidos, se propone realizar una profundización en la investigación sobre el rol de los HMA en los fertilizantes a nivel foliar y suelo. Para ello es necesario considerar más repeticiones en la caracterización de los suelos para cada tratamiento en estudio.
- Estudiar los efectos de la inoculación con hongos MA para el rendimiento de granos de café propagados por semilla biológica y semilla vegetativa, ampliándose el ámbito geográfico de estudio y mayor tiempo posible.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achuba FI, Peretiemo-Clarke, B.O. (2008) Efecto del aceite de motor gastado en las actividades de catalasa y deshidrogenasa del suelo. *Int Agrophys* 22: 1–4.
- Abdel-Fattah, G.M., El-Haddad, S.A., Hafez, E.E. y Rashad, Y.M. (2011). Induction of defense responses in common bean plant by arbuscular mycorrhizal fungi, *Microbiol. Res.* 166, 268-281.
- Ajithkumar, I. P. & Panneerselvam, R. (2014). ROS scavenging system, osmotic maintenance, pigment and growth status of *Panicum sumatrense* roth under drought stress. *Cell Biochem. Biophys.* 68 (3):587-595.
- Allen, R.D. (1995). Dissection of oxidative stress tolerance using transgenic plants. *Plant Physiol.* 107: 1047-1054.
- Al-Areqi, A. H., M. Chliyeh., A. Ouazzani, R. Benkirane y A. Douira, (2014). *Effect of a composite endomycorrhizal inoculum on the growth of Coffea arabica seedlings.* International journal of plant, animal and environmental sciences, 4(1), 185-194.
- Al-Ascar, A.A. y Rashad, Y.M. (2010). Arbuscular mycorrhizal fungi: a biocontrol agent against common vean Fusarium root rot disease, *Plant Pathol, J.* 9,31-38.
- Aldrich-Wolfe, L., Black, K.L., Hartmann, E.D.L. *et al.* (2020). Taxonomic shifts in arbuscular mycorrhizal fungal communities with shade and soil nitrogen across conventionally managed and organic coffee agroecosystems. *Mycorrhiza* 30, 513–527 <https://doi.org/10.1007/s00572-020-00967-7>
- Alef K, Nannipieri P, (1995). Catalase activity. In: *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry.* London: Academic Press. 362–363.
- Alguacil M d M, Díaz-Pereira E, Caravaca F et al (2009) Aumento de la diversidad de hongos micorrízicos arbusculares en un experimento de campo a largo plazo mediante la aplicación de enmiendas orgánicas a un suelo degradado semiárido. *Appl Environ Microbiol* 75: 4254–4263. <https://doi.org/10.1128/AEM.00316-09>
- Ali et al. (2017) Ali MM, Al-Ani A, Eamus D, Tan DKY. Leaf nitrogen determination using non-destructive techniques—a review. *Journal of Plant Nutrition.* 2017;40(7):928–953. doi: 10.1080/01904167.2016.114395.
- Altamirano J. (2012). Influencia de la variabilidad climática sobre la producción de café (*Coffea arabica* L.) en Honduras. Tesis MsSc. CATIE Turrialba, Costa Rica. 108p.
- Alvarado, J.W. (2002). Efecto de los contaminantes atmosféricos en los cultivos agrícolas. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia, España

- Araujo JP, Quiquampoix H, Staunton, S. (2015). Proteína del suelo relacionada con glomalina en suelos de bosques templados franceses: interferencia en el ensayo de Bradford causada por sustancias húmicas coextraídas. *Eur J Soils Sci* 66: 311–319.
- Augé, R.M. (2004). Micorrizas arbusculares y relaciones suelo / agua de la planta. *Lata. J. Soil Sci.* 84, 373–381. doi: 10.4141 / S04-002.
- Avelino J, Cristancho M, Georgiou S, Imbach P, Aguilar L, Bornemann G, Läderach P, Anzueto F, Hruska AJ, Morales, C. (2015). The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Sec* 7:303-321. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0446-9>.
- Avelino, J., Willocquet, L. y Savary, S. (2004). Effects of crop management patterns on coffee rust epidemics. *Plant Pathology* (2004) 53, 541–547.
- Baba, V.Y., et al. (2020). Transcriptional patterns of *Coffea arabica* L. nitrate reductase, glutamine and asparagine synthetase genes are modulated under nitrogen suppression and coffee leaf rust. *PeerJ* <https://doi.org/10.7717/peerj.8320>.
- Bannister, J.V., Bannister, W.H., Rotilio, G. (1987). Aspects of the structure, function, and applications of superoxide dismutase. *CRC. Crit. Rev. Biochem.* 22: 111-180.
- Bauer S. E., Tsigaridis K., Miller R. (2016). Significant atmospheric aerosol pollution caused by world food cultivation. *Geophys. Res. Lett.* 43 5394–5400. [10.1002/2016GL068354](https://doi.org/10.1002/2016GL068354) [CrossRef] [Google Scholar]
- Belitz H-D, Grosch W, Schieberle, P. (2009). Coffee, tea, cocoa. In: *Food Chemistry*. Third revised edn. Springer, pp 938-970.
- Berdeni, D., Cotton, T., Daniell, T.J., Bidartondo, M.I., Cameron, D.D. y Evans, K.L. (2018). Los efectos de la colonización por hongos micorrízicos arbusculares sobre el estado de los nutrientes, el crecimiento, la productividad y la resistencia al cancro de la manzana (*Malus pumila*). *Frontiers in microbiology*, 9, 1461. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01461>.
- Bhattacharya, S.; Bagyaraj, D.J. (2002). Effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungal isolates on arabica coffee (*Coffea arabica* L.). *Biological Agriculture & Horticulture*, 20(2):125-131.
- Boedeltje, G., Ozinga, W.A., and Prinzing, A. (2008). The trade.off between vegetative and generative reproduction among angiosperms influences regional hydrochorous propagule pressure. *Global Ecology and Biogeography*, 17, 50-58.
- Borie, F., Rubio, R., Morales, A. (2008). Hongos micorrízicos arbusculares y agregación del suelo. *J Sci Sci Plant Nutr* 8: 9–18.

- Boyer, J.S. (1982). Plant productivity and environment. *Science* 218: 443-448. Doi: 10.1126/science.218.4571.443.
- Boyer JS. (1995). Measuring the water status of plants and soil. Delaware (U. S. A.): Academic Press Inc. p. 178.
- Borowicz V. A. (2001). Do arbuscular mycorrhizal fungi alter plant-pathogen relations? *Ecology* 82 3057–3068.
- Bowles, T.M., Barrios-Masias, F.H., Carlisle, E.A., Cavagnaro, T.R. y Jackson, L.E. (2016). Efectos de las micorrizas arbusculares sobre el rendimiento del tomate, la absorción de nutrientes, las relaciones hídricas y la dinámica del carbono del suelo bajo riego deficitario en condiciones de campo. *Sci. Entorno total*. 566–567, 1223–1234. doi: 10.1016 / j.scitotenv.2016.05.178.
- Bowles, T.M., Jackson, L.E., Loehrer, M., and Cavagnaro, T.R. (2017b). Ecological intensification and arbuscular mycorrhizas: a meta-analysis of tillage and cover crop effects. *J. Appl. Ecol.* 54, 1785–1793. doi: 10.1111/1365-2664.12815
- Bowles, T.M, Jackson, L.E y Cavagnaro, T.R. (2017a). Los hongos micorrízicos mejoran la adquisición de nutrientes de las plantas y modulan la pérdida de nitrógeno con regímenes de agua variables. *Glob. Cambiar Biol.* 24, 171–182. doi: 10.1111 / gcb.13884.
- Bray, E.A., J. Bailey-Serres and E. Weretilnyk. (2000). Responses to abiotic stresses. *In: Gruissem, W., B. Buchannan and R. Jones (eds.). Biochemistry and molecular biology of plants.* American Society of Plant Physiologists. Rockville, MD, USA. pp 1158
- Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T., Malajczuck, N. (1996). Working whit mycorrhizas in forestry and agriculture. Camberra, Australia: ACIAR. 374 p.
- Burns R G. (1978) Enzymatic activity in soil: some theoretical and practical considerations, pp 295-340. In *Soil Enzymes*. Ed. R G Burns. Academic Press, N. Y. 380 p.
- Bücking, H., and A. Kafle. (2015). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in the nitrogen uptake of plants: current knowledge and research gaps. *Agronomy* 5:587-612.
- Cadena, G. (1982). Diseminacion de *Hemileia vastatrix* Berk. In. Federacion Nacional de Cafeteros de Colombia. Taller de Roya del Cafeto *H. vastatrix*. Colombia 12-17 abril. Chinchina. Centro Nacional de Investigaciones de Café. CENICAFE.
- Cambrony, H. (1992). Coffee growing. Macmillan Press Ltd.
- Camargo, Â.P. de: “Florescimento e frutificação de café arábica nas diferentes regiões (cafeeiras) do Brasil”, *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 20(7): 831-839, 1985, ISSN: 1678-3921.

- Cannell, M. (1985). Physiology of the coffee crop. In: Clifford MN, Willson KC (eds) Coffee: Botany, Biochemistry and Production of beans and beverage. Croom Helm Ltd, London, pp 108 – 134.
- Capucho, A.S, Zambolim, L., Cabral, P.G.C., Maciel-Zambolim, E., Caixeta, E.T. (2013a) Favorecimiento climático a la roya de la hoja en el café Conilon. Austral Plant Pathol 24: 511–514.
- Carballar, S. (2009). *Variación temporal de la diversidad de hongos de micorriza arbuscular y el potencial micorrízico en especies silvestres de Agave en Oaxaca*, Tesis de Magister, Dpto. Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales, Instituto Politécnico Nacional (IPN), Oaxaca, México.
- Carvalho, A.M., Mendes A.N.G., Carvalho G.R., Botelho, C.E., Gonçalves, F.M.A., Ferreira, A.D. (2010) Correlação entre crescimento e produtividade de cultivares de café em diferentes regiões de Minas Gerais, Brasil. Pesq Agropec Bras. 45:269-275.
- Castilla, N., Baeza, E.J., Papadopoulos, A.P. (2013). Greenhouse technology and management. CABI Publishing. 2a ed. 360p.
- Castanheira, D.T.; Alecrim, A. De O. Voltolini, G. B.; Rezende, T. T.; Netto, P. M.; Guimarães, R. J. (2019). Growth, anatomy and physiology of coffee plants intoxicated by the herbicide glyphosate. Coffee Science - ISSN 1984-3909, v. 14, n. 1, p. 76 – 82.
- Cavagnaro, T.R. (2014). Impactos de la aplicación de compost en la formación y funcionamiento de micorrizas arbusculares. *Soil Biol. Biochem.* 78, 38–44. doi: 10.1016 / j.soilbio.2014.07.007.
- Chaudhary VB, Lau MK, Johnson NC (2008) Macroecología de microbios: biogeografía de Glomeromycota. Micorrizas. Springer, In, págs. 529–563
- Cho, S.T., Chang, H.H., Egamberdieva, D., Kamilova, F., Lugtenberg, B. y Kuo, C.H (2015). Análisis del genoma de *Pseudomonas fluorescens* PCL1751: una rizobacteria que controla las enfermedades de las raíces y alivia el estrés salino de su planta huésped. *PLOS ONE* 10: e0140231. doi: 10.1371 / journal.pone.0140231
- Cheng Y., Ishimoto K., Kuriyama Y., Osaki M. y Ezawa T. (2013). La aplicación de fertilizante de fósforo durante noventa años, pero no solo, tiene un impacto importante en las comunidades de hongos micorrízicos arbusculares . *Plant Soil* 365 , 397–407
- Cerovic et al. (2012). Cerovic ZG, Masdoumier G, Ghazlen NB, Latouche G. A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids. *Physiologia Plantarum.* 2012;146(3):251–260. doi: 10.1111/j.1399-3054.2012.01639.x.

- Cisneros Prego, Elio. (1995). La glutatión reductasa y su importancia biomédica. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 14(1) Recuperado en 07 de diciembre de 2020, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-03001995000100003&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03001995000100003&lng=es&tlng=es).
- Conrath U., Beckers G. J.M., Flors V., -Agustin P., Jakab G., Mauch F., et al. (2006). Priming: getting ready for battle. *Mol. Plant-Microbe Interact.* 19 1062–1071. 10.1094/MPMI-19-1062.
- Coste, R., Cambrony, H., Tindall, H. (1992). Coffee: the plant and the product. Macmillan London, (ISBN)0333572963 (pbk): (OCoLC)27482536.
- Covre, A.M., Rodrigues, W.P., Vieira, H.D., Braun, H., Ramalho, J.C., & Partelli, F.L. (2016). Nutrient accumulation in bean and fruit from irrigated and non-irrigated *Coffea canephora* cv. Conilon. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 28(6), 402-409. DOI: 10.9755/ejfa.2016-04-341.
- Covre, A.M., Partelli, F.L., Bonomo, R., & Gontijo, I. (2018). Micronutrients in the fruits and leaves of irrigated and non-irrigated coffee plants. *Journal of Plant Nutrition*, 41(9), 1119-1129. DOI: 10.1080/01904167.2018.1431665.
- Cramer, G.R., K. Urano, S. Delrot, M. Pezzotti and K. Shinozaki. (2011). Effects of abiotic stress on plants: a systems biology perspective. *BMC Plant Biology* 11: 163. Doi: 10.1186/1471-2229-11-163
- Cruz, Y., García, M., León, Y., & Acosta, Y. (2014). Influence the application of arbuscular mycorrhiza and the reduction of mineral fertilizer in tobacco seedlings. *Cultivos Tropicales*, 35(1), 21-24. Recuperado en 22 de septiembre de 2020, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362014000100003&lng=es&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362014000100003&lng=es&tlng=en).
- DaMatta, F.M. (2004). Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Res* 86:99-114
- DaMatta, F.M, Ramalho, J.D.C. (2006). Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. *Braz J Plant Physiol*;18:55–81.
- Davis, A.P., Gole, T.W., Baena, S., Moat, J. (2012). The impact of climate change on indigenous Arabica coffee (*Coffea arabica* L.): predicting future trends and identifying priorities. *PLoS One* 7:1 – 13
- Deepika S, Kothamasi D (2015) Humedad del suelo: un regulador del ensamblaje de la comunidad de hongos micorrízicos arbusculares y la absorción simbiótica de fósforo. *Mycorrhiza* 25: 67–75. <https://doi.org/10.1007/s00572-014-0596-1>

- de Novais CB, Pepe A, Siqueira JO et al (2017) Compatibilidad e incompatibilidad en anastomosis hifas de hongos micorrízicos arbusculares. *Sci Agric* 74: 411–416. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2016-0243>
- de Jong E.J., Eskes, A.B., Hoogstraten J.G.J., Zadoks, J.C. (1987). Temperature requirements for germination, germ tube growth and appressorium formation of urediospores of *Hemileia vastatrix*. *Neth. J. Plant Pathol.* 93 61–71. 10.1007/BF01998091.
- del Mar Alguacil M., Torres MP, Montesinos-Navarro A. & Roldán A. (2016). Características del suelo que impulsan comunidades de hongos micorrízicos arbusculares en suelos mediterráneos semiáridos. *Apl. Reinar. Microbiol.* 82, 3348–3356.
- Del Águila, K.M., G. Vallejos-Torres y otros dos autores, (2018). Inoculación de consorcios micorrízicos arbusculares en *Coffea arabica*, variedad Caturra en la región San Martín, doi: 10.4067/S0718-07642018000100137, Información Tecnológica, 29(1), 137-146.
- Delgado-Roche L, Martínez-Sánchez G. Nuevos enfoques sobre la función de las lipoproteínas plasmáticas en las enfermedades de origen aterotrombótico. *Rev Cubana Farm* [Internet]. 2010; [citado 2012 Oct 22] 44(2): 245-258. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-75152010000200013&lng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75152010000200013&lng=es).
- Dordas, C. (2008). Papel de los nutrientes en el control de enfermedades de las plantas en la agricultura sostenible. Una revisión. *Agron. Sostener. Dev.* 28 33–46. 10.1051 / agro: 2007051.
- Dumbrell AJ, Ashton PD, Aziz N et al (2011) Distintos conjuntos estacionales de hongos micorrízicos arbusculares revelados por pirosecuenciación masivamente paralela. *New Phytol* 190: 794–804. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03636.x>
- Durán, P., Viscardi, S., Acuña, J.J., Cornejo, P., Azcón, R., de la Luz Mora, M. (2018). Endophytic selenobacteria and arbuscular mycorrhizal fungus for selenium biofortification and *Gaeumannomyces graminis* biocontrol. *J Soil Sci Plant Nutr* 18:1021-1035. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162018005002902>
- Duicela, L.A. (2015). Uso de fungicidas sistémicos en el control de la roya del café (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) en la provincia de Manabí. Universidad Estatal del Sur de Manabí Jipijapa. Revista la Técnica. Manabí, Ecuador pp. 6 – 17.
- Edward, W. et al., (2005). FAO Arabica coffee manual for Myanmar.

- Egamberdieva, D., Wirth, S., Behrendt, U., Parvaiz, A. y Berg, G. (2017a). La actividad antimicrobiana de las plantas medicinales se correlaciona con la proporción de endófitos antagonistas. *Frente. Microbiol.* 8: 199. doi: 10.3389 / fmicb.2017.00199
- El Cafetalero. (2013). *Plaga de la roya afectó al 43% del área cafetalera peruana*. Junta Nacional del Café. Año 11 No. 43. Marzo, 2013.
- El-Sharkawy, H.H.A. (2010). Control of Wilt Disease of Tomato through Application Natural Compost and Endomicorrhizal Fungy, PH.D. Thesis Faculty of Agriculture, Mansoura University, Egypt.
- Estrella, L., Vallejos-Torres, G. y Arevalo, L.A. (2017). Sensory analysis of four cultivars of coffee (*Coffea arabica* L.), grown at different altitudes in the San Martin region – Peru. *Ciênc. rural (Online)* ; 47(9): e20160882, 2017.
- Fahl, J., Carelli, M., Vega, J., Magalhães, A. (1994). Nitrogen and irradiance levels affecting net photosynthesis and growth of young coffee plants (*Coffea arabica* L.). *J Hort Sci* 69:161-170
- Fellbaum, C.R., Gachomo, E.W. Beesetty, Y., Choudhari, S., Strahan, G.D., Pfeffer, P.E., Kiers, E.T., Bucking, H. (2012). Carbon availability triggers fungal nitrogen uptake and transport in arbuscular mycorrhizal symbiosis *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 109, pp. 2666-2671.
- Fernández, N., Martínez, I.G., Cedeño, M.E. (2012). Función del peróxido de hidrógeno en el vitíligo. *Rev Cubana Farm [Internet]*. 2010 [citado 22 Oct 2012 ]; 44(3): 390-402. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-75152010000300014&lng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75152010000300014&lng=es).
- Fischersworing, H.B., Robkamp R, R. (2001). Guía para la caficultura ecológica. 3. ed. Popayán, GTZ. 152 p.
- Foley J. A., Ramankutty N., Brauman K. A., Cassidy E. S., Gerber J. S., Johnston M., et al. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478 337–342. 10.1038/nature10452 [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]
- Galindo, V. R.X. (2011). Producción e Industrialización de Café Soluble Caso: Solubles instantáneos. Tesis Economista. Universidad de Guayaquil Facultad de Ciencias Económicas. Guayaquil, Ecuador. 96p.
- Gao. W., Wang, P., Wu, Q. (2019). Funciones y aplicación de proteínas del suelo relacionadas con glomalina: una revisión. *Sains Malaysiana* 48 (1): 111-119. <https://doi.org/10.17576/jsm-2019-4801-13>

- García, C. P., y Barreto, O.D. (2007). Propuesta para el Incremento de Consumo de Café Tostado de los asociados de la Junta Nacional del Café. Tesis Maestría. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Escuela de Postgrado. Lima, Perú. 158p.
- García-Gil. P.C., Soler-Rovira, P., Polo, A. (2000). Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*. 32, 1907-1913.
- Garg, N. & Aggarwal, N. (2012). Effect of mycorrhizal inoculations on heavy metal uptake and stress alleviation of *Cajanus cajan* (L.) Millsp. Genotypes grown in cadmium and lead contaminated soils. *Plant Growth Regul.* 66, 9–26.
- Gerdemann, J.W. y T.H. Nicolson, (1963). *Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting*. *Trans. Brit. Mycol. Soc.* 46(2), 235-244.
- Gill, S.S., Tuteja, N. (2010), Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants, *Plant Physiology and Biochemistry*, Volume 48, Issue 12, Pages 909-930, ISSN 0981-9428, doi: 10.1016/j.plaphy.2010.08.016.
- Grace, J.B. (1993). The adaptive significance of clonal reproduction in angiosperms: an aquatic perspective. *Aquatic Botany*, 44, 159 – 180.
- Gianfreda L, Bollag J M, (1996). Influence of natural and anthropogenic factors on enzyme activity in soil. In: *Soil Biochemistry* (Stotzky G, Bollag J M, eds.). New York: Marcel Dekker. 123–193.
- Gianinazzi. S., Gollotte, A., Binet, M.N., van Tuinen, D., Redecker, D., Wipf, D. (2010). Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza* 20: 519–530.
- Guo, H., He, X.L., Li, Y.P. (2012). Distribución espacial de micorrizas arbusculares y glomalina en la rizosfera de *Caragana korshinskii* Kom. en la tierra arenosa de Otindag, China. *Afr J Microbiol Res* 6: 5745–5753.
- Halliwell, B. and Gutteridge, J.M. (1985). *Free radicals in Biology and Medicine*. Clarendon Press, Oxford.
- Hashem, A., Abd\_Allah, EF, Alqarawi, A., Al-Huqail, AA, Wirth, S. y Egamberdieva, D. (2016). La interacción entre los hongos micorrízicos arbusculares y las bacterias endofíticas mejora el crecimiento de las plantas de *Acacia gerrardii* bajo estrés salino. *Frente. Plant Sci.* 7: 1089. doi: 10.3389 / fmicb.2016.01089
- Hazard C. et al. (2013). El papel del entorno local y la distancia geográfica en la determinación de la composición de la comunidad de hongos micorrízicos arbusculares a escala de paisaje. *ISME J.* 7 , 498–508.

- Helgason, T, and Fitter, A.H. (2009). Natural selection and the evolutionary ecology of the arbuscular mycorrhizal fungi (Phylum Glomeromycota) *J Exp Bot.* 60:2465–2480.
- Herrera, S., Castro, R., Moreno, J.P., Valdés, E. (2019). Diversidad endomicorrícica en plantas de café (*Coffea arabica* L.) infestadas con roya (*Hemileia vastatrix*). *Nova scientia*, 11(22), 102-123. <https://doi.org/10.21640/ns.v11i22.1642>
- Herrera-Corrales, Laura C, Ospina-Alzate, David F, & Ocampo-Jiménez, Omar. (2014). Efecto de gremios de hongos micorrícicos arbusculares aislados de un ambiente desértico sobre el crecimiento de frijol *Phaseolus vulgaris* bajo una condición de déficit hídrico. *Actualidades Biológicas*, 36(100), 63-72. Retrieved August 02, 2021, from [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0304-35842014000100008&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-35842014000100008&lng=en&tlng=es).
- Hiroshi, G., Sera, T., Batista I, Shiguer, D. (2009) Resistance to leaf rust in coffee cultivars. *Coffee Sci* 5:59–66.
- Horton, P. (2017). We need radical change in how we produce and consume food. *Food Secur.* 9 1323–1327. 10.1007/s12571-017-0740-9 [CrossRef] [Google Scholar]
- Huang, et al. (2016) Huang J, Sedano F, Huang Y, Ma H, Li X, Liang S, Tian L, Zhang X, Fan J, Wu W. Assimilating a synthetic Kalman filter leaf area index series into the WOFOST model to improve regional winter wheat yield estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2016;216:188–202. doi: 10.1016/j.agrformet.2015.10.013.
- Huang, et al. (2015) Huang J, Tian L, Liang S, Ma H, Becker-Reshef I, Huang Y, Su W, Zhang X, Zhu D, Wu W. Improving winter wheat yield estimation by assimilation of the leaf area index from Landsat TM and MODIS data into the WOFOST model. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2015;204:106–121. doi: 10.1016/j.agrformet.2015.02.001.
- Instituto de Cultivos tropicales. (2020). Análisis foliar. Certificado INDECOPI 00072183. San Martín, Perú.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate change 2007. In: Pachauri, R. K. and A. Reisinger. (eds.). Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* IPCC. Geneva, Switzerland. 104 p.
- INVAM, (2017). International Culture collection of (Vesicular) Arbuscular Micorrhizal Fungi. Date: January 2017. <https://invam.wvu.edu>.
- Jansa, J., Bukovská, P., Gryndler, M. (2013) Mycorrhizal hyphae as ecological niche for highly specialized hypersymbionts - or just soil free-riders? *Frontiers Plant Sci* 4:134 <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00134>

- Javot, H., Pumplin, N., Harrison, M.J. (2007b). Phosphate in the arbuscular mycorrhizal symbiosis: transport properties and regulatory roles. *Plant, Cell & Environment* 30: 310–322.
- Jaramillo-Botero, C., R.H.S. Santos., H.E.P. Martinez., P.R. Cecon, and M. P. Fardin. (2010). Production and vegetative growth of coffee trees under fertilization and shade levels. *Scientia Agricola* 67: 639–645.
- Jiang, Q., Zhuo, F., Long, S. y col. (2016). ¿Pueden los hongos micorrízicos arbusculares reducir la absorción de Cd y aliviar la toxicidad del Cd de *Lonicera japonica* cultivada en suelos con Cd añadido? *Sci Rep* 6, 21805. <https://doi.org/10.1038/srep21805>.
- Kalacska, Lalonde & Moore. (2015). Kalacska M, Lalonde M, Moore TR. Estimation of foliar chlorophyll and nitrogen content in an ombrotrophic bog from hyperspectral data: scaling from leaf to image. *Remote Sensing of Environment*. 2015;169:270–279. doi: 10.1016/j.rse.2015.08.012.
- Kiers, E.T., Duhamel, M., Beesetty, Y., Mensah, J.A., Franken, O., Verbruggen, E., Fellbaum, C.R., Kowalchuk, G.A., Hart, M.M., Bago, A., et al. (2011). Reciprocal rewards stabilize cooperation in the mycorrhizal symbiosis *Science*, 333, pp. 880-882
- Kushalappa, A.C., Chaves, G.M. (1980). Un análisis del desarrollo de la roya del café en el campo. *Sujetadores Fitopatol* 5: 95–183.
- Kumar, S., Singh, A.K., Ghosh, P. (2018). Distribución del carbono orgánico del suelo y la proteína del suelo relacionada con la glomalina en una cronosecuencia de tierras de minas de carbón recuperadas en condiciones tropicales. *Sci Total Environ* 625: 1341-1350.
- Ky C-L, Louarn J, Dussert S, Guyot B, Hamon S, Noirot, M. (2001) Caffeine, trigonelline, chlorogenic acids and sucrose diversity in wild *Coffea arabica* L. and *C. canephora* P. accessions. *Food chem* 75:223-230.
- Läderach, P.; Lundy, M.; Jarvis, A.; Ramírez, J.; Pérez Portilla, E.; Schepp, K.; Eitzinger, A. 2011 “Predicted Impact of Climate Change on Coffee Supply Chains”. Leal Filho, W. *The Economic, Social and Political Elements of Climate Change*. 703-23.
- Lambais, M., Ríos-Ruiz, W., & Andrade, R. (2003). Antioxidant Responses in Bean (*Phaseolus vulgaris*) Roots Colonized by Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *The New Phytologist*, 160(2), 421-428. Retrieved October 25, 2020, from <http://www.jstor.org/stable/1514292>
- Lawlor, D.W. (1995). “Photosynthesis, productivity and environment,” *Journal of Experimental Botany*, 46, 1449-1461.

- Leifheit, E.F., Veresoglou, S.D., Lehmann, A., Morris, E.K. y Rillig, M.C. (2014). Múltiples factores influyen en el papel de los hongos micorrízicos arbusculares en la agregación del suelo: un metaanálisis. *Plant Soil* 374, 523–537. doi: 10.1007 / s11104-013-1899-2.
- Legaz, M.E., Blanch, M., Piñón, D., Santiago, R., Fontaniella, B., Blanco, Y. *et al.* (2011). Sugarcane glycoproteins may act as signals for the production of xanthan in the plant-associated bacterium *Xanthomonas albilineans*. *Plant Signal Behav.* 6 (8):1132-1139.
- Lekberg Y, Koide RT, Rohr JR et al (2007) Papel de las restricciones de nicho y la dispersión en la composición de las comunidades de hongos micorrízicos arbusculares. *J Ecol* 95: 95–105. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01193.x>
- Leroy, T., Ribeyre, F., Bertrand, B., Charmetant, P., Dufour, M., Montagnon, C., Marraccini, P., Pot, D. (2006). Genetics of coffee quality. *Braz J Plant Physiol* 18:229-242
- Lenoir I, Fontaine J, Sahraoui ALH. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungal responses to abiotic stresses: a review. *Phytochemistry* 123: 4–15.
- Leff, J. W., Lynch, R. C., Kane, N. C., and Fierer, N. (2017). Plant domestication and the assembly of bacterial and fungal communities associated with strains of the common sunflower, *Helianthus annuus*. *New Phytol.* 214, 412–423. doi: 10.1111/nph.14323
- Liu, C., Liu, Y., Lu, Y., Liao, Y., Nie, J., Yuan, X., Chen, F. (2019). Use of a leaf chlorophyll content index to improve the prediction of above-ground biomass and productivity. *PeerJ* 6:e6240 DOI 10.7717/peerj.6240.
- Lyons, T., Plochl, M., Turcsanyi, E., Barnes, J.D. (1999). Extracellular antioxidant: a protective screen against? In: Agrawal, S.B., Agrawal, M. (Eds.). *Environmental pollution and plant responses*. CRC/Lewis Publishers, Boca raton. Pp 183-201.
- Marqués-Gálvez, J.E, Morte, A., Navarro-Ródenas, A., García-Carmona, F., y Pérez-Gilabert, M. (2019). Purificación y caracterización de *Terfezia clavaryi* TcCAT-1, una catalasa de trufa del desierto regulada al alza en simbiosis micorrízica. *PLoS uno*, 14 (7), e0219300. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219300>.
- Machado-Assef, C.R.; Collavino, N.G.; Daz, M.; Pocoví, M. I. & Mariotti, J. (2013). La actividad peroxidasa en caña de azúcar (*Saccharum* spp): evolución temporal de la reacción y su posible rol en la resistencia a la roya marrón (*Puccinia melanocephala*, H and P Sydow). *RIA*. 39 (2):169-175.
- Mader, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., and Niggli, U. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* 296, 1694–1697. doi: 10.1126/science.1071148.

- Maltz MR, Treseder KK (2015) Las fuentes de inóculos influyen en la colonización micorrízica de plantas en proyectos de restauración: un metanálisis. *Restor Ecol* 23: 625–634. <https://doi.org/10.1111/rec.12231>
- Martinez, J.Á., Palazzo, D.A., Karazawa, M., Monteiro, M.V.M., Reu, N.R. (1975) Presença de esporos de *Hemileia vastatrix* Berk. & Br., Agente causal da ferrugem do cafeeiro, em diferentes altitudes, nas principais áreas, cafeeiras dos Estados de São Paulo e Paraná (Brasil). *Biológico* 41: 77–88.
- Martín, G.M., L. Arias y R. Rivera. (2010). Selección de las cepas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) más efectivas para la *Canavalia ensiformis* cultivada en suelo Ferralítico Rojo, *Cultivos Tropicales*, ISSN: 1819-4087, 31(1), 27-31.
- Medina, V.E. (2017). Biogeografía de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en el cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en la región San Martín. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Agrónomo, Perú.
- Mejías, L. y E. Palencia. (2005). Abono orgánico manejo y uso en el cultivo de cacao (en línea). Corpoica, Centro de Investigación Turipana, CO. Disponible en [http://www.turipana.org.co/abono\\_cacao.htm](http://www.turipana.org.co/abono_cacao.htm) pp.1-17.
- Melo CD, Walker C, Rodríguez-Echeverría S et al (2014) La composición de especies de hongos micorrízicos arbusculares difiere en pasturas seminaturales y de manejo intensivo en una isla oceánica aislada (Terceira, Azores). *Simbiosis* 64: 73–85. <https://doi.org/10.1007/s13199-014-0303-1>
- Mendonça, A. Nonato, J.V. Almeida, A. Vinícius., Fa, J., Braghini, M., Praela-Pantano, A., & Guerreiro, O. (2016). *Coffea arabica* clones resistant to coffee leaf miner. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 16(1), 42-47. <https://doi.org/10.1590/1984-70332016v16n1a7>.
- Mendes, R., Garbeva, P. y Raaijmakers, J.M. (2013). El microbioma de la rizosfera: importancia de los microorganismos beneficiosos para las plantas, patógenos para las plantas y patógenos humanos. *FEMS Microbiol. Rev.* 37, 634–663. doi: 10.1111 / 1574-6976.12028.
- Mitchell, H.W. (1988). Cultivation and harvesting of Arabica coffee tree. In: R.J. Clarke and R. Macre (eds.). *Coffee*, vol.4. Agronomy. Elsevier Applied Science, London and New York. Pp.43- 90.
- Ministerio de Agricultura y Riego (2014). Plan Nacional de Renovación de Cafetales. Dirección General de Competitividad Agraria. Lima, Perú. 24p.
- Ministerio de Agricultura y Riego (2014). Origen y distribución geográfica del cafeto. Dirección General de Competitividad Agraria. Lima, Perú.

- Montoya RH, Chaves G..M. (1974) Influência da temperatura e da luz na germinação, infectividade e período de geração de *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. *Experientiae* 18: 239–266.
- Mora, N. (2008). Agrocadena de café. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Dirección Regional Huetar Norte. 49 p. Costa Rica.
- Mustafa G.B., Randoux, B., Tisserant, J., Fontaine, J., Magnin-Robert, M. (2016). Phosphorus supply, arbuscular mycorrhizal fungal species, and plant genotype impact on the protective efficacy of mycorrhizal inoculation against wheat powdery mildew. *Mycorrhiza*. 26:685–697.
- Nagamiya, K., Motohashi, T., Nakao, K, Prophan, S.H., Hattori, E., Hirose, S., Ozawa, K., Ohkawa, Y., Takabe, T., Komamine, A., (2007) Enhancement of salt tolerance in transgenic rice expressing an Escherichia coli catalase gene, katE, *Plant Biotechnology Reports*, Volume 1, Issue 1, pp 49-55, doi:10.1007/s11816-007-0007-6
- Newman, E.I., A (1996). *Method of estimating the total length of root in a sample*. *Journal of Applied Ecology*, 3(1), 139-145.
- Nichols, KA., Wright, S.F. (2004). Contribuciones de los hongos a la materia orgánica del suelo en agroecosistemas. En: Magdoff F, Weil RR (eds) *La materia orgánica del suelo en la agricultura sostenible*. CRC, Florida, págs. 179–198
- Nigussie, A., Adugna, A., Ajema, L., Shimber, T. y Taye, E. (2017). Effects of planting density and number vertical on yield and yield component of south Ethiopia coffee selections at Awada, Sidama zone, Southern Ethiopia. *Academic Research Journal of Agricultural Science and Research*. Vol. 5(4), pp. 313-319. DOI: 10.14662/ARJASR2017.030
- Nobre, C.P, Lázaro, M.L, Santo, M.M.E., Pereira, M.G., Berbara, R.L.L. (2015) Agregação, glomalina e carbono orgânico na chapada do Araripe, Ceará, Brasil. *Rev Caatinga* 28: 138-147
- Nutman, F.J, Roberts, F.M. (1963). Estudios sobre la biología de *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. *Trans British Mycological Soc* 46: 27–48.
- Oliveros-Bastidas, A., Macías, F., A., Fernández., C, Carrera., M. David. & Molinillo, J.M. G. (2009). Exudados de la raíz y su relevancia actual en las interacciones alelopáticas. *Química Nova*, 32(1), 198-213. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000100035>
- Öpik M, Moora M, Liira J, Zobel M (2006) Composición de comunidades de hongos micorrízicos arbusculares colonizadores de raíces en diferentes ecosistemas alrededor

- del mundo: Comunidades de hongos micorrízicos arbusculares alrededor del mundo. *J Ecol* 94: 778–790. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01136.x>
- Patai, C., Kanogwan, S., Supachitra, C., Teerada, W. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungus improves the yield and quality of *Lactuca sativa* in an organic farming system. *Science Asia* 42, 315–322. <http://dx.doi.org/10.2306/scienceasia15131874.2016.42.315>.
- 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. 10.1007 / s00572-015-0653-4.
- Parniske, M. (2008). Arbuscular mycorrhiza: The mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology*, 6, 763-775. doi:10.1038/nrmicro1987
- Partelli, F.L., Vieira, H.D., Silva, M.G., & Ramalho, J.C. (2010). Seasonal vegetative growth of different age branches of conilon coffee tree. *Ciências Agrárias*, 31(3), 619-626. DOI: 10.5433/1679-0359.2010v31n3p619
- Partelli, F.L., Vieira, H.D., Souza, P.M., Golynski, A., Poncian, N.J. (2006). Social-economical profile of organic coffee growers in northern Espírito Santo state - satisfaction with the activity and reasons for joining certification. *Rev. Ceres* 53(305):55-64.
- Pérez-de-Luque, A., Tille, S., Johnson, I., Pascual-Pardo, D. y Cameron, D.D. (2017). Los efectos interactivos de las micorrizas arbusculares y las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal mejoran sinérgicamente las defensas de la planta huésped contra los patógenos. *Sci. Rep.* 7: 6409. doi: 10.1038 / s41598-017-16697-4.
- Pérez-Jaramillo, J.E., Mendes, R., and Raaijmakers, J.M. (2016). Impact of plant domestication on rhizosphere microbiome assembly and functions. *Plant Mol. Biol.* 90, 635–644. doi: 10.1007/s11103-015-0337-7
- Pham Y, Reardon-Smith K, Mushtaq S, Cockfield G (2019) The impact of climate change and variability on coffee production: a systematic review. *Clim Chang* 156:609–630. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02538-y>
- Phillips, J. y D. Hayman. (1970). *Improved procedures for clearing roots and vesicular-arbuscular fungi for rapid assessment of the infection*. Transactions of the British.
- Pompelli, M.F., S.C.V. Martins, W.C. Antunes, A.R.M. Chaves and F. M. DaMatta, (2010) “Photosynthesis and photoprotection in coffee leaves is affected by nitrogen and light availabilities in winter conditions,” *Journal of Plant Physiology*, 167, 1052-1060.

- Pozo M. J., Azcon-Aguilar C. (2007). Unraveling mycorrhiza-induced resistance. *Curr. Opin. Plant Biol.* 10 393–398. 10.1016/j.pbi.2007.05.004
- Pretty J., Sutherland W. J., Ashby J., Auburn J., Baulcombe D., Bell M., et al. (2010). The top 100 questions of importance to the future of global agriculture. *Int. J. Agric. Sustain.* 8 219–236. 10.3763/ijas.2010.0534.
- Punaminiya P. et al. (2010). Papel simbiótico de *Glomus mosseae* en la fitoextracción de plomo en pasto vetiver [ *Chrysopogon zizanioides* (L.) ] . *J. Hazard. Mater.* 177, 465–474
- Qiu, L., Bi, Y., Jiang, B. et al. (2019). Los hongos micorrízicos arbusculares mejoran las propiedades químicas y las actividades enzimáticas del suelo de la rizosfera en el hundimiento de la minería recuperada en el noroeste de China. *J. Arid Land* 11, 135-147 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0019-9>
- Quintela, M. P., Silva, T. J. A., Bomfim-Silva, E. M., Silva, E. F. F., & Bebé, F. V. (2011). Parâmetros produtivos e nutricionais do cafeeiro submetido adubação nitrogenada na região de Garanhuns. *Revista Caatinga*, 24(4), 74-79.
- Quistián, Deyanira & Valadez, J. A. (2011). Estrategias de defensa vegetal. *Planta*. 6 (12):10-13. Van Loon, L. C.; Rep, M. & Pieterse, C. M. J. Significance of inducible defense-related proteins in infected plants. *Annu. Rev. Phytopathol.* 44:135-162, 2006.
- Rajtor, M., Piotrowska-Seget, Z. (2016). Prospects for arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) to assist in phytoremediation of soil hydrocarbon contaminants. *Chemosphere* 162: 105-116.
- Ramalho, J.C., Pons, T.L., Groeneveld, H.W., Nunes, M.A. (1997). Photosynthetic responses of *Coffea arabica* leaves to a short-term high light exposure in relation to N availability. *Physiologia Plantarum* 101:229-239
- Rayner, R.W. (1961). Estudios de germinación y penetración de la roya del café (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.). *Ann Appl Biol* 49: 493–505.
- Read, D. (1991). Mycorrhizas in ecosystems. *Experientia* 47(4): 376-391.
- Rena AB, Barris RS, Maestri M, Sondahl MR (1994) Coffee. Paper presented at the Handbook of environmental physiology of fruit crops: subtropical and tropical crops Boca Raton.
- Rena, A.B., Maestri, M., (2000). “Relações hídricas no cafeeiro”, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(1): 34–41, ISSN: 1415-4366, 1807-1929.
- Reis, A.R., J.L. Favarin, E. Malavolta., J.L. Junior., and M.F. Moraes, (2009) “Photosynthesis, chlorophylls, and SPAD readings in coffee leaves in relation to

nitrogen supply,” *Communications in soil science and plant analysis*, 40(9-10), 1512-1528.

- Rekret P, Maherali H. Local adaptation to mycorrhizal fungi in geographically close *Lobelia siphilitica* populations. *Oecologia*. 2019 May;190(1):127-138. doi: 10.1007/s00442-019-04412-1. Epub 2019 May 17. PMID: 31102015.
- Rezende, F.C., Arantes, K.R., Oliveira, S. dos R., Faria, M.A. de: (2010). “Cafeeiro recepado e irrigado em diferentes épocas: produtividade e qualidade”, *Coffee Science*, 5(3): 229-236, ISSN: 1984-3909.
- Rillig, M.C., Ramsey, P.W., Morris, S, Paul EA. La glomalina, una proteína del suelo micorrízica arbuscular, responde al cambio de uso de la tierra. *Suelo vegetal*. 2003; 253 (2): 293–299.
- Rillig, MC (2004). Micorrizas arbusculares, glomalina y agregación del suelo. *Lata. J. Soil Sci.* 84, 355–363. doi: 10.4141 / S04-003.
- Rillig, M.C., Mummey, D.L. (2006) Micorrizas y estructura del suelo. *Nuevo Phytol* 171: 41–53
- Ritschel, A. (2005). Monograph of the genus *Hemileia* (Uredinales). In: *Bibliotheca Mycologica*, vol.200 (Bresinsky, A., Butin, H. and Tudzinski, P., eds), pp. 3–132. Stuttgart: J. Cramer.
- Rivillas, O.C., Serna, G.C., Cristancho, A.M. y Gaitán, B.A. (2011). *La Ruya del Cafeto en Colombia (Impacto, manejos y costos del control, resultados de investigación)*. Centro Nacional de Investigación del Café (Cenicafé). Chinchiná, Caldas, Colombia. 53 pp.
- Rozo Y., Escobar C., Gaitán A. and Cristancho M. (2012). Aggressiveness Genetic Diversity of *Hemileia vastatrix* During an Epidemic in Colombia. *Journal of Phytopathology* 160:732–740
- Rojas-Mego, K.C.; Elizarbe-Melgar, C.; Gárate-Díaz, M.H.; Ayala-Montejo, D.; Ruíz-Cubillas, P.; Sieverding, E. (2014). Hongos de micorriza arbuscular en tres agroecosistemas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonía peruana. *Folia Amazónica* 23: 149-156.
- Royer, M., Larbat, R., Le Bot, J., Adamowicz, S., and Robin, C. (2013). Is the C:N ratio a reliable indicator of C allocation to primary and defence-related metabolisms in tomato? *Phytochemistry* 88, 25–33. doi: 10.1016/j.phytochem.
- Ruiz-Lozano, J.M, Porcel R, Azcon C, Aroca, R. (2012). Regulation by arbuscular mycorrhizae of the integrated physiological response to salinity in plants: new challenges in physiological and molecular studies. *Journal of Experimental Botany* 63: 4033–4044.

- Sagarpa, (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, MX). (2013). Ficha técnica roya del café *Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome. México, Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria. 28 p.
- Sah, S.K., K.R. Reddy and J. Li. 2016. Abscisic Acid and Abiotic Stress Tolerance in Crop Plants. *Frontiers in Plant Science* 7: 571. Doi: 10.3389/fpls.2016.00571.
- Shamshiri, M.H, Usha, K., Singh, B. (2012). Growth and nutrient uptake responses of Kinnow to vesicular arbuscular mycorrhizae. *ISRN Agronomy*. 10.5402/2012/535846.
- SENAMHI. (2020). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Estación meteorológica de Jepelacio-Moyobamba, San Martín, Perú.
- Shi, W., Zhang, Y., Chen, S., Polle, A., Rennenberg, H., Luo, Z-B. (2018). Physiological and molecular mechanisms of heavy metals accumulation in nonmycorrhizal versus mycorrhizal plants. *Plant, Cell & Environment* 42: 1087–1103.
- Shiyin, L., Lixiao, N., Panying, P., Cheng, S., Liansheng, W., (2004). Effects of pesticides and their hydrolysates on catalase activity in soil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 72: 600–606.
- Silva, M.D.C., Várzea, V. M. P., Guimaraes, L. G., Azinheira, H. G., Fernandez, D., Petitot, A. S., Bertharnd, B., Lashermes, P., Nicoel, M. (2006). Coffea resistance to the main disease: leaf rust and coffea Berry disease. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 18, 119-147. Doi: 10.1590/S1677-04202006000100010.
- Singh, PK, Singh, M. y Tripathi, BN (2013). Glomalina: una proteína micorrízica del suelo micorrízica arbuscular. *Protoplasma* 250, 663–669. doi: 10.1007 / s00709-012-0453-z
- Smith, S.E., Smith, F.A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales. *Ann. Rev. Plant Biol.* 62, 227–250.
- Snedecor, G.W, Cochran, W.G. (1980). *Statistical methods*, 7th edn. Iowa State University Press, Iowa
- Sohn, B.K., Kim, KY., Chung, S.J., Kim, W.S., Park, S.M., Kang, J.G., et al. (2003). Effect of different timing of AMF inoculation on plant and flower quality of chrysanthemum. *Sci Hortic.* 98: 173–183.
- Solaiman Z. M., Abbott L. K., Varma A. (2014). *Mycorrhizal Fungi: Use in Sustainable Agriculture and Land Restoration*. Berlin: Springer.

- Smith, S.E., Smith, F.A., Jakobsen, I. (2004). Functional diversity in arbuscular mycorrhizal (AM) symbioses: the contribution of the mycorrhizal P uptake pathway is not correlated with mycorrhizal responses in growth or total P uptake. *New Phytol* 162: 511–524
- Smith, S.E. y Smith, F.A. (2011). “Roles of arbuscular Mycorrhizas in *Plant Nutrition* and Growth: New paradigms from Cell to Ecosystem Scale”, en *Annual Review of Plant Biology*, eds SS Merchant, WR Briggs y D. Ort (Palo Alto, CA: Annual Reviews), 227– 250.
- Smith, S. E. and Read D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. Cambridge: Academic Press.
- Spann, T. M. and Schumann, A. W. (2010). Mineral nutrition contributes to plant disease and pest resistance. *University of Florida, IFAS Extension HS1181*
- Stahl PD. y Christensen, M. 1991. Population variation in the mycorrhizal fungus *Glomus mosseae*: breadth of environmental tolerance. *Mycological Research*, 95 (3): 300-307.
- Symanczik, S., Lehmann, M.F., Wiemken, A., Boller, T., Courty, P.E., (2018). Effects of two contrasted arbuscular mycorrhizal fungal isolates on nutrient uptake by *Sorghum bicolor* under drought. *Mycorrhiza* 28: 779–785.
- Soto-Pinto, I., Perfecto, J., Castillo-Hernandez, J., Caballero-Nieto, (2000). Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 80, pp. 61-69, 10.1016/S0167-8809(00)00134-1.
- Taiz, L., and E. Zeiger. (2010). *Plant physiology*. 5<sup>th</sup> edition. Sinauer associates. Sunderland, MA, USA. 782 p.
- Tilman D., Clark M., Williams D.R., Kimmel K., Polasky S., Packer C. (2017). Future threats to biodiversity and pathways to their prevention. *Nature* 546 73–81. 10.1038/nature22900 [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]
- Tilman D., Balzer C., Hill J., Befort B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 108 20260–20264. 10.1073/pnas.1116437108.
- Tolbert, N.E. (1981). Metabolic path-ways in peroxisomes and glyoxysomes. *Annu. Rev. Biochem.* 50: 133:57.
- Toniutti, L., J. Breitler, H. Etienne, C. Campa, S. Doulebeau, L. Urban, C. Lambot, J. Pinilla, and B. Bertrand. (2017). Influence of environmental conditions and genetic background of arabica coffee (*Coffea arabica*) on leaf rust (*Hemileia vastatrix*) pathogenesis. *Front. Plant Sci.* 8:2025. doi:10.3389/fpls.2017.02025.

- Torrecillas E. et al. (2014). La modularidad revela la tendencia de los hongos micorrízicos arbusculares a interactuar de manera diferente con especies de plantas generalistas y especializadas en suelos de yeso. *Apl. Reinar. Microb.* 80, 5457–5760.
- Torres, N., Antolín, MC., Goicoechea, N. (2018). Arbuscular mycorrhizal symbiosis as a promising resource for improving berry quality in grapevines under changing environments. *Frontiers in Plant Science* 9: 987.
- Trasar-Cepeda, C., Gil-Sotres, F., Leiros, M.C. (2007). Thermodynamic parameters of enzymes in grassland soils from Galicia, NW Spain. *Soil Biology & Biochemistry*, 39: 311– 319.
- Trejo, D., R. Ferrera-Cerrato., R. García., L. Varela., L. Lara y A. Alarcón. (2011). *Efectividad de siete consorcios nativos de hongos micorrízicos arbusculares en plantas de café en condiciones de invernadero y campo*. Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(1), 23-31.
- Tubiello F. N., Salvatore M., Ferrara A. F., House J., Federici S., Rossi S., et al. (2015). The contribution of agriculture, forestry and other land use activities to global warming, 1990–2012. *Glob. Change Biol.* 21 2655–2660. 10.1111/gcb.12865
- Vallejos-Torres, G., Espinoza, E., Marín-Díaz, J. et al. The Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Against Root-Knot Nematode Infections in Coffee Plants. *J Soil Sci Plant Nutr* 21, 364–373 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00366-z>
- Vallejos -Torres, G., Saboya, A., y Arevalo, L A. (2021). Efecto Bioprotector de Micorrizas Arbusculares en la Reducción de Roya (*Hemileia vastatrix*) en la Región San Martín. *Revista Agrotecnológica Amazónica*, 1 (1), 34-44. <https://doi.org/10.51252/raa.v1i1.122>
- Vallejos-Torres, G., Arévalo, L.A., Ríos, O. et al. (2020). Propagation of Rust-Tolerant *Coffea arabica* L. Plants by Sprout Rooting in Microtunnels. *J Soil Sci Plant Nutr* <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00180-7>
- Vallejos-Torres, G., Arévalo, L., Iliquin, I. y Solis, R. (2019). Respuesta en Campo de Clones de Café a la Inoculación con Consorcios de Hongos Micorrízicos Arbusculares en la Región Amazonas, Perú. *Información tecnológica*, 30(6), 73-84. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600073>
- Van der Vossen, H. (2005) A critical analysis of the agronomic and economic sustainability of organic coffee production. *Exper Agric* 41:449-473.
- Velázquez MS, Fabisik JC, Abarca CL et al (2018) Dinámica de colonización de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en cultivos de *Ilex paraguariensis*: estacionalidad e

influencia de las prácticas de manejo. *J King Saud Univ - Ciencia*. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.03.017>

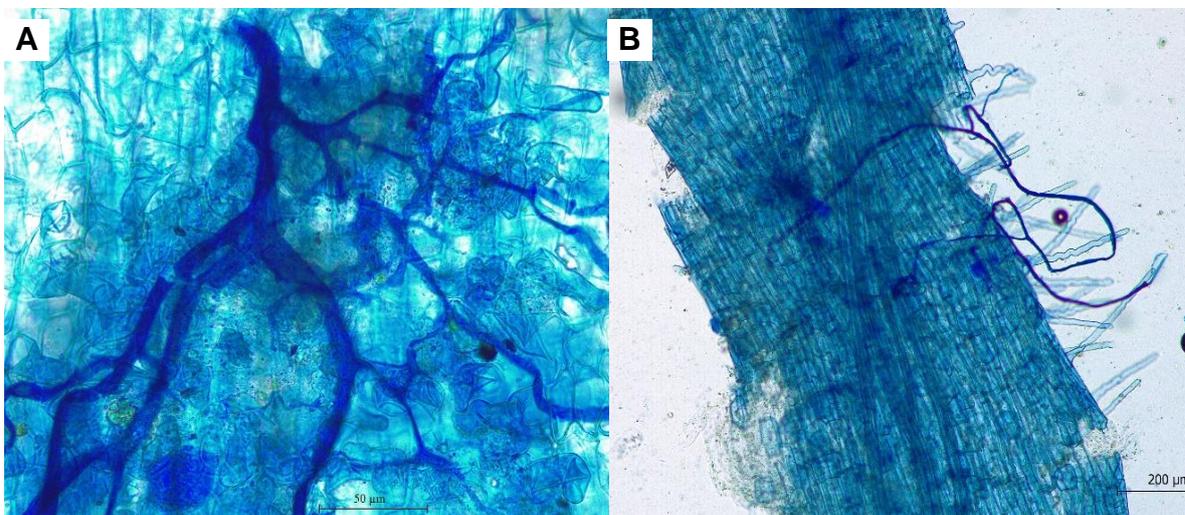
- Vodnik D, Grčman H, Maček I, Van Elteren JT, Kovačević M. (2008). La contribución de la proteína del suelo relacionada con la glomalina al secuestro de Pb y Zn en suelos contaminados. *Sci Total Environ*. 392 (1): 130-136. pmid: 18086489.
- Wang C, Gu Z, Cui H et al (2015) Diferencias en la composición de la comunidad fúngica micorrízica arbuscular en suelos de tres tipos de uso de la tierra en una zona montañosa subtropical del sur de China. *PLoS One* 10: e0130983
- Wang, G., Wang, Li., Ma, Fang. Dongguang Yang, Yongqiang You. (2021). Earthworm and arbuscular mycorrhiza interactions: Strategies to motivate antioxidant responses and improve soil functionality, *Environmental Pollution*. 272, pág. 1-45. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115980>.
- Wang, et al. (2014) Wang Y, Wang D, Shi P, Omasa K. Estimating rice chlorophyll content and leaf nitrogen concentration with a digital still color camera under natural light. *Plant Methods*. 10(1):36. doi: 10.1186/1746-4811-10-36.
- Wipf, D., Krajinski, F., Tuinen, D.V, Recorbet, G. y Courty, P. (2019). Trading on the arbuscular mycorrhiza market: from arbuscules to common mycorrhizal Networks. *New Phytologist* 223: 1127–1142 doi: 10.1111/nph.15775.
- Wilson, G.W.T., Rice, C. W., Rillig, M.C., Springer, A., and Hartnett, D.C. (2009). Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments. *Ecol. Lett.* 12, 452–461. doi: 10.1111/j.1461-0248.2009.01303.x
- Wintgens, J.N. (2009). Coffee: growing, processing, sustainable production. A guidebook for growers, processors, traders and researchers. Wiley-Vch, Verlag, 976p.
- Wrigley, G. (1995). Coffee/*Coffea* spp. Rubiaceae. In: Evolution of crop plants. Second edn. Essex (Inglaterra), Longman Scientific and Technical, pp 438 – 443
- Wright, S.F., and A. Upadhyaya. (1996). Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Sci*. 161:575–586.
- Vlček, V, Pohanka M (2019) Glomalina: una proteína interesante que forma parte de la materia orgánica del suelo. *Agua del suelo Res*. <https://doi.org/10.17221/29/2019-SWR>
- Wyszkowska, J., Tomkiel, M., Baćmaga, M., Borowik, A., Kucharski, J., (2016). Response of microorganisms and enzymes to soil contamination with a mixture of

- pethoxamidterbutylazine. *Environ. Earth Sci.* 75, 1285. <http://doi.org/10.1007/s12665-016-6092-5>.
- Wu, Q.S., Xia, R.X., Zou, Y.N. (2006). Metabolismo reactivo del oxígeno en plántulas de cítricos micorrízicos y no micorrízicos (*Poncirus trifoliata*) sometidas a estrés hídrico. *J Plant Physiol.* 163 (11): 1101-1110. 10.1016 / j.jplph.2005.09.001.
- Xie, X.Y., Weng, B.S., Zhao, S.Z. & Yan, C.L. (2013). Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation and Cd stress on the growth and antioxidant enzyme system of *Kandelia obovata*. *Journal of Xiamen University* 52: 244-253.
- Yang Y, Han X, Liang Y, Ghosh A, Chen J, Tang M (2015) The Combined Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and Lead (Pb) Stress on Pb Accumulation, Plant Growth Parameters, Photosynthesis, and Antioxidant Enzymes in *Robinia pseudoacacia* L. *PLoS ONE* 10(12): e0145726. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145726>
- Yang, Y., He, C., Huang, L., Ban, Y. & Tang, M. (2017). The effects of arbuscular mycorrhizal fungi on glomalin-related soil protein distribution, aggregate stability and their relationships with soil properties at different soil depths in lead-zinc contaminated area. *PLoS ONE* 12: e0182264.
- Yang, S.Y., Gronlund, M., Jakobsen, I., Grotemeyer, M.S., Rentsch, D., Miyao, A., Hirochika, H., Kumar, C.S., Sundaresan, V., Salamin, N., *et al.* (2012). Nonredundant regulation of rice arbuscular mycorrhizal symbiosis by two members of the PHOSPHATE TRANSPORTER1 gene family *Plant Cell*, 24. pp. 4236-4251
- Yirga, M (2020). Potential Effects, Biology and Management Options of Coffee Leaf Rust (*Hemileia Vastatrix*): A Review. *International Journal of Forestry and Horticulture (IJFH) Volume 6, Issue 1, 2020, PP 19-31 ISSN No. (Online) 2454-9487 DOI: <http://dx.doi.org/10.20431/2454-9487.0601003> www.arcjournals.org*
- Yousefi, Z., Riahi, H., Khabbaz-Jolfaei, H., Zanganeh, S. (2011). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi against apple powdery mildew disease. *Life Sci J.* 8:108–112.
- Zambolim, L. Estado actual y manejo de la roya del café en Brasil. *Trop. Pathol vegetal.* 41, 1–8 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40858-016-0065-9>.
- Zambolim, L., Silva-Acuña, R., Vale, F.X.R., Chaves, G.M. (1992). Influencia da produção do cafeeiro sobre o desenvolvimento da ferrugem (*Hemileia vastatrix*). *Fitopatol Bras* 17: 32–35.
- Zhao H, Li X, Zhang Z et al (2017) Diversidad de especies e impulsores de comunidades de hongos micorrízicos arbusculares en una montaña semiárida en China. *PeerJ* 5. <https://doi.org/10.7717/peerj.4155>

**ANEXOS**

### Anexo 1.

Presencia de estructuras fúngicas de HMA en raíces de café



*Nota:* Micelio observado en microscopio 40X y 10X en plantas de café var. caturra y pache. A) Micelio intra y extrarradicular. B) Micelio extrarradicular.

### Anexo 2.

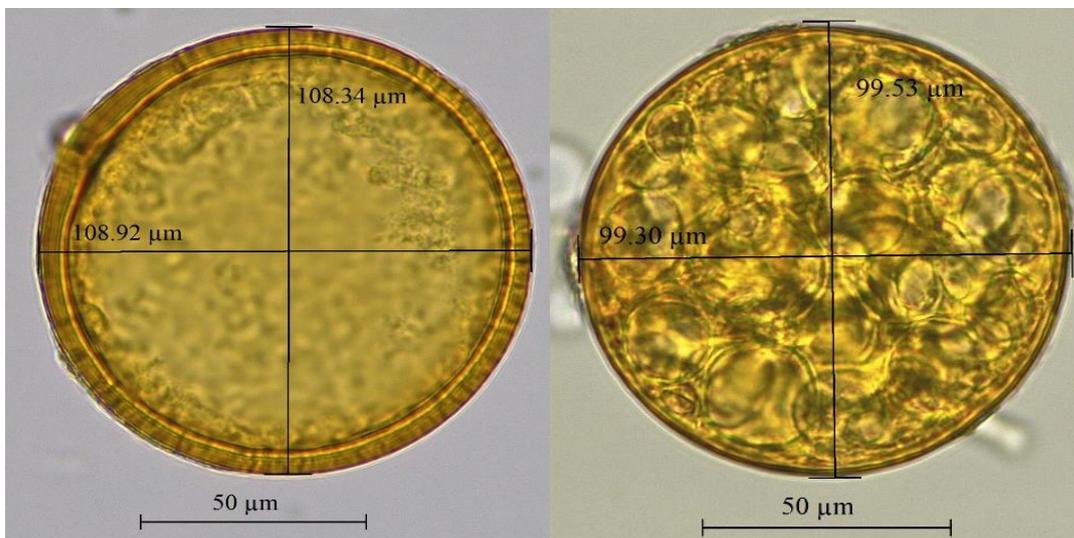
Esporas de HMA presentes en el suelo de las plantas de café inoculado con el consorcio micorrízico HMA in situ



*Nota:* Fotografía en microscopio LEICA DM1000 LED a distintas escalas.

### Anexo 3

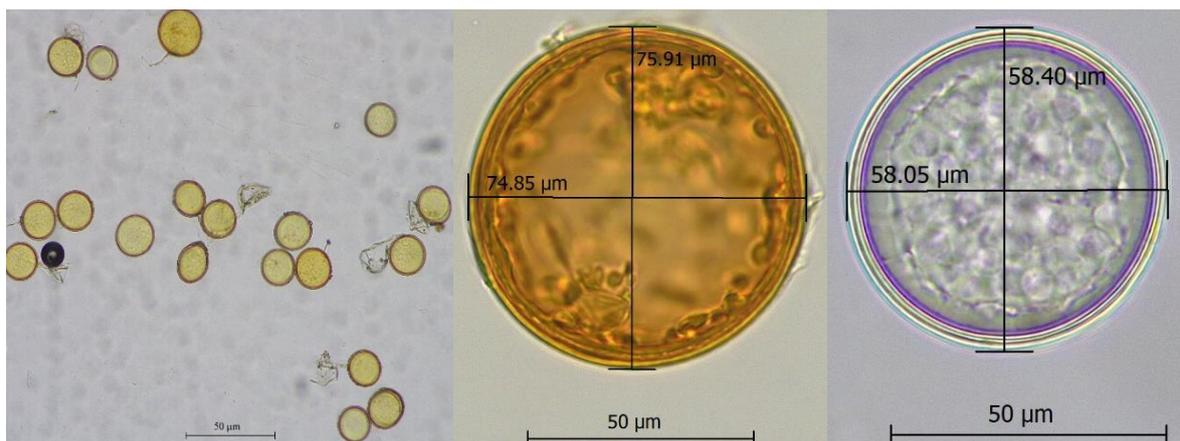
Esporas de HMA presentes en suelo de plantas de café inoculadas con el consorcio Moyobamba.



*Nota:* Fotografía en microscopio LEICA DM1000 LED a distintas escalas.

### Anexo 4.

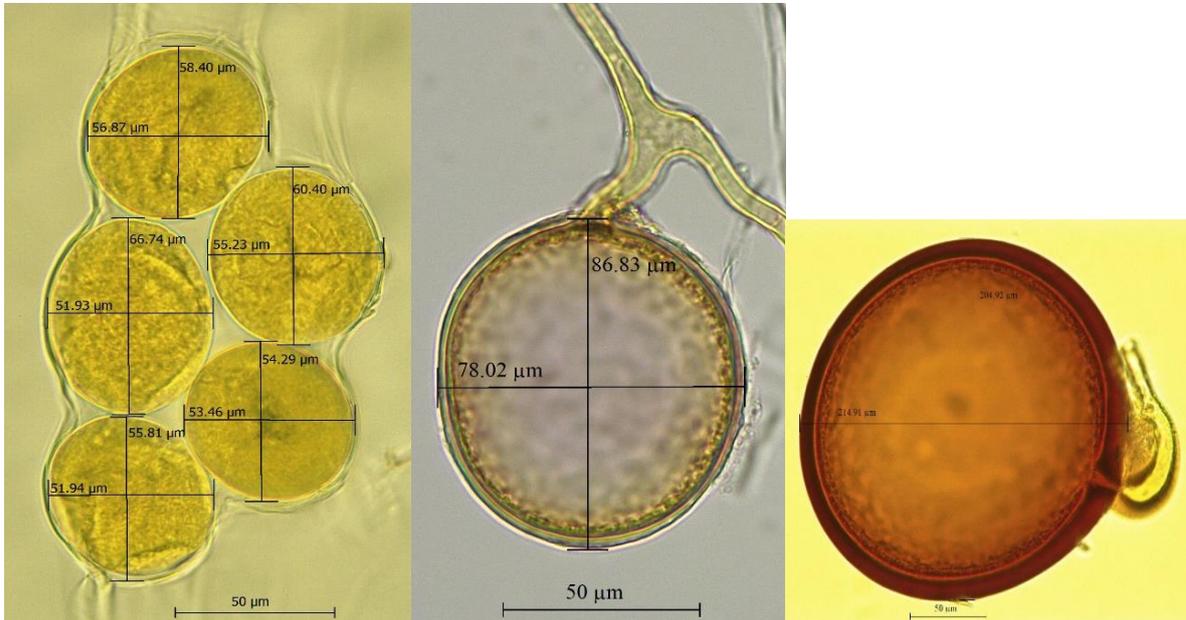
Esporas de HMA presentes en suelo de plantas de café inoculadas con el consorcio Huallaga.



*Nota:* Fotografía en microscopio LEICA DM1000 LED a distintas escalas.

### Anexo 5.

Esporas de HMA presentes en suelo de plantas de café inoculadas con el consorcio El Dorado.



*Nota:* Fotografía en microscopio LEICA DM1000 LED a distintas escalas.

### Anexo 6.

Crecimiento y desarrollo de plantas micorrizadas de café en vivero durante 150 días



**Anexo 7.**

Crecimiento y desarrollo de plantas de café micorrizadas en campo durante 300 días

**Anexo 8.**

Análisis Foliar de nitrógeno y fosforo en los tratamientos del 1 a 4 con sus respectivas repeticiones

**INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES**INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA  
CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183**LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS****REPORTE DE ANÁLISIS FOLIAR**

N° SOLICITUD : AF0009-01-20  
 SOLICITANTE : INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE LA SELVA PERUANA  
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - MOYOBAMBA - JEPELACIO - BARRANQUITA  
 TEJIDO VEGETAL : HOJAS DE CAFÉ  
 PROPIETARIO : SEGUNDO A. TUESTA VALLES

FECHA DE MUESTREO : 16/07/2020  
 FECHA DE RECEP. LAB : 22/07/2020  
 FECHA DE REPORTE : 27/07/2020

ITEM	Número de Muestra			N	P	
	Laboratorio		Campo			%
01	20	07	0078	MHAF-(T1-BI)	3.00	0.20
02	20	07	0079	MHAF-(T1-BII)	3.15	0.23
03	20	07	0080	MHAF-(T1-BIII)	3.14	0.23
04	20	07	0081	MHAF-(T2-BI)	2.36	0.21
05	20	07	0082	MHAF-(T2-BII)	3.24	0.23
06	20	07	0083	MHAF-(T2-BIII)	2.87	0.22
07	20	07	0084	MHAF-(T3-BI)	2.67	0.22
08	20	07	0085	MHAF-(T3-BII)	2.69	0.22
09	20	07	0086	MHAF-(T3-BIII)	3.22	0.19
10	20	07	0087	MHAF-(T4-BI)	3.15	0.27
11	20	07	0088	MHAF-(T4-BII)	3.30	0.24
12	20	07	0089	MHAF-(T4-BIII)	3.02	0.30

**METODOLOGIA:**  
 Nitrogeno : Kjeldhal  
 Fosforo : Digestion HNO3:HClO4 (4:1) / Espectr. UV-Vis ( $\lambda=420$  nm)

Nota: el laboratorio no se responsabiliza por la metodología aplicada para la toma de la muestra del presente reporte.  
 \*Los Calculos estan en base a materia seca.

La Banda de Shilcayo, 27 de Julio del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES  
 TROPICOS - PERU  
 Cesar O. Arceño Hernandez, MSc  
 JEFE DE OPTO. DE SUELOS

**Anexo 9.**

Análisis foliar de nitrógeno y fósforo en los tratamientos del 5 a 8 con sus respectivas repeticiones

**INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES**

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONIA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

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

N° SOLICITUD : AF0009-01-20  
 SOLICITANTE : INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE LA SELVA PERUANA  
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - MOYOBAMBA - JEPELACIO - BARRANQUITA  
 TEJIDO VEGETAL : HOJAS DE CAFÉ  
 PROPIETARIO : SEGUNDO A. TUESTA VALLES

FECHA DE MUESTREO : 16/07/2020  
 FECHA DE RECEP. LAB : 22/07/2020  
 FECHA DE REPORTE : 27/07/2020

ITEM	Número de Muestra			N	P	
	Laboratorio		Campo			%
01	20	07	0090	MHAF-(T5-BI)	2.89	0.26
02	20	07	0091	MHAF-(T5-BII)	3.05	0.29
03	20	07	0092	MHAF-(T5-BIII)	3.17	0.23
04	20	07	0093	MHAF-(T6-BI)	2.38	0.28
05	20	07	0094	MHAF-(T6-BII)	2.74	0.20
06	20	07	0095	MHAF-(T6-BIII)	3.40	0.21
07	20	07	0096	MHAF-(T7-BI)	2.92	0.20
08	20	07	0097	MHAF-(T7-BII)	3.48	0.20
09	20	07	0098	MHAF-(T7-BIII)	3.48	0.27
10	20	07	0099	MHAF-(T8-BI)	2.42	0.33
11	20	07	0100	MHAF-(T8-BII)	3.77	0.22
12	20	07	0101	MHAF-(T8-BIII)	3.09	0.18

**METODOLOGIA:**

Nitrogeno : Kjeldhal  
 Fosforo : Digestion HNO<sub>3</sub>:HClO<sub>4</sub> (4:1) / Espectr. UV-Vis (λ=420 nm)

Nota: el laboratorio no se responsabiliza por la metodología aplicada para la toma de la muestra del presente reporte.  
 \*Los Calculos estan en base a materia seca.

La Banda de Shilcayo, 27 de Julio del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES  
 TARAPOTO - PERÚ

Cesar O. Arevalo Hernandez, MSc  
 JEFE DE DPTO. DE SUELOS

**Anexo 10.**

**Análisis de caracterización física – química de suelos en cada tratamiento**



**INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES**

INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONIA PERUANA

CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

**LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS**

**REPORTE DE ANÁLISIS DE SUELOS - CARACTERIZACIÓN**

N° SOLICITUD : AS0049-20  
 SOLICITANTE : INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE LA AMAZONIA PERUANA  
 PROCEDENCIA : SAN MARTIN - MOYOBAMBA - JEPELACIO - BARRANQUITA  
 CULTIVO : CAFÉ  
 PRODUCTOR : SEGUNDO A. TUESTA VALLES

FECHA DE MUESTREO : 16/07/2020  
 FECHA DE RECEP. LAB : 22/07/2020  
 FECHA DE REPORTE : 26/07/2020

Item	Número de la muestra				pH	C.E dS/m	CaCO <sub>3</sub> (%)	M.O (%)	N (%)	P (ppm)	K (ppm)	ANÁLISIS MECANICO			CLASE TEXTURAL	CIC pH 7.0	CATIONES CAMBIABLES					Suma de bases	% Sat. de bases	% Sat. de Al <sup>3+</sup>
	Lab.	Campo	Arcilla	Limo								Arena	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>			K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup> +H <sup>+</sup>					
																				cmol/kg				
01	20	07	0289	CA-(T1)	7.02	0.38	<0,3	6.65	0.30	14.85	308	40.96	18.00	41.04	Arc	26.22	22.86	2.49	0.79	0.08	0.00	26.22	100.0	0.0
02	20	07	0290	CA-(T2)	6.60	0.45	0.75	5.71	0.26	16.86	396	28.24	21.00	50.76	Arc	33.46	28.93	3.33	1.01	0.19	0.00	33.46	100.0	0.0
03	20	07	0291	CA-(T3)	6.42	0.27	1.25	4.86	0.22	11.64	513	22.24	18.00	59.76	Arc	33.68	29.57	2.63	1.31	0.16	0.00	33.68	100.0	0.0
04	20	07	0292	CA-(T4)	6.43	0.28	<0.3	5.40	0.24	13.72	272	28.24	21.00	50.76	Arc	33.77	29.63	3.24	0.69	0.20	0.00	33.77	100.0	0.0
05	20	07	0293	CA-(T5)	7.16	0.36	0.82	5.39	0.24	24.71	320	34.24	18.00	47.76	Arc	34.70	29.61	4.03	0.82	0.23	0.00	34.70	100.0	0.0
06	20	07	0294	CA-(T6)	6.63	0.17	1.38	3.23	0.15	7.82	381	28.24	24.00	47.76	Arc	21.08	17.29	2.62	0.98	0.19	0.00	21.08	100.0	0.0
07	20	07	0295	CA-(T7)	6.88	0.12	0.63	4.38	0.20	13.55	409	28.24	24.00	47.76	Arc	24.11	19.76	3.11	1.05	0.20	0.00	24.11	100.0	0.0
08	20	07	0296	CA-(T8)	7.49	0.34	0.75	4.49	0.20	13.37	364	37.24	21.00	41.76	Arc	27.09	22.95	3.06	0.93	0.15	0.00	27.09	100.0	0.0

MÉTODOS :	
TEXTURA	: HIDROMETRO
pH	: POTENCIOMETRO SUSPENSION SUELO-AGUA RELACION 1:2.5
CONDUCC. ELECTRICA	: CONDUCTIMETRO SUSPENSION SUELO-AGUA 1:2.5
CARBONATOS	: GAS - VOLUMETRICO
FOSFORO DISPONIBLE	: OLSEN MODIFICADO EXTRACT. NaHCO <sub>3</sub> +0.5M, pH 8.5 Esp. Vis
POTASIO Y SODIO INTERCAMBIABLE	: (NH <sub>4</sub> )CH <sub>3</sub> -COOH+1N, pH 7. Absorcion Atómica
MATERIA ORGANICA	: WALKLEY y BLACK
CALCIO Y MAGNESIO INTERCAMBIABLE	: EXTRACT. KCl+0.1N & (NH <sub>4</sub> )CH <sub>3</sub> -COOH+1N, pH 7. Absorcion Atómica
ACIDEZ INTERC.	: EXTRACT. KCl 1N, VOLUMETRIA
ACIDEZ POTENCIAL	: WOODRUFF MODIFICADO
CIC pH 7.0	: ACIDEZ POTENCIAL-SUMA DE BASES
Fe, Cu, Zn y Mn	: OLSEN Modificado extract. NaHCO <sub>3</sub> +0.5M, pH 8.5 Absorcion Atómica
BORO	: Extracción / Espectrometria LV-16 (λ=555 nm)
AZUFRE	: Extracción / Turbidimetria (λ=420 nm)
METALES PESADOS	: EPA 3050B

La Banda de Shilcayo, 25 de Julio del 2020

INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES  
 TARAPOTO - PERU  
  
 Cesar O. Arévalo Hernández, MSc  
 JEFE DE DPTO. DE SUELOS

Activar Windows  
 Ve a Configuración para activar

Nota: El laboratorio no se responsabiliza por la metodología aplicada para la toma de la muestra del presente reporte.

## Anexo 11.

Análisis de proteínas de suelo (glomalina) y enzima de suelos (catalaza)



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**FACULTAD DE AGRONOMIA**  
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES

**ANÁLISIS DE PROTEÍNAS Y ENZIMAS EN SUELO**

SOLICITANTE : INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE LA AMAZONIA PERUANA  
 (IIAP - SAN MARTIN)

MUESTRA : SUELO

PROCEDENCIA: SAN MARTIN

REFERENCIA : H.R. 72413

FECHA : 26/11/2020

N° Lab.	Claves	Glomalinas (mg/g de suelo fresco)	Gramos de suelo seco en 1 g de suelo fresco	GLOMALINA S (mg/g de suelo seco)	Catalasas Unidades enzimáticas (uM/g.min)	CATALASAS Unidades enzimáticas UE/g
305	GRSP-(T1-M1) CAT-(T1-M1)	80.091	1.36	58.890	6.02	6.02
306	GRSP-(T2-M1) CAT-(T2-M1)	94.447	2.36	64.250	6.67	6.67
307	GRSP-(T3-M1) CAT-(T3-M1)	95.746	3.36	73.088	3.50	3.50
308	GRSP-(T4-M1) CAT-(T4-M1)	96.746	4.36	65.121	5.97	5.97
309	GRSP-(T5-M1) CAT-(T5-M1)	90.896	5.36	62.258	5.97	5.97
310	GRSP-(T6-M1) CAT-(T6-M1)	72.564	6.36	60.978	5.09	5.09
311	GRSP-(T7-M1) CAT-(T7-M1)	90.467	7.36	66.520	3.77	3.77
312	GRSP-(T8-M1) CAT-(T8-M1)	80.680	8.36	58.890	4.42	4.42

Unidad enzimática (UE)

uM/min

*Dr. Sady García Bendezú*  
 Jefe Laboratorio de Microbiología



*Ing. Braulio La Torre Martínez*  
 Jefe Laboratorio de Suelos

## Anexo 12.

Datos de micorrización y morfología del cafeto.

TRAT.	Variedad de cafe	Consortio HMA	N° Planta	Micorrización		Morfología			
				Colonización HMA (%)	L-MER (cm)	Altura planta (cm)	Area foliar (cm <sup>2</sup> )	N° ramas	N° floración
T1	Caturra	Sin HMA	1	34,44	25,17	35,5	494,5	0,25	4,75
			2	38,89	24,37	36,25	891	0,25	9
			3	36,67	24,77	43,5	966,7	0	10,75
<b>Promedio</b>				<b>36,667</b>	<b>24,77</b>	<b>38,417</b>	<b>784,067</b>	<b>0,167</b>	<b>8,167</b>
T2	Pache	Sin HMA	1	37,78	19,57	25,25	236,1	0	3
			2	38,89	19,57	27,25	512,3	0	5,75
			3	37,78	19,57	24,5	423,2	0	4,5
<b>Promedio</b>				<b>38,15</b>	<b>19,57</b>	<b>25,67</b>	<b>390,53</b>	<b>0</b>	<b>4,42</b>
T3	Caturra	Con-Moy	1	56,67	45,14	35,13	1181	14,25	12,75
			2	52,22	43,14	37	784,1	11,75	15,5
			3	50	35,95	49	1550	6,75	10,25
<b>Promedio</b>				<b>52,963</b>	<b>41,41</b>	<b>40,377</b>	<b>1171,7</b>	<b>10,917</b>	<b>12,833</b>
T4	Pache	Con-Moy	1	53,33	33,96	41,75	1270	14,5	12,25
			2	51,11	44,73	41,25	1154	8,75	10,75
			3	51,11	36,77	42,5	1127	11,5	14
<b>Promedio</b>				<b>51,85</b>	<b>38,487</b>	<b>41,833</b>	<b>1183,667</b>	<b>11,583</b>	<b>12,333</b>
T5	Caturra	Con-El Dor	1	66,67	39,55	47,5	1154	13	12,5
			2	61,11	45,94	53,75	1479	12,25	11

			3	63,33	37,95	41,5	1167	12	14,25
<b>Promedio</b>				<b>63,703</b>	<b>41,147</b>	<b>47,583</b>	<b>1266,667</b>	<b>12,417</b>	<b>12,583</b>
T6	Pache	Con-El Dor	1	65,56	49,14	48,25	1140	15,5	14,75
			2	62,22	42,74	49	1163	11	12,5
			3	57,78	39,55	44,5	1216	9,75	13
<b>Promedio</b>				<b>61,85</b>	<b>43,81</b>	<b>47,25</b>	<b>1173</b>	<b>12,08</b>	<b>13,42</b>
T7	Caturra	Con-Hua	1	64,44	47,94	57,38	1230	19	11,5
			2	64,44	43,94	55,5	1541	14,5	11,5
			3	65,56	52,73	59	1448	14,5	16,5
<b>Promedio</b>				<b>64,813</b>	<b>48,203</b>	<b>57,293</b>	<b>1406,333</b>	<b>16</b>	<b>13,167</b>
T8	Pache	Con-Hua	1	56,67	42,35	52,38	1247	17,75	13,75
			2	65,56	43,94	52	1608	13	14,5
			3	68,89	49,54	52,25	1261	14,75	14,25
<b>Promedio</b>				<b>63,707</b>	<b>45,277</b>	<b>52,21</b>	<b>1372</b>	<b>15,167</b>	<b>14,167</b>

### Anexo 13.

Datos del estado nutricional en hojas de los cafetos, proteína (glomalina) y enzima (catalaza).

TRAT.	Variedad de cafe	Consortio HMA	N° Planta	Estado nutricional			Proteina	Enzima
				N (%)	P (%)	Clorofila	Glomalina (mg/g)	Catalasa (U/g)
T1	Caturra	Sin HMA	1	2,89	0,2	45,85	58,89	6,02
			2	3,05	0,23	44,43	56,59	5,97
			3	3,17	0,23	38,73	61,18	6,07
<b>Promedio</b>				<b>3,037</b>	<b>0,220</b>	<b>43,003</b>	<b>58,887</b>	<b>6,020</b>
T2	Pache	Sin HMA	1	2,38	0,21	34,03	64,25	6,67
			2	2,74	0,23	35,63	60,87	6,68
			3	3,4	0,22	38,2	67,63	6,67
<b>Promedio</b>				<b>2,840</b>	<b>0,220</b>	<b>35,953</b>	<b>64,250</b>	<b>6,673</b>
T3	Caturra	Con-Moy	1	3	0,2	58,43	73,09	3,5
			2	3,15	0,2	59,7	70,55	3,67
			3	3,14	0,27	61,03	75,62	3,33
<b>Promedio</b>				<b>3,097</b>	<b>0,223</b>	<b>59,720</b>	<b>73,087</b>	<b>3,500</b>
T4	Pache	Con-Moy	1	2,36	0,33	55,1	65,12	5,97
			2	3,24	0,22	54,58	69,99	5,78
			3	2,87	0,18	51,7	60,25	6,15
<b>Promedio</b>				<b>2,823</b>	<b>0,243</b>	<b>53,793</b>	<b>65,120</b>	<b>5,967</b>
T5	Caturra	Con-El Dor	1	2,67	0,26	60,18	62,26	5,97
			2	2,69	0,29	60,2	60,44	5,72
			3	3,22	0,23	54,8	64,09	6,23

<b>Promedio</b>				<b>2,860</b>	<b>0,260</b>	<b>58,393</b>	<b>62,263</b>	<b>5,973</b>
T6	Pache	Con-El Dor	1	3,15	0,28	56,58	60,98	5,09
			2	3,3	0,2	60,25	66,23	5,44
			3	3,02	0,21	64,1	55,73	4,74
<b>Promedio</b>				<b>3,157</b>	<b>0,230</b>	<b>60,310</b>	<b>60,980</b>	<b>5,090</b>
T7	Caturra	Con-Hua	1	2,92	0,22	62,25	66,52	3,77
			2	3,48	0,22	60,05	70,45	3,66
			3	3,48	0,19	59,9	62,59	3,88
<b>Promedio</b>				<b>3,293</b>	<b>0,210</b>	<b>60,733</b>	<b>66,520</b>	<b>3,770</b>
T8	Pache	Con-Hua	1	2,42	0,27	61,6	58,89	4,42
			2	3,77	0,24	57,88	64,88	4,67
			3	3,09	0,3	53,6	52,9	4,18
<b>Promedio</b>				<b>3,093</b>	<b>0,270</b>	<b>57,693</b>	<b>58,890</b>	<b>4,423</b>

Anexo 14.

Croquis de distribución de las plantas de café en la parcela experimental.

