



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables

Carrera de Ingeniería Agronómica

Establecimiento de la producción de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) asociados al cultivo de papa nativa (*Solanum* spp.) a través de cultivos trampa.

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Agrónoma.

AUTORA:

María Cristina Guamán Ojeda

DIRECTORA:

Ing. Narcisca de Jesús Urgiles Gómez PhD.

Loja –Ecuador

2024

Certificación

Loja, 13 de marzo de 2024

Ing. Narcisca de Jesús Urgiles Gómez PhD

DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

C E R T I F I C O:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Establecimiento de la producción de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) asociados al cultivo de papa nativa (*Solanum* spp.) a través de cultivos trampa**, previo a la obtención del título de Ingeniera Agrónoma, de la autoría de la estudiante María Cristina Guamán Ojeda, con cédula de identidad Nro.1150198123, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.



Firmado electrónicamente por:
**NARCISA DE JESUS URGILES
GOMEZ**

Ing. Narcisca de Jesús Urgiles Gómez PhD

DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **María Cristina Guamán Ojeda**, declaro ser autora del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Titulación, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.



Firma:

Cédula de Identidad: 1150198123

Fecha: 9 de abril de 2024

Correo electrónico: maria.c.guaman.o@unl.edu.ec

Celular: 0998944454

Carta de autorización por parte de la autora, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo, **María Cristina Guamán Ojeda** declaro ser autora del Trabajo de Titulación denominado: **Establecimiento de la producción de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) asociados al cultivo de papa nativa (*Solanum spp.*) a través de cultivos trampa**, como requisito para optar por el título de **Ingeniera Agrónoma**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los nueve días del mes de abril de dos mil veinticuatro.



Firma:

Autora: María Cristina Guamán Ojeda

Cédula: 1150198123

Dirección: Malacatos- Sector Chorrillos

Correo electrónico: maria.c.guaman.o@unl.edu.ec

Celular: 0998944454

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director de Trabajo de Titulación: PhD. Narcisa de Jesús Urgiles Gómez

Dedicatoria

A mis padres, Patricia y Benigno, quienes han sido mi mayor inspiración y apoyo incondicional a lo largo de este viaje académico. Su amor, sacrificio y aliento constante han sido la fuerza que me ha impulsado a alcanzar mis metas. Este logro es tanto suyo como mío.

A mi abuelita, María Juana por ser el gran ejemplo de lucha y sabiduría, quien ha estado conmigo en cada etapa y ha logrado plasmar amor, cariño y sobre todo esfuerzo en cada uno de sus familiares.

A mis queridos hermanos, Daniel Alejandro y Ana Cecilia, quienes siempre han estado a mi lado en cada momento y etapa. Su cariño y apoyo han sido una fuente inagotable de fuerza y determinación.

A mis mejores amigos, Yander Fernando y Ana Cristina, por su paciencia, comprensión y constante motivación durante este arduo proceso. Su apoyo inquebrantable ha sido fundamental para superar los desafíos y mantenerme enfocado en mis objetivos.

María Cristina Guamán Ojeda

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a la Universidad Nacional de Loja, Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, carrera de Ingeniería Agronómica, por proporcionar el ambiente propicio para la investigación y los recursos necesarios para llevar a cabo este estudio. También agradezco al personal administrativo y a los profesionales de la biblioteca por su asistencia y disposición.

Agradezco a mi directora de tesis, Ing. Narcisa de Jesus Urgiles Gomez, PhD, por su guía experta, paciencia y apoyo constante. Su orientación fue fundamental para dar forma a este proyecto y para mi crecimiento académico. De igual manera, a la bióloga Luisa Espinosa, Ing. Lucia Quichimbo, por la disposición y sugerencias brindadas en las partes técnicas del trabajo.

Agradezco a mis amigos cercanos y compañeros de estudio, Auliria, Angie, Karen, Eddy, Jairo, Lenin, Yander, por las experiencias compartidas, las colaboraciones enriquecedoras y el apoyo mutuo a lo largo de estos años. Juntos hemos enfrentado desafíos académicos y hemos celebrado logros, creando recuerdos que atesoraré.

Un agradecimiento especial a mi familia por su amor incondicional, comprensión y aliento constante. Su apoyo emocional ha sido mi mayor fortaleza y motivación.

Además, agradezco a mi mejor amigo que estuvo presente desde el inicio de esta etapa y gracias a su apoyo y compañía he podido culminar con éxito este proceso maravilloso.

Finalmente, agradezco aquellas personas que me acompañaron al inicio de la carrera y permitieron que continuara con este viaje académico, aquellos momentos vividos siempre serán recordados con mucho amor y respeto.

Con gratitud,

María Cristina Guamán Ojeda

Índice de contenido

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Índice de contenido	vii
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	x
Índice de anexos	xi
1. Título	1
2. Resumen	2
Abstract	3
3. Introducción	4
4. Marco teórico	6
4.1. Generalidades de las Micorrizas	6
4.1.1. <i>Definición</i>	6
4.1.2. <i>Tipos de micorrizas</i>	6
4.1.3. <i>Hongos micorrízicos arbusculares (HMA)</i>	7
4.2. Generalidades del cultivo de papa	11
4.2.1. <i>Centro de origen y distribución del cultivo de papa</i>	11
4.2.2. <i>Producción mundial y nacional del cultivo de papa</i>	11
4.2.3. <i>Importancia del cultivo</i>	13
5. Metodología	14
5.1. Metodología general.....	14
5.1.1. <i>Ubicación del área de muestreo</i>	14

5.1.2. Ubicación del área de ensayo	15
5.1.3. Tipo de investigación	15
5.1.4. Análisis estadístico	16
5.2. Metodología por objetivos	16
5.2.1. Metodología para el primer objetivo “Multiplicar los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) del cultivo de papa para mediante la aplicación de cultivos trampa elaborar un biofertilizante”	16
5.2.2. Metodología para el segundo objetivo “Identificar las características morfológicas de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) colonizadores de raíces del cultivo de papa nativa de la Sierra Sur de Ecuador”	19
6. Resultados	20
6.1. Resultados del primer objetivo “Multiplicar los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) del cultivo de papa para mediante la aplicación de cultivos trampa elaborar un biofertilizante”	20
6.1.1. Porcentaje de colonización de HMA en raíces de papa	20
6.1.2. Porcentaje de colonización de HMA en raíces del cultivo trampa	22
6.1.3. Obtención del biofertilizante de HMA	24
6.2. Resultados del segundo objetivo “Identificar las características morfológicas de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) colonizadores de raíces del cultivo de papa nativa de la Sierra Sur de Ecuador”	26
6.2.1. Número de esporas de HMA de los cultivos trampa	26
6.2.2. Identificación morfológica de los HMA.....	27
7. Discusión	34
8. Conclusiones.....	40
9. Recomendaciones	41
10. Bibliografía.....	42
11. Anexos	50

Índice de figuras

Figura 1. Bosquejo de las características morfológicas intercelulares de los hongos AM. (a)= apresorios; (ar) = arbusculos de AM tipo Arum intercelular; (ar-c) = bobina arbusculada y (c) = bobina de AM intracelular de tipo París; (s) = espora interradsical; (v) = vesículas.	8
Figura 2. Etapas de desarrollo de las micorrizas arbusculares.....	10
Figura 3. Ubicación de los sitios de muestreo de raíces de papa nativa de la Sierra Sur de Ecuador.....	14
Figura 4. Puntuación de colonización micorrízica y puntuación de abundancia arbuscular. ..	18
Figura 5. Colonización de HMA en raíces de papa nativa. F) Frecuencia de micorrizas, M) intensidad de la colonización o grado de micorrizas en el sistema radicular, m) intensidad de la colonización o grado de micorrizas en los fragmentos de la raíz, A) abundancia de arbusculos en el sistema radicular, a) abundancia de arbusculos en partes de micorrizas de fragmentos de raíz.	20
Figura 6. Observación de estructuras microscópicas de HMA en raíces de papa nativa bajo lente de 10x y 40x. A) hifas (h) intracelular. B) hifa (h) extracelular de HMA. C) hifas (h) y espora (e) de HMA. D y E) vesículas (v) de HMA. F) arbusculos (a) de HMA. 21	
Figura 7. Colonización de HMA en raíces del cultivo trampa de cebollín (<i>Allium schoenoprasum</i>) 12 semanas después de la siembra en condiciones de invernadero. F) Frecuencia de micorrizas, M) intensidad de la colonización o grado de micorrizas en el sistema radicular, m) intensidad de la colonización o grado de micorrizas en los fragmentos de la raíz, A) abundancia de arbusculos en el sistema radicular, a) abundancia de arbusculos en partes de micorrizas de fragmentos de raíz. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).	23
Figura 8. Observación de estructuras microscópicas de HMA en raíces de cebollín (<i>Allium schoenoprasum</i>) bajo lente de 10x y 40x. A) hifas (h) extracelular de HMA. B) hifa (h) intracelular. C) hifas (h) y espora (e) de HMA. D y E) vesículas (v) de HMA. F) arbusculos (a) de HMA.	24
Figura 9. Esquema de la obtención del biofertilizante de HMA mediante la implantación de cultivos trampa.....	25

Índice de tablas

Tabla 1. Características de los principales tipos de micorrizas	6
Tabla 2. Clasificación taxonómica del Phylum Glomeromycota de los HMA.....	9
Tabla 3. Producción mundial de papa por país	12
Tabla 4. Producción nacional y principales provincias productoras de papa	12
Tabla 5. Datos correspondientes a los puntos de colecta de cada muestra en las tres zonas de estudio	15
Tabla 6. Información de la cantidad, procedencia, planta hospedera y fecha de siembra de los cultivos trampa empleados en la multiplicación de HMA	25
Tabla 7. Resumen del número de esporas / 100 g de suelo de los cultivos trampa inoculados con micorrizas procedentes de las tres zonas de estudio.....	27
Tabla 8. Descripción morfológica de géneros de HMA identificados en tres zonas de estudio	28
Tabla 9. Resumen de la identificación de las morfoespecies de HMA encontrados en las muestras de suelo de los cultivos trampa inoculados con micorrizas de las tres zonas de estudio	33

Índice de anexos

Anexo 1. Siembra de fragmentos de raíces micorrizadas por HMA en cultivos trampa de cebollín	50
Anexo 2. Mantenimiento de los cultivos trampa a través del riego, fertilización y limpiado de fundas “sunbags”.	51
Anexo 3. Procedimiento para la tinción de HMA en raíces de papa y de cebollín (cultivo trampa).	51
Anexo 4. Procedimiento para la siembra masiva de inóculo de HMA en cultivo trampa (papa nativa).....	52
Anexo 5. Procedimiento de aislamiento, conteo e identificación de esporas de HMA.	53
Anexo 6. Fórmulas para determinar la colonización total de HMA mediante el método de Trouvelot et al. (1986).....	53
Anexo 7. Certificación de traducción Abstract.....	54

1. Título

Establecimiento de la producción de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) asociados al cultivo de papa nativa (*Solanum* spp.) a través de cultivos trampa.

2. Resumen

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son microorganismos del suelo que desempeñan un papel importante en la nutrición, crecimiento, resistencia y tolerancia de las plantas tanto a estrés abiótico como biótico. Los HMA establecen simbiosis con alrededor del 80% de especies de plantas incluida la papa (*Solanum* spp.). El cultivo de papa es uno de los cuatro cultivos más importantes a nivel mundial después del arroz, trigo, y maíz. Por lo tanto, el presente estudio se enfocó en multiplicar e identificar las características morfológicas de los HMA para el uso en el cultivo de papa nativa de la Sierra Sur de Ecuador que comprende las provincias de Loja, Azuay y Cañar. Por lo cual, se tomaron muestras de raicillas de plantas de papa nativa y se evaluó el porcentaje de colonización de HMA antes de utilizarlas como bioinóculo de HMA, posteriormente se procedió a establecer los cultivos trampa utilizando como planta huésped el cebollín y se evaluó el porcentaje de colonización de HMA después de 12 semanas. Finalmente, se realizó la caracterización de esporas de HMA para determinar morfoespecies de HMA. Según los resultados, el porcentaje de colonización por HMA en las raíces de las plantas de papa nativa obtenidas en campo fue mayor en el bioinóculo de la provincia del Azuay (90%) por el uso mínimo de insumos químicos. Mientras que el mayor porcentaje de colonización de HMA de las raíces de cebollín de los cultivos trampa se encontró en el inóculo de la provincia del Cañar, la cual está relacionada con la conservación de suelos y de biodiversidad de microorganismos recalcando el hallazgo de 593 esporas de HMA en 100 g suelo. Además, se identificaron veinte morfoespecies de HMA pertenecientes a cuatro géneros de HMA: *Glomus*, *Acaulospora*, *Sclerocystis*, *Scutellospora*, siendo el género *Glomus* el más abundante.

Palabras clave: Hongos micorrízicos, papa nativa, cultivo trampa, colonización de HMA, morfoespecies de HMA.

Abstract

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) are subterranean microorganisms crucial for plant nutrition, growth, resilience, and resistance to both abiotic and biotic stressors. AMF form symbiotic associations with approximately 80% of plant taxa, including *Solanum* spp., which includes potatoes. Potato cultivation ranks among the top four global crops, alongside rice, wheat, and maize. Therefore, this study aimed to propagate and characterize the morphological traits of AMF for use in native potato cultivation in Ecuador's Southern Sierra, covering the provinces of Loja, Azuay, and Cañar. Native potato root samples were evaluated for AMF colonization before being deployed as AMF bioinoculum. Subsequently, trap crops using chives as host plants were established, and AMF colonization was assessed after 12 weeks. Finally, AMF spores were characterized to identify AMF morphospecies. Results showed increased AMF colonization in the roots of field-sourced native potato plants using bioinoculum from Azuay province (90%), attributed to minimal chemical inputs. Conversely, maximal AMF colonization in chive roots from trap crops occurred with inoculum from Cañar province, correlating with soil preservation and microbial biodiversity, evidenced by the detection of 593 AMF spores per 100 g of soil. Additionally, twenty AMF morphospecies belonging to four genera were identified: *Glomus*, *Acaulospora*, *Sclerocystis*, and *Scutellospora*, with the genus *Glomus* predominating.

Keywords: Mycorrhizal fungi, native potato, trap crop, AMF colonization, AMF morphospecies.

3. Introducción

Los microorganismos del suelo, como los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), desempeñan un papel clave desde el punto de vista agrícola, ya que forman simbiosis con las raíces de las plantas, proporcionando un incremento en la absorción de nutrientes y agua (Séry et al., 2016), también han demostrado la capacidad de mejorar la tolerancia de las plantas tanto hacia factores de estrés bióticos como abióticos (Augé et al., 2015) y aplican mecanismos que protegen a la planta contra plagas y enfermedades (Weng et al., 2022). La mayoría de cultivos agrícolas como el trigo, el arroz, el maíz, la papa, el tomate, la cebolla, las legumbres y la soja forman simbiosis con los HMA (Gao et al., 2020).

La papa (*Solanum* spp) es un tubérculo nativo de los Andes y es una de las especies más significativas que se cultivan en todo el mundo con fines alimenticios e industriales (Deja-Sikora et al., 2020), cuenta con una producción mundial de 376 millones de toneladas (Mt) reportada en 2021 (FAOSTAT, 2023). En Ecuador, de acuerdo al Ministerio de Agricultura y Ganadería (2022), para el año de 2020, la producción bruta del cultivo de papa alcanzó el valor de 319 060 toneladas (t), en una superficie cosechada que bordeó las 13 000 hectáreas (ha), con un rendimiento promedio de 24,77 t/ha, siendo las provincias de Carchi, Cotopaxi, Chimborazo, Tungurahua, Pichincha y Bolívar las de mayor producción (Guzmán et al, 2015).

El cultivo nativo de papa en la sierra sur de Ecuador enfrenta una falta de conocimiento integral sobre la diversidad, identificación y multiplicación de los HMA asociados al mismo. Este vacío de conocimiento dificulta las prácticas agrícolas sostenibles, obstaculizando la preservación de los recursos genéticos de la papa y limita el desarrollo de técnicas innovadoras para mejorar la producción de papa en la región. Por lo tanto, es necesario abordar el problema de la comprensión insuficiente y documentación de las especies de HMA en el cultivo de papa nativa, con el fin de optimizar la salud del cultivo, la productividad y, en última instancia, contribuir a la agricultura sostenible y la seguridad alimentaria regional. Por otra parte, la multiplicación de HMA para su aplicación a gran escala sigue siendo limitada debido a que son microorganismos crípticos que viven exclusivamente en las raíces de sus plantas huésped o dentro del suelo como esporas o micelio latentes para poder sobrevivir.

En la actualidad, el crecimiento de la población mundial se relaciona con la necesidad de mejorar la producción de alimentos (Sonnino y Ruane, 2013). Este desafío plantea una importante tarea que requiere la innovación en el desarrollo de técnicas agrícolas, con el fin de aumentar la productividad y, al mismo tiempo, mitigar el impacto ambiental asociado con la agricultura (Etesami et al., 2021). Por ello, este estudio se fundamenta en los beneficios potenciales que los HMA pueden brindar a los cultivos, como es el caso de la papa.

Investigaciones previas han demostrado que las plantas de papa con micorrizas presentan un mejor crecimiento, tuberización, resistencia a patógenos y productividad en comparación con las plantas sin micorrizas (Deja-Sikora et al., 2020). También, los HMA aumentan el contenido de almidón, la materia seca y la gravedad específica de los tubérculos en papa (Lone et al., 2016). No obstante, obtener mayor identificación y comprensión de las asociaciones de HMA-hospedador facilitaría la selección específica de HMA para usar como inóculo en prácticas agrícolas sostenibles (Senés-Guerrero y Schubler, 2016).

Ante la relevancia que presentan los HMA y el cultivo de papa, el presente trabajo de investigación pretende hacer una evaluación de la situación micorrízico-arbuscular e identificar los posibles géneros de HMA que colonizan los cultivos de papa nativa del Sur de Ecuador, para lo cual, se seleccionaron varias localidades dentro de las provincias de Cañar, Azuay y Loja. Esta información es importante con el fin de generar bio conocimiento sobre las especies de HMA que colonizan el cultivo de papa nativa y de esta manera brindar alternativas ecológicamente saludables que promuevan una agricultura sustentable y sostenible a lo largo del tiempo.

Objetivo general

Multiplicar e identificar las características morfológicas de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) para el uso en el cultivo de papa (*Solanum* spp.) nativa de la Sierra Sur de Ecuador.

Objetivos específicos

- Multiplicar los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) del cultivo de papa para mediante la aplicación de cultivos trampa elaborar un biofertilizante.
- Identificar las características morfológicas de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) colonizadores de raíces del cultivo de papa nativa de la Sierra Sur de Ecuador.

4. Marco teórico

4.1. Generalidades de las Micorrizas

4.1.1. Definición

El término micorriza fue descrito por primera vez por Albert Bernhard Frank en el año 1887, haciendo referencia a las asociaciones simbióticas o al tipo de convivencia que ocurre entre dos o más organismos mutualistas, no perjudiciales, que son las raíces de la planta y micelios de los hongos (Tenorio, 2021). Esta asociación raíz-hongo tiene un papel clave en el mantenimiento de la productividad de las plantas en hábitats naturales y agrícolas (Brundrett y Tedersoo, 2018).

4.1.2. Tipos de micorrizas

Brundrett y Tedersoo (2018) mencionan que, de acuerdo a los criterios de diferenciación morfológica de los tejidos de la raíz y los linajes de la planta hospedante, existen cuatro tipos principales de micorrizas: micorrizas arbusculares (AM), ectomicorrizas (EcM), micorrizas ericoideas (ErM) y micorrizas de orquídeas (OrM) (Tabla 1).

Tabla 1. Características de los principales tipos de micorrizas

	Arbuscular (HMA)	Ectomicorrícico (EcM)	Ericoide (ErM)	Orquídea (OrM)
Dependencia de la planta	Mayormente obligatorio (supervivencia con competencia reducida)	Mayormente obligatorio (supervivencia con competencia reducida)	Obligatorio	Obligatorio para el desarrollo de plántulas y nutrición de adultos.
Beneficios para las plantas	Nutrición (nutrientes mineralizados), protección limitada	Nutrición (nutrientes minerales orgánicos simples), protección	Nutrición (nutrientes minerales orgánicos simples), protección limitada	Nutrición (mineralizada, nutrientes orgánicos, energía de carbono), protección limitada
Beneficios para los hongos	Energía de carbono, hábitat, aguas profundas de los árboles.	Energía de carbono, agua profunda de los árboles.	Energía de carbono, hábitat en raíces y suelo a través de la alelopatía.	Ninguno (probablemente no puede soportar hongos)

Fuente: Brundrett y Tedersoo, (2018).

4.1.3. Hongos micorrízicos arbusculares (HMA)

Chifetete y Dames (2020) describen a los HMA como microbios ubicuos del suelo que forman asociaciones simbióticas bio tróficas obligatorias con las raíces de más del 80 % de plantas vasculares, incluidas las especies de cultivos más importantes. Las especies de HMA se encuentran en la mayoría de los hábitats naturales y brindan una gama de servicios ecológicos importantes, por lo que reciben una atención cada vez mayor por su uso potencial en la agricultura sostenible (Chen et al., 2018).

4.1.3.1. Características morfológicas de los HMA.

Según Rodríguez (2021), al momento de ocurrir la formación de micorrizas se da origen a una serie de cambios fisiológicos en el hospedero, lo que conlleva la formación de estructuras de procedencia fúngica como esporas, arbusculos, vesículas e hifas (Fig. 1).

4.1.3.1.1. Esporas.

Las esporas son células reproductoras asexuales, que pueden estar de forma individual, en masas o asociadas a especies vegetales. Estas estructuras generan resistencia a los cambios ambientales desfavorables, por medio del engrosamiento de su capa o pared, permitiendo de esta manera entrar en latencia y así lograr supervivencia en el tiempo (Tenorio, 2021).

4.1.3.1.2. Arbúsculos.

Los arbusculos consisten en ramificaciones dicotómicas de la hifa que se hallan en el interior de la raíz, en esta estructura se llevan a cabo las actividades metabólicas que comprenden el transporte de nutrientes (Rodríguez, 2021).

4.1.3.1.3. Vesículas.

Son órganos de paredes delgadas que se encargan de almacenar lípidos y glicolípidos, se forman a partir del hinchamiento de una hifa terminal; estas estructuras pueden ser inter o intracelulares y se encuentran tanto en el interior como en el exterior del parénquima cortical. Cabe mencionar que las vesículas no se encuentran presentes en todos los géneros de HMA (Lalanguí, 2018).

4.1.3.1.4. Hifas.

Ha et al. (2020) manifiestan que las hifas son estructuras filamentosas que en conjunto forman un micelio. Existen tres tipos de hifas: las intercelulares que crecen entre la pared de las células de la raíz, las intracelulares crecen dentro de la pared de las células de la raíz y las extrarradicales que inician los puntos de colonización en una o varias raíces (Souza, 2015).

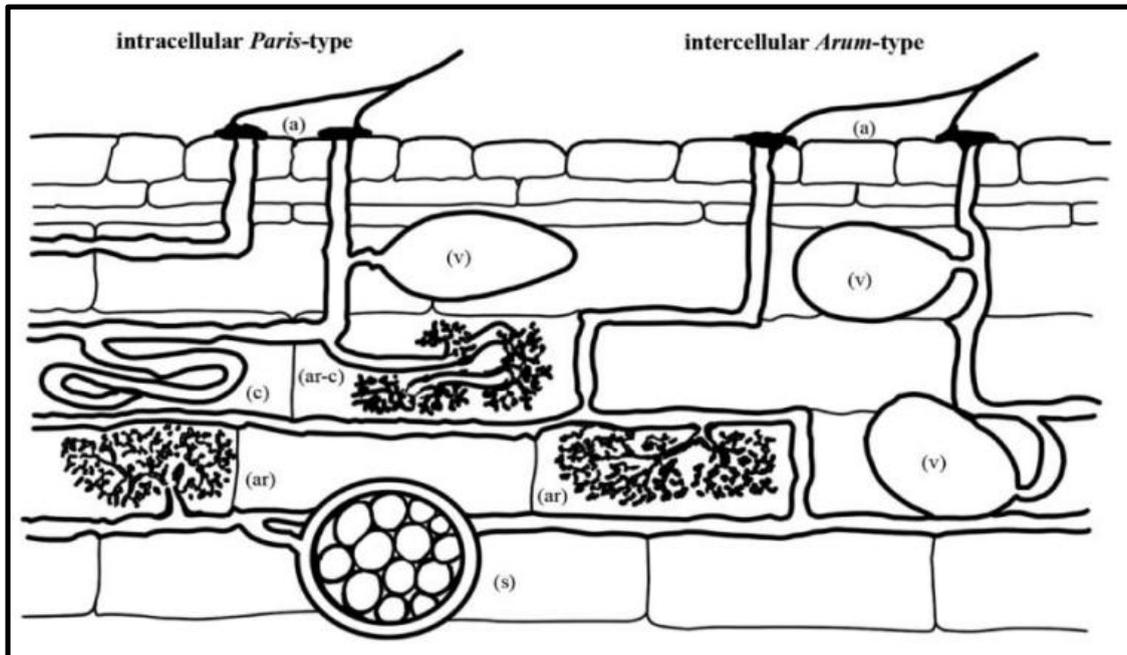


Figura 1. Bosquejo de las características morfológicas intercelulares de los hongos AM. (a)= apresorios; (ar) = arbuscúlos de AM tipo Arum intercelular; (ar-c) = bobina arbusculada y (c) = bobina de AM intracelular de tipo París; (s) = espora interradical; (v) = vesículas.

Fuente: Willis et al. (2013).

4.1.3.2. Taxonomía y clasificación de los HMA.

De acuerdo a Rodríguez (2021), los HMA pertenecen al phylum “Glomeromycota” que posee alrededor de 200 especies aproximadamente, comprende a la clase “Glomeromycetes” y cuatro órdenes: “Archaeosporales”, “Diversisporales”, “Glomales” y “Paraglomales” (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación taxonómica del Phylum Glomeromycota de los HMA

Phylum	Clase	Orden	Familia	Género
Glomeromycota	Glomeromycetes	Archaeosporales	Archeosporaceae	<i>Archeospora</i>
			Ambisporaceae	<i>Ambispora</i>
			Geosiphonaceae	<i>Geosiphon</i>
		Diversisporales	Acaulosporaceae	<i>Acaulospora</i>
				<i>Corymbiglomus</i>
Diversisporaceae	<i>Diversispora</i>			
	<i>Otospora</i>			
Gigasporaceae	<i>Redeckera</i>			
	<i>Cetraspora</i>			
	<i>Dentiscutata</i>			
	<i>Gigaspora</i>			
	<i>Intraornatospora</i>			
	<i>Paradentiscutata</i>			
	<i>Racocetra</i>			
Pacisporaceae	<i>Scutellospora</i>			
	<i>Pacispora</i>			
Sacculosporaceae	<i>Sacculospora</i>			
	Glomerales	Claroideoglomeraceae	<i>Claroideoglomus</i>	
<i>Funneliformis</i>				
Glomeraceae		<i>Glomus</i>		
		<i>Rhizophagus</i>		
		<i>Sclerocystis</i>		
		<i>Septoglomus</i>		
Paraglomerales	Paraglomeraceae	<i>Paraglomus</i>		

Fuente: Rodríguez, (2021).

4.1.3.3. Ciclo de vida de los HMA.

El ciclo de vida de los HMA empieza con la etapa simbiótica (Fig. 2), aquí se da la germinación de esporas de hongos en el suelo bajo condiciones ambientales favorables, espontáneamente sin la presencia de la planta huésped (Chifetete y Dames, 2020). Sin embargo, después de la germinación, una vez que la espora o las raíces de la planta con esporas están cerca de las raíces de la planta huésped, ésta libera la fitohormona estrigolactona, que desencadena la actividad fúngica. A su vez, los HMA liberan lipochito-oligosacáridos comúnmente conocidos como factores Myc (Harrison, 2012), éstos inician una coordinación genética y metabólica del hospedador de HMA que fomenta la diferenciación de las hifas y la extensión hacia las raíces hospedantes (Chen et al., 2018).

Después de la fase pre simbiótica, se forman los apresorios, denominados hipopodio, en las células epidérmicas de la raíz (Chifetete y Dames, 2020). A esto le sigue la formación de estructuras muy ramificadas denominadas como arbusculos intracelulares o bobinas de hifas y,

al mismo tiempo, se da origen a la producción de un micelio extraradical único (Huey et al., 2020).

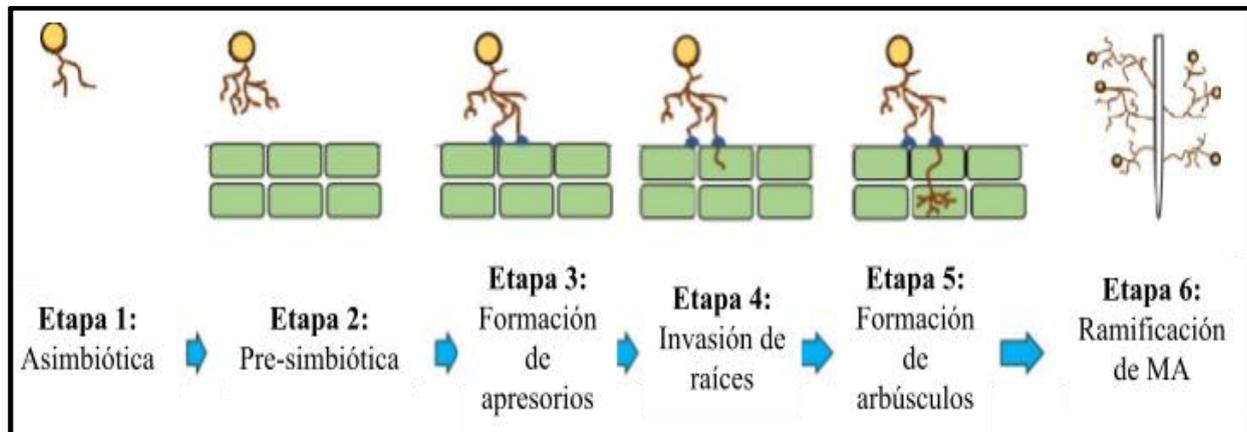


Figura 2. Etapas de desarrollo de las micorrizas arbusculares.

Fuente: Huey et al. (2020).

4.1.3.4. Beneficios de los HMA en la agricultura.

Los HMA se encuentran en la mayoría de los hábitats naturales y brindan una gama de servicios ecológicos importantes, su interacción simbiótica con las plantas permite obtener beneficios en conjunto (Bennett y Groten, 2022). Según algunos autores (Begum et al., 2019; Willis et al., 2013; Leifheit et al., 2013; Kumar y Saxena 2019; Samuel y Veeramani, 2021; Piliarová et al., 2019), los beneficios más importantes en la agricultura son los siguientes:

- Los HMA ayudan a las plantas hospedantes a regular al alza los mecanismos de tolerancia y prevenir la regulación a la baja de vías metabólicas clave.
- El extenso micelio de los HMA permite obtener del suelo nutrientes como fósforo, nitrógeno, zinc, cobre, hierro, potasio, calcio, magnesio y otros. Además, pueden causar un cambio en la absorción de más nutrientes al mismo tiempo, pero el efecto sobre los nutrientes individuales puede ser diferente.
- De acuerdo a varios estudios, se ha demostrado que la aplicación de micorrizas puede reducir de manera efectiva el uso excesivo de insumos de fertilizantes químicos, especialmente de fósforo. En este sentido, los HMA podrían considerarse como un reemplazo de los fertilizantes inorgánicos en un futuro cercano.
- La inoculación de HMA mejora la acumulación de materia seca y aumenta la absorción de humedad del agua, lo que mejora la tolerancia de las plantas contra estrés como la sequía y la salinidad. Este beneficio de tolerancia se debe especialmente a las hifas extraradicales que tienen la capacidad de expandirse en áreas extensas y también se relaciona

con el hecho de que los endófitos tienen un impacto en el aumento de la conductividad de las hojas, la transpiración y la ingesta de fósforo y potasio.

- Otros servicios importantes en contextos naturales y agrícolas es la mejora de la estructura del suelo y la reducción de la lixiviación de nutrientes del suelo.
- Adicionalmente, tienen el potencial de reducir el estrés de las plantas mediante la acumulación e inmovilización de metales pesados en suelos contaminados. Esto es debido a que el metal pesado es inmovilizado por los ácidos orgánicos exudados por las hifas.

4.2. Generalidades del cultivo de papa

4.2.1. Centro de origen y distribución del cultivo de papa

El cultivo de papa tiene su centro de origen en América del Sur. Según reportes, este cultivo se domesticó en los Andes de Sudamérica, concretamente en el país de Bolivia, entre los lagos Titicaca y Poopó hace aproximadamente 10 000 a 7 000 años, no obstante, los primeros vestigios se hallaron en el cañón de Chilca, al sur de Lima en Perú que datan de hace 10 500 años de antigüedad (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019).

Dátiles y Acevedo-Rodríguez (2022) señalan que la especie *Solanum* spp se encuentra distribuida en las Indias Occidentales y las regiones altas de Mesoamérica, así como en toda Europa, en gran parte de Asia y en muchas otras regiones. En Ecuador el cultivo de papa se encuentra distribuido principalmente en la región Sierra en las provincias de Cañar, Carchi, Chimborazo, Cotopaxi, Galápagos, Napo, Pichincha, Sucumbíos y Tungurahua (Cuesta et al., 2022).

4.2.2. Producción mundial y nacional del cultivo de papa

El cultivo de papa se produce en un aproximado de 20 millones de hectáreas de tierras agrícolas en todo el mundo y la producción total mundial del cultivo sobrepasa los 300 millones de toneladas métricas (Devaux et al., 2010). El mayor productor mundial de papa es China, seguido de India, Ucrania, Rusia y Estados Unidos (Tabla 3).

Tabla 3. Producción mundial de papa por país

País	Producción (t)	Producción (Kg)	Superficie (ha)	Rendimiento (Kg/ha)
China	94 362 175	64,8	4 813 542	18 764
India	54 230 000	36 311	2 151 000	22 561,1
Ucrania	21 356 320	532 464	1 319 900	17 049,8
Rusia	18 295 535,1	152 474	1 313 495	17 049,9
Estados Unidos	18 582 370	62 872	414 115	49 762,4

Fuente: FAOSTAT, (2023).

En Ecuador, de acuerdo a Guzmán et al. (2015), la producción se concentra principalmente en las provincias de la sierra, siendo las provincias de Carchi, Cotopaxi, Chimborazo, Tungurahua, Pichincha y Bolívar las de mayor relevancia (Tabla 4). De acuerdo al Ministerio de Agricultura y Ganadería (2022), para el año de 2020, la producción bruta del cultivo de papa alcanzó el valor de 319 060 toneladas, en una superficie cosechada que bordeó las 13 000 hectáreas, con un rendimiento promedio de 24,77 t/ha (Tabla 4).

Tabla 4. Producción nacional y principales provincias productoras de papa

Provincia	Superficie (ha)	Producción (t/ha)	Rendimiento (t/ha)
Nacional	12 882	319 060	24,77
Carchi	4 468	138 642	31,03
Cotopaxi	3 099	69 263	22,35
Chimborazo	2 237	59 325	26,52
Tungurahua	1 987	58 398	29,39
Pichincha	1 425	42 052	29,51
Bolívar	1 466	41 283	28,16
Azuay	1 622	19 610	12,09
Cañar	696	19 530	28,06
Loja	537	1 589	2,96

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ganadería, (2022).

4.2.3. Importancia del cultivo

El cultivo de papa se ha convertido en el cuarto cultivo alimenticio más importante del mundo después del arroz, maíz y trigo (FAOSTAT, 2023) y aproximadamente 1,4 mil millones de personas consumen papa regularmente. También genera ingresos para los pequeños productores, ofrece una fuente baja en grasas y alta en fibra de carbohidratos saludables ricos en antioxidantes y nutrientes, poseen más proteínas que el maíz y casi el doble de calcio (CIP, 2017). Además, el cultivo de papa genera menos emisiones de gases de efecto invernadero que otros cultivos importantes (Datiles y Acevedo-Rodríguez, 2022).

Se han encontrado más de 5 000 variedades de papas a nivel mundial, de las cuales aproximadamente 4 000 variedades se encuentran en los Andes, cada una de estas variedades se caracteriza por presentar diferentes formas, colores y tamaños (Dobnik et al., 2021). De acuerdo a Torres et al. (2023), las variedades más conocidas son: Uvilla, Yema de huevo, Leona negra, Coneja negra, Coneja blanca, Puña, Calvache, Chaucha colorada, Santa Rosa y Carrizo.

Tabla 5. Datos correspondientes a los puntos de colecta de cada muestra en las tres zonas de estudio

Provincia	Muestra	Variedad	Cantón	Parroquia	Altitud (msnm)	Coordenadas	Código
Loja	1	Chaucha negra	Saraguro	Saraguro	3800	Latitud: 3° 31' 38" S Longitud: 79° 43' 41" O	UNL-BG-006-Lo
	2	Papa negra	Saraguro	San Lucas	2598	Latitud: 3° 37' 47" S Longitud: 79° 11' 24" O	UNL-BG-035-Lo
	3	Papa negra	Saraguro	Urdaneta	2428	Latitud: 3° 36' 24" S Longitud: 79° 12' 49" O	UNL-BG-037-Lo
	4	Chaucha amarilla	Saraguro	Urdaneta	2644	Latitud: 3° 37' 57" S Longitud: 79° 11' 37" O	UNL-BG-038-Lo
	5	Chaucha amarilla	Saraguro	Urdaneta	2532	Latitud: 3° 37' 50" S Longitud: 79° 14' 15" O	UNL-BG-039-Lo
Azuay	1	Chaucha roja	Paute	Tomebamba	3 326	Latitud: 00° 22' 8,9" S Longitud: 78° 33' 23,7" O	UNL-BG-001-Az
	2	Cuchicaca	Paute	Tomebamba	3 326	Latitud: 00° 22' 8,9" S Longitud: 78° 33' 23,7" O	UNL-BG-002-Az
	3	Chaucha amarilla	Paute	Dug Dug	3390	Latitud: 2° 42' 16,9" S Longitud: 78° 42' 23,3" O	UNL-BG-003-Az
	4	Naranjilla	Paute	Tomebamba (Paja)	3326	Latitud: 2° 42' 16,9" S Longitud: 78° 42' 23,3" O	UNL-BG-004-Az
	5	Suscaleña	San Fernando	Chumblín	2797	Latitud: 3° 7' 31,5" S Longitud: 79° 14' 28,9" O	UNL-BG-006-Az
Cañar	1	Bolona	Cañar	Chorocopte	3369	Latitud: 2° 35' 24,7" S Longitud: 78° 57' 41,6" O	UNL-BG-003-Cñ
	2	Nariz morada	Cañar	Chorocopte	3369	Latitud: 2° 35' 24,7" S Longitud: 78° 57' 41,6" O	UNL-BG-004-Cñ
	3	Chaucha amarilla	Cañar	Zhud	2986	Latitud: 2° 26' 17" S Longitud: 78° 54' 14,9" O	UNL-BG-020-Cñ
	4	Yema de huevo	Cañar	Ingapirca	3254	Latitud: 2° 34' 4,4" S Longitud: 78° 51' 16" O	UNL-BG-033-Cñ
	5	Chaucha amarilla	Azogues	Pindilig	2749	Latitud: 2° 37' 24,3" S Longitud: 78° 41' 17,1" O	UNL-BG-035-Cñ

5.1.2. Ubicación del área de ensayo

El ensayo se llevó a cabo en el invernadero y laboratorio de fisiología vegetal de la FARNR de la Universidad Nacional de Loja, la misma que se encuentra en la Ciudadela Universitaria “Guillermo Falconí Espinosa” sector la Argelia, perteneciente a la parroquia San Sebastián de la Ciudad y Provincia de Loja.

5.1.3. Tipo de investigación

El presente estudio es de tipo descriptivo no experimental mismo que tiene como objetivo recopilar y describir información cualitativa y cuantitativa de las especies de HMA existentes en las raíces del cultivo de papa nativa en la sierra sur de Ecuador, se describirán sus

principales características morfológicas y su multiplicación para la obtención de inóculo de HMA.

5.1.4. Análisis estadístico

Los datos de las variables número de esporas y porcentaje de colonización fueron tabulados en el programa Excel y para comparar las medias se empleó el análisis estadístico de ANOVA y el test de Tukey en el programa InfoStat. Para la parte morfológica se utilizó un archivo de Excel con las principales características de las esporas de hongos micorrízicos como: color, tamaño, forma, etc., de acuerdo al homepage: <https://invam.ku.edu/classification>

5.2. Metodología por objetivos

5.2.1. Metodología para el primer objetivo “Multiplicar los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) del cultivo de papa para mediante la aplicación de cultivos trampa elaborar un biofertilizante”

5.2.1.1. Colecta de raíces.

En primer lugar, se procedió a retirar la planta de papa del suelo para cortar y seleccionar las raíces sanas, posteriormente se colocaron las raicillas en funda ziploc misma que fueron correctamente etiquetadas con los datos de la provincia, cantón y nombre de la especie nativa encontrada. Una parte de las raíces fueron introducidas en tubos de plásticos de laboratorio con concentración al 50% de alcohol para su conservación luego de haber sido limpiadas con agua para eliminar los residuos de suelo adheridos a las estructuras radiculares.

5.2.1.2. Siembra de cultivos trampa.

Primeramente, se colocó en cada maceta sustrato de arena de mina previamente esterilizado en autoclave tres veces a 1,1 kg/cm² por un periodo de tres horas entre cada uno. En las macetas con sustrato se realizó un hoyo en el centro y se colocó quince fragmentos de raíces de aproximadamente 2 cm de cada variedad por duplicado, junto a la raíz se sembraron semillas certificadas de cebollin (*Allium schoenoprasum*). Seguidamente se llevó a cabo la fertilización, para lo cual se colocó un gramo de fertilizante de liberación lenta “Osmocote” en cada maceta y después se regó cada maceta con agua destilada.

Las macetas se mantuvieron en fundas plásticas con filtro “Sunbags” (Sigma-Aldrich, Darmstadt, Germany), las cuales permanecieron cerradas para evitar la contaminación y mantener un microclima adecuado para las plántulas, se dejó por un periodo de tres a cuatro

meses a temperatura ambiente, en el invernadero de fisiología vegetal de la Universidad Nacional de Loja. El riego se llevó a cabo cada quince días y la fertilización cada mes. Se establecieron dos macetas por cada variedad encontrada en cada zona de estudio, dando un total de 30 macetas.

5.2.1.3. Tinción de HMA.

La tinción de HMA se realizó en dos momentos, la primera cuando se colecto las raíces directamente en campo (raíces de papa) y la segunda cuando se colecto las raíces del cultivo trampa (raíces del cebollín) 12 semanas después de la siembra. Para esta actividad se colocaron las raíces de cada muestra en una caja petri y con ayuda de unas pinzas se procedió a lavar muy bien con agua destilada para eliminar los residuos de suelo. Una vez que las raíces se encontraban limpias se colocaron en un tubo Falcon y se procedió a aclarar las raíces, para lo cual agregamos KOH al 10 % hasta cubrir la raíz por 25 min a 70°C, luego eliminamos el reactivo del tubo y lavamos las raíces tres veces con agua destilada. Seguidamente agregamos HCL al 1 % por 10 min a temperatura ambiente para luego retirar el reactivo y agregar el azul de metileno, incubamos por 25 min a 70°C. Se agregó ácido láctico 50 % y se dejó reposar por 24 h, pasado el tiempo se retiró el ácido láctico y se colocó nuevamente azul de metileno por un tiempo de 25 min a 70°C.

5.2.1.4. Montaje de raíces.

Luego de la tinción se procedió al montaje de las raíces donde se obtuvieron 3 montajes por muestra teniendo un total de 42 portaobjetos a evaluar. En cada portaobjeto se colocaron de forma aleatoria 10 segmentos de las raíces de 1 cm en paralelo. Los portaobjetos se cubrieron con cubreobjetos aplicando PVLG (polivinil alcohol lactofenol), se dejaron secar durante 24 h y se procedió a la observación en el microscopio bajo un aumento de 10x y 40x. Este procedimiento se llevó a cabo para las muestras de raíces de papa y para las muestras del cultivo trampa (raíces de cebollín) 12 semanas después de la siembra.

5.2.1.5. Porcentaje de colonización.

Para evaluar la estimación de la colonización de raíces por HMA se basó en el método de Trouvelot et al. (1986) donde se tienen en cuenta las siguientes variables: Frecuencia de micorrizas en el sistema raíz (F %); intensidad de la colonización micorrízica en el sistema radicular (M %); intensidad de la colonización micorrízica en los fragmentos de la raíz (m %);

abundancia de arbusculos en partes micorrízicas de fragmentos de raíz (a %); abundancia de arbusculos en el sistema radicular (A %) (Fig. 4).

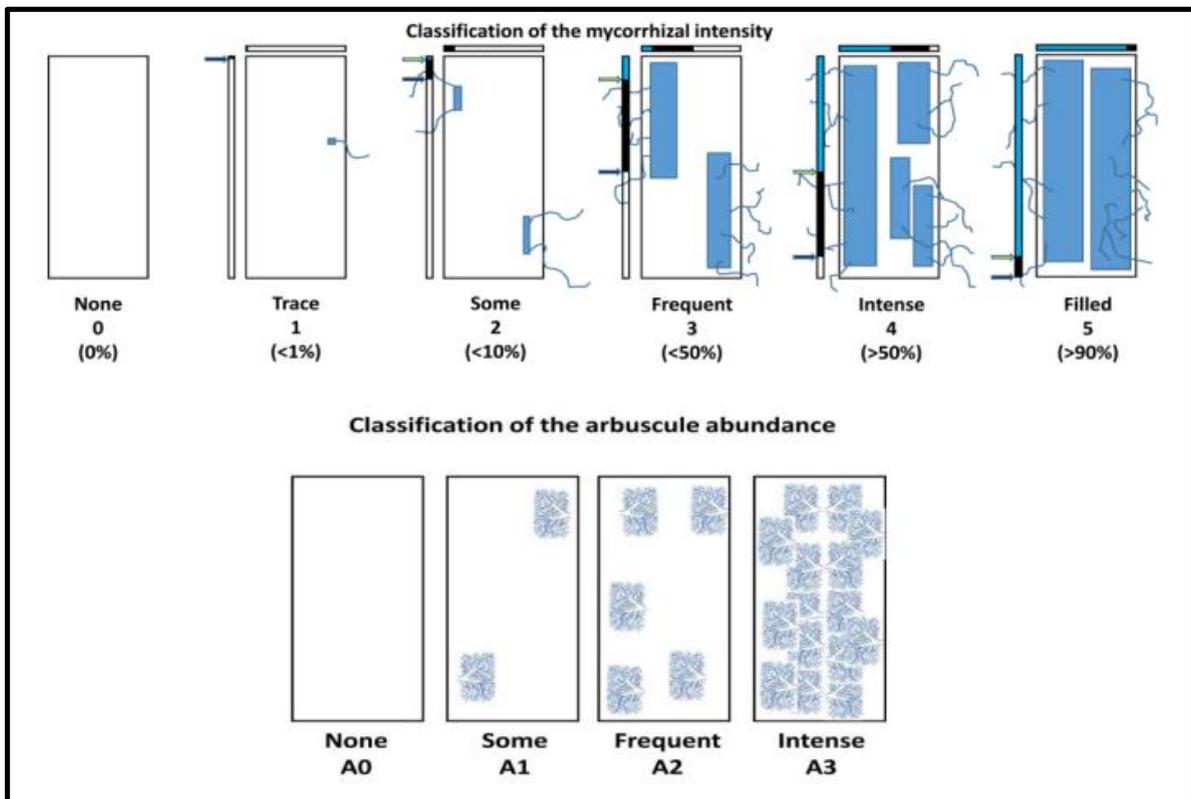


Figura 4. Puntuación de colonización micorrízica y puntuación de abundancia arbuscular.

Fuente: Trouvelot et al. (1986).

5.2.1.5. Siembra masiva en cultivos trampa.

Después de la multiplicación inicial de inóculos de hongos micorrízicos arbusculares, se realizó la multiplicación masiva de inóculos mediante cultivos trampa. Para ello, en canecas de 0,4 m³ se colocó 50 % arena de mina (Ar), 25 % de tierra negra (TN) y 20 % de materia orgánica (MO) y 5 % tierra de las macetas de los cultivos trampa de cebollín (sustrato + segmentos de las raíces + micelio + esporas). En cada caneca se sembraron semillas de papa nativa. Toda la configuración del sistema se cultivó bajo condiciones controladas o semicontroladas en invernadero para controlar fácilmente la humedad y la temperatura. Se estableció una cubeta por localidad, es decir, tres cubetas en total a manera de potenciar el inóculo de HMA para el cultivo de papa nativa en el campo.

5.2.2. Metodología para el segundo objetivo “Identificar las características morfológicas de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) colonizadores de raíces del cultivo de papa nativa de la Sierra Sur de Ecuador”

5.2.2.1. Conteo de esporas de HMA.

La cuantificación de esporas de HMA se realizará a través de la metodología de tamizado húmedo y decantación propuesta por Restrepo et al. (2019) con algunas modificaciones. Se colocaron 15 g de suelo en un tubo de ensayo y se añadió agua hasta cubrir el suelo. Luego con ayuda de una espátula se procedió a mezclar el interior del tubo Falcon. Posteriormente se vació la muestra en un tamiz de 0,5 mm y agregamos agua para que pase la mayor cantidad de muestra de suelo posible en el tamiz de 0,038 mm, esperamos a que se cuele el agua sobrante y con ayuda de la espátula colocamos el suelo sobrante en un tubo Falcon. Seguidamente se llevó a cabo la extracción de las esporas usando un gradiente de centrifugación con sacarosa al 80 %, durante 5 minutos a 3 500 rpm. Las tres cuartas partes del contenido de los tubos se depositarán en el tamiz de 0,038 mm, se lavó durante 3 minutos para retirar la sacarosa y se transfirió a un tubo Falcon. Luego de ello, colocamos la muestra resultante en un filtro depositado en una caja de Petri, con el fin de realizar posteriormente el conteo de las esporas en un estereoscopio. Este resultado fue expresado en número de esporas/ 100 g de suelo.

5.2.2.2. Caracterización morfológica.

Para llevar a cabo la caracterización morfológica de los HMA, se seguirá la metodología propuesta por Urgiles-Gómez et al. (2020) para lo cual se realizará montajes de las esporas obtenidas anteriormente. Se colocó en un portaobjetos las esporas y se añadió una gota de Reactivo de Melzer y una gota de PVLG, y seguidamente se llevarán las placas al microscopio para la observación con el lente de 40x, para llevar a cabo la caracterización se basará en criterios morfológicos de las esporas como: el tamaño, el color presentado al observar en el microscopio, la forma de la espora, la coloración de las capas y de las láminas de la espora al reaccionar con el reactivo de Melzer. Los resultados serán comparados mediante el empleo de las claves de International Culture Collection of Arbuscular and Vesicular-Arbuscular Endomycorrhizal Fungi (2018) y las descripciones originales de Glomeromycota de la página web AMF PHYLOGENY <http://www.amf-phylogeny.com/>

6. Resultados

6.1. Resultados del primer objetivo “Multiplicar los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) del cultivo de papa para mediante la aplicación de cultivos trampa elaborar un biofertilizante”.

6.1.1. Porcentaje de colonización de HMA en raíces de papa

Para corroborar la presencia de simbiosis entre los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y variedades de papa nativa se tiñeron las raíces colectadas directamente del campo y se evaluaron al microscopio para determinar el porcentaje de colonización. En la figura 5 se presentan los porcentajes de colonización de HMA en raíces de papa en las tres zonas de estudio. Los datos obtenidos no presentaron diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$), sin embargo, los porcentajes de las variables evaluadas variaron entre las zonas de estudio. El porcentaje de frecuencia de micorrizas en el sistema radicular (F %) fue mayor en los fragmentos de raíces de las muestras de Azuay (90,7 %) con respecto a las de Loja (87,5 %) y Cañar (60,7 %). Es importante resaltar que la colonización por parte de HMA en raíces de papa fue superior al 50 % en todas las muestras estudiadas, lo que quiere decir que todas las muestras presentaron asociación entre los HMA y el sistema radicular.

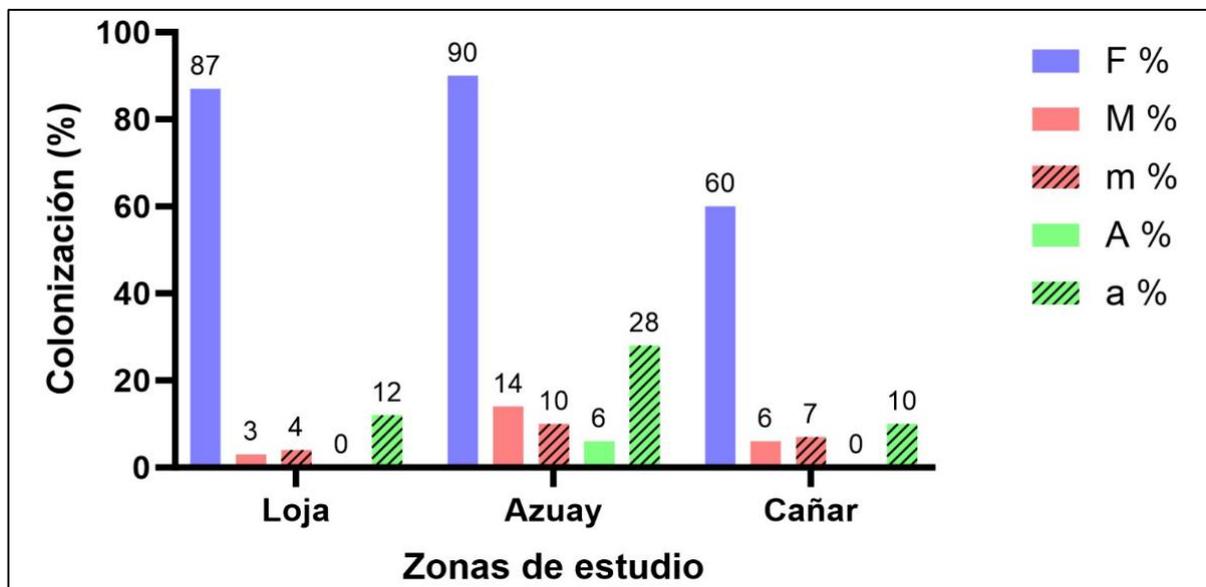


Figura 5. Colonización de HMA en raíces de papa nativa. F) Frecuencia de micorrizas, M) intensidad de la colonización o grado de micorrizas en el sistema radicular, m) intensidad de la colonización o grado de micorrizas en los fragmentos de la raíz, A) abundancia de arbusculos en el sistema radicular, a) abundancia de arbusculos en partes de micorrizas de fragmentos de raíz.

A pesar de que la simbiosis micorrízica ha logrado establecerse en la raíz del cultivo de papa, los porcentajes de intensidad de colonización (M % y m %) son bajos. Las muestras de Azuay son las que presentaron mayor porcentaje de intensidad o grado de colonización de micorrizas con 14,2 % para el sistema radicular y 10 % para fragmentos de raíz en comparación con las de Loja que mostraron los valores más bajos de 3,7 % y 4,1 % para intensidad de la colonización de micorrizas en el sistema radicular y en los fragmentos de la raíz respectivamente.

Por otro lado, el rango de colonización por arbuscúlos tanto en el sistema radical como en fragmentos de raíz fue de 0,5 % a 6,7 % y de 10,3 % a 28,4 % respectivamente (Fig. 5). La mayor abundancia de arbuscúlos pertenecen a las muestras de Azuay, mientras que en Cañar y Loja la presencia de arbuscúlos fue mínima, esto puede atribuirse a la posible necesidad de nutrientes que se encuentran en el suelo o al corto tiempo de vida que poseen estas estructuras. De igual manera se pudo contrastar la presencia de hifas, esporas y vesículas dentro de las raíces de papa (Fig. 6).

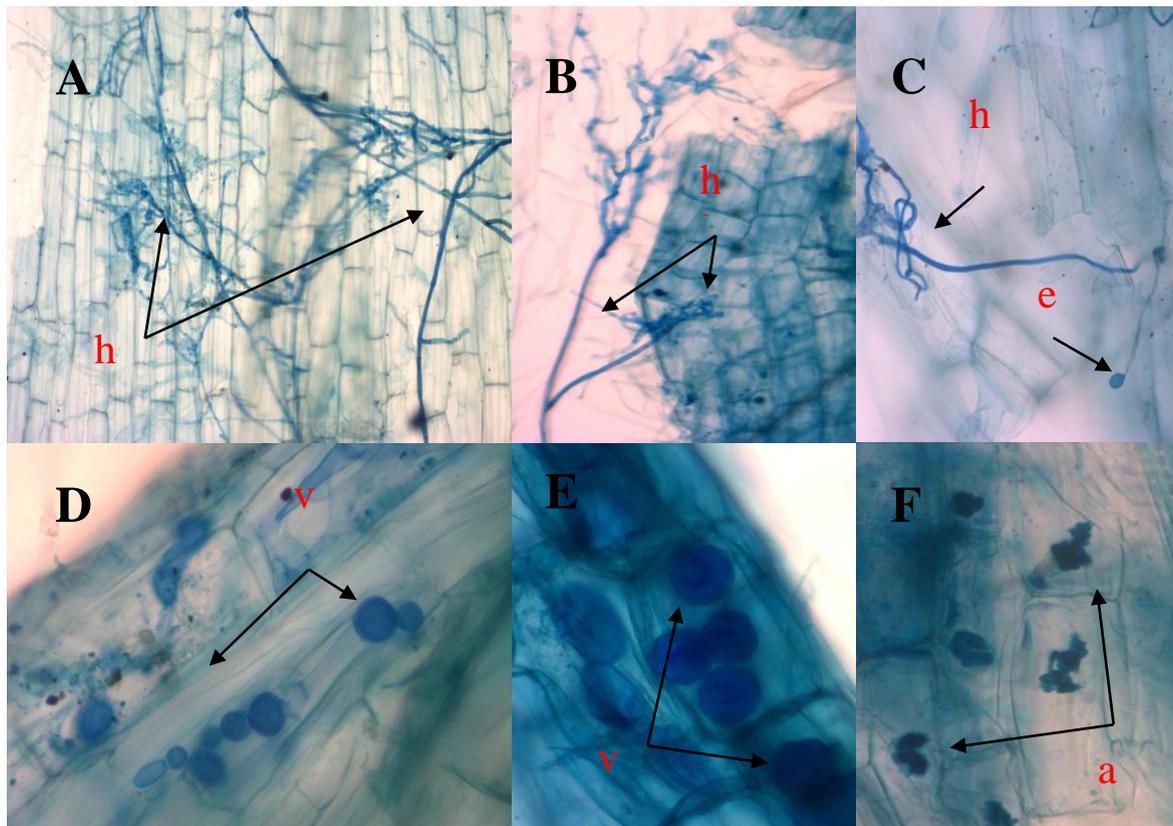


Figura 6. Observación de estructuras microscópicas de HMA en raíces de papa nativa bajo lente de 10x y 40x. A) hifas (h) intracelular. B) hifa (h) extracelular de HMA. C) hifas (h) y espóra (e) de HMA. D y E) vesículas (v) de HMA. F) arbuscúlos (a) de HMA.

6.1.2. Porcentaje de colonización de HMA en raíces del cultivo trampa

Para estimar el establecimiento y multiplicación de los HMA se determinó el porcentaje de colonización 12 semanas después de la siembra, tiempo suficiente para que los HMA se encuentren presentes en las raíces de las plantas de cebollín, mismas que se utilizaron como planta huésped para el cultivo trampa de HMA, ya que autores como Cruz y Morón-Ríos (2021) mencionan que 4 semanas es el tiempo mínimo para que se establezcan los HMA y colonicen.

Los resultados obtenidos respecto a la frecuencia de micorrizas en el sistema radicular (F %) no presentaron diferencias significativas ($p= 0,0865$), aunque se observa que los porcentajes fueron mayores a los encontrados a nivel de campo en raíces de papa, siendo los cultivos trampa inoculados con fragmentos de raíces con micorrizas provenientes de la provincia de Loja y Cañar los que destacan al presentar mayor frecuencia de colonización con 98,3 % y 92,7 % respectivamente (Fig. 7). Caso contrario a los cultivos trampa cultivados con inóculos provenientes de la provincia de Azuay, donde se obtuvo un valor de 74,0 %. Sin embargo, el porcentaje es superior al 50,0 %, lo que indica que si se estableció una simbiosis.

En cuanto a la intensidad de la colonización de micorrizas (M y m), indicador que expresa la cantidad porcentual de estructuras fúngicas en el interior de la raíz, presentó diferencias significativas en las muestras evaluadas ($p= 0,0232$ y $0,0203$). Los cultivos trampa establecido con inóculo procedentes de Cañar tienen la mayor intensidad o grado de micorrizas con 36,1 % y 37 % de intensidad en el sistema radicular y en los fragmentos de la raíz respectivamente. Mientras que el cultivo trampa establecido con raíces colonizadas procedentes de Azuay tienen los valores más bajos de 5,8 % en el sistema radicular y 7,4 % en los fragmentos de la raíz (Fig. 7). Hasta el momento se ha informado que existe la posibilidad de que se dé una colonización específica debido a la especificidad del hongo huésped, por ejemplo, los inóculos de HMA presentes en las muestras de Cañar y Loja de este estudio pueden adaptarse mejor a los cultivares de cebollín y es por ello que poseen mejores porcentajes de intensidad de colonización de micorriza.

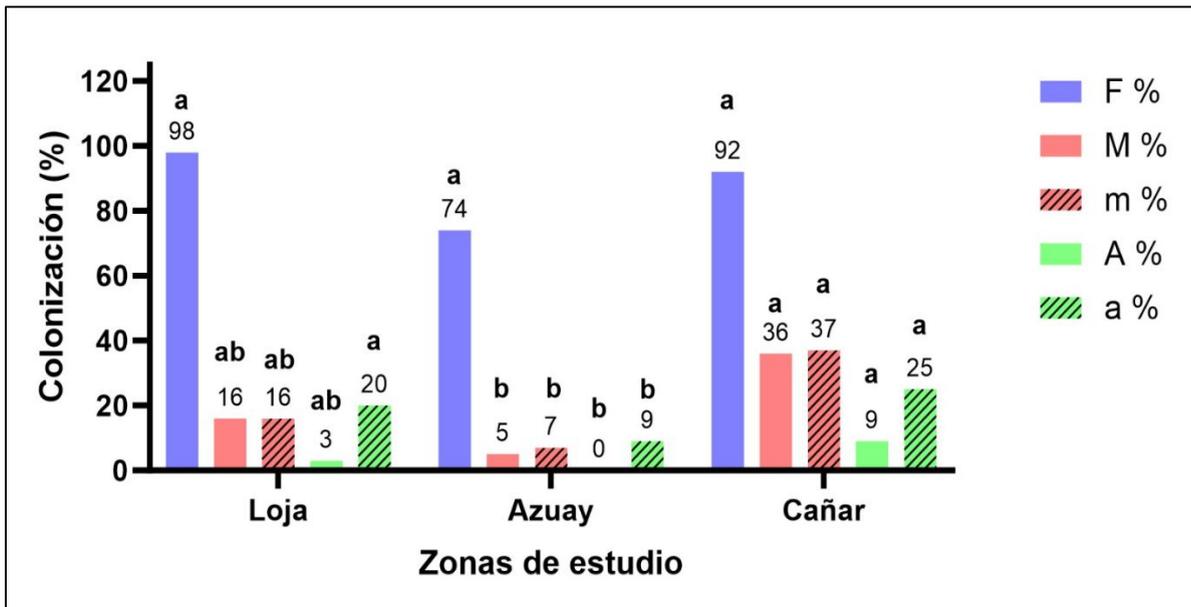


Figura 7. Colonización de HMA en raíces del cultivo trampa de cebollín (*Allium schoenoprasum*) 12 semanas después de la siembra en condiciones de invernadero. F) Frecuencia de micorrizas, M) intensidad de la colonización o grado de micorrizas en el sistema radicular, m) intensidad de la colonización o grado de micorrizas en los fragmentos de la raíz, A) abundancia de arbusculos en el sistema radicular, a) abundancia de arbusculos en partes de micorrizas de fragmentos de raíz. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Al observar bajo el microscopio las raicillas teñidas se constató la presencia de arbusculos y mediante el análisis ANOVA se determinó que el porcentaje de abundancia arbuscular tanto en el sistema radical (A %) como en partes micorrízicas de fragmentos de raíz (a %) tuvieron diferencias estadísticas significativas en los cultivos trampa de las tres zonas de estudio ($p = 0,0165$ y $0,0009$). Los mejores resultados de abundancia arbuscular en el sistema radical se obtuvieron en las raíces del cebollín inoculadas con los fragmentos de raíces con presencia de micorrizas procedentes de la provincia de Cañar con un promedio de 9,8 % (Fig. 7). Respecto a la abundancia de arbusculos en partes micorrízicas de fragmentos de raíz (a %), los mejores valores promedios corresponden a las raíces inoculadas con fragmentos de raíces con micorrizas obtenidas de la provincia de Cañar y Loja con 25,9 % y 20,4 % respectivamente (Fig. 7). Las estructuras más comunes fueron las hifas, que aparecieron en todas las muestras, también se encontró algunas vesículas (Fig. 8) por el hecho de que la formación de estas estructuras de almacenamiento depende del tipo de hongo micorrízico, de su desarrollo dentro de la raíz y de los factores ambientales.

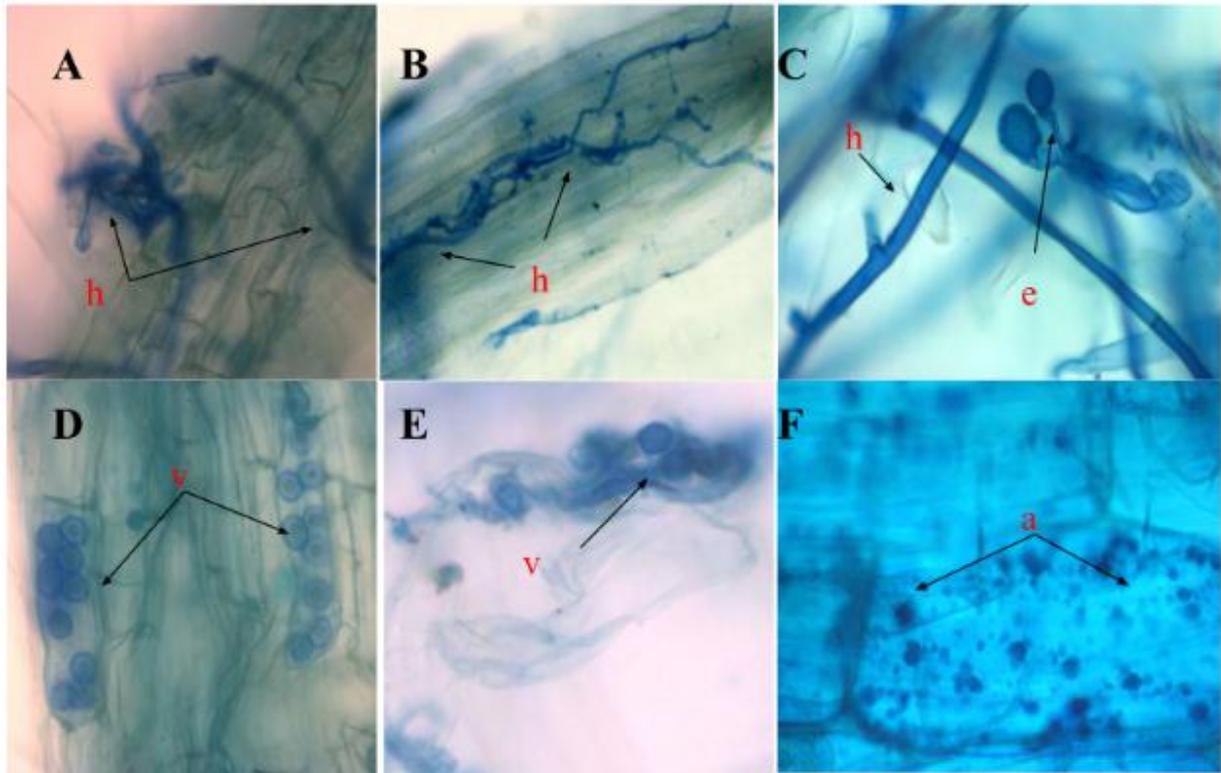


Figura 8. Observación de estructuras microscópicas de HMA en raíces de cebollín (*Allium schoenoprasum*) bajo lente de 10x y 40x. A) hifas (h) extracelular de HMA. B) hifa (h) intracelular. C) hifas (h) y espora (e) de HMA. D y E) vesículas (v) de HMA. F) arbusculos (a) de HMA.

6.1.3. Obtención del biofertilizante de HMA

Una vez realizado el establecimiento y multiplicación de HMA en plantas de cebollín como cultivo trampa, se realizó la multiplicación masiva del inóculo obtenido en aquellos cultivos con la finalidad de obtener material biológico de HMA para elaborar biofertilizante para el cultivo de papa nativa, teniendo en consideración que los biofertilizantes son una combinación de compuestos naturales que se utilizan para aumentar la fertilidad del suelo y son una opción para el agricultor que le permite enfrentar los altos costos de la fertilización mineral y disminuir los efectos contaminantes al ambiente. En la tabla 6 se presenta información de la procedencia del bioinóculo utilizado para el presente estudio, las especies de planta utilizada como cultivo trampa y la respectiva fecha de siembra.

Tabla 6. Información de la cantidad, procedencia, planta hospedera y fecha de siembra de los cultivos trampa empleados en la multiplicación de HMA

Cantidad	Procedencia	Planta hospedera	Fecha (inicial-final)
10 macetas	Loja	Cebollín	20/10/2023 – 22/01/2023
10 macetas	Azuay	Cebollín	20/10/2023 – 22/01/2023
10 macetas	Cañar	Cebollín	20/10/2023 – 22/01/2023
1 caneca	Loja	Papa nativa (UNL-BG-046-Lo)	02/02/2024 – xx/xx/xxxx
1 caneca	Azuay	Papa nativa (UNL-BG-009-Az)	02/02/2024 – xx/xx/xxxx
1 caneca	Cañar	Papa nativa (UNL-BG-057-Cñ)	02/02/2024 – xx/xx/xxxx

La obtención del biofertilizante consistió en el empleo de tres unidades de propagación o multiplicación (canecas plásticas) que se procedieron a llenar con sustrato premezclado e inoculante de HMA. Las semillas de las plantas hospedantes (papa nativa) se sembraron 5 cm bajo la superficie y se cubrieron con una capa de sustrato y se regaron (Fig. 9). De esta manera al cabo de un tiempo se dará el desarrollo y cosecha de la planta hospedera para obtener un biofertilizante de hongos micorrízicos que puede ser empleado al cultivo de papa nativa en campo.

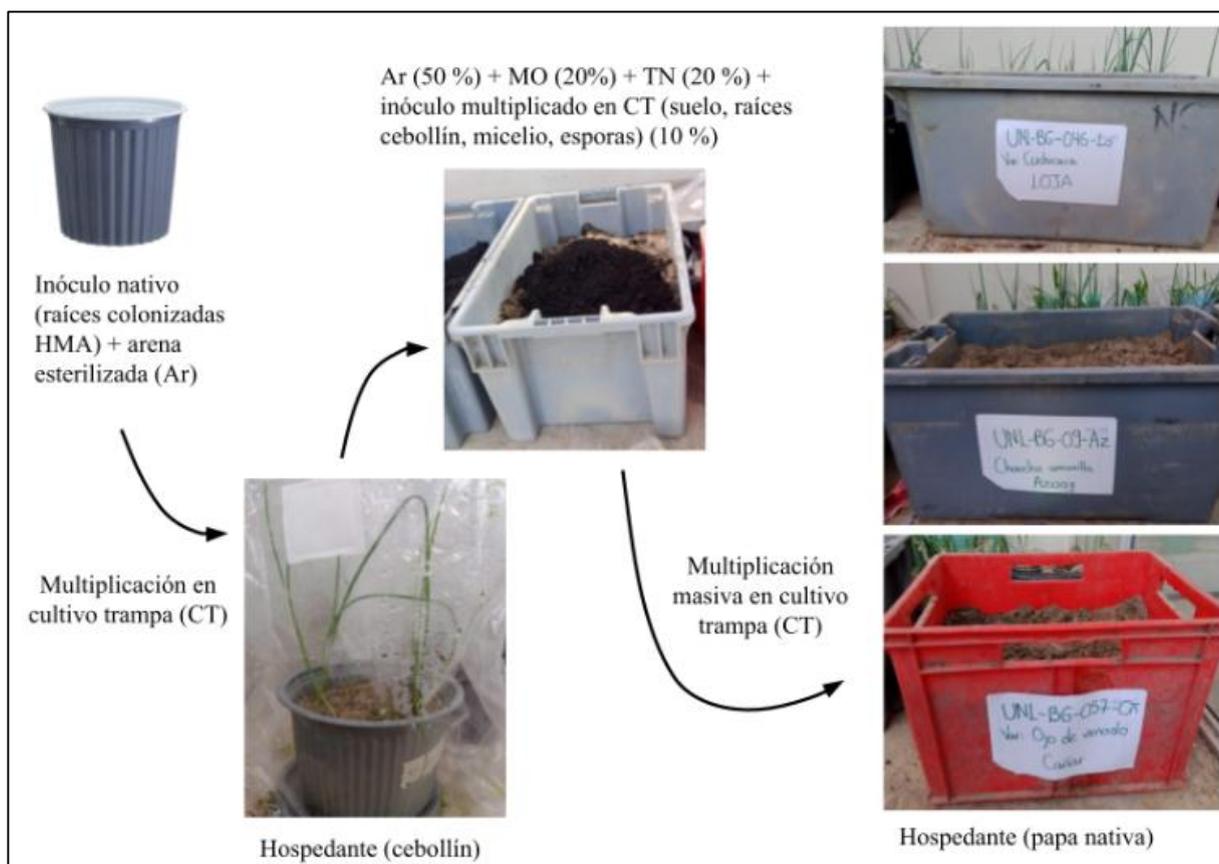


Figura 9. Esquema de la obtención del biofertilizante de HMA mediante la implantación de cultivos trampa

6.2. Resultados del segundo objetivo “Identificar las características morfológicas de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) colonizadores de raíces del cultivo de papa nativa de la Sierra Sur de Ecuador”

6.2.1. Número de esporas de HMA de los cultivos trampa

Al evaluar la densidad poblacional de esporas de HMA recolectado de los cultivos trampa inoculadas con fragmentos de raíces con micorrizas procedentes de tres zonas de estudio, no existen diferencias significativas ($p > 0,05$). Sin embargo, se observó mayor promedio de número de esporas en las muestras de suelo de los cultivos trampa inoculados con HMA provenientes de la provincia de Cañar con una cantidad de 593 esporas/ 100 g suelo, seguido por la provincia de Loja con 220 esporas/ 100 g de suelo y finalmente Azuay con 143 esporas/ 100 g suelo (Fig. 10).

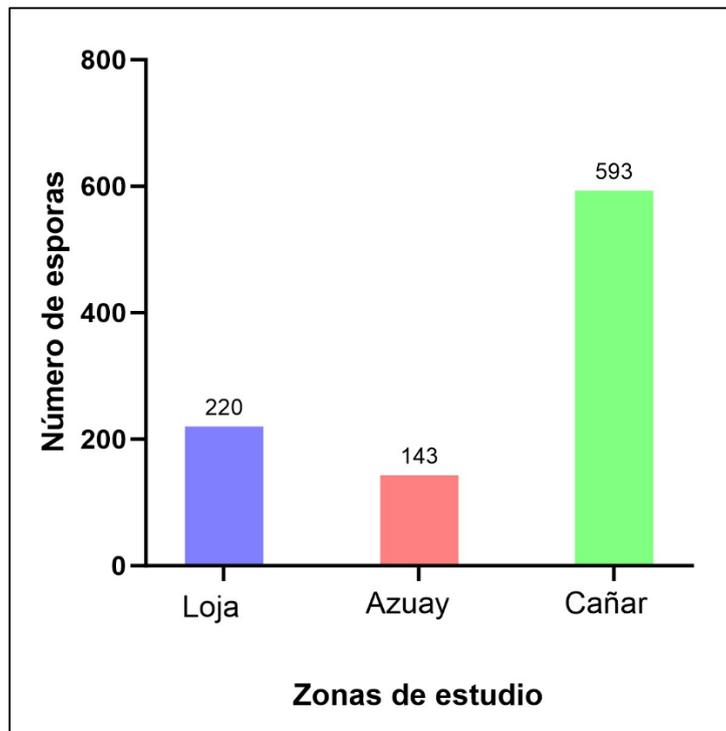


Figura 10. Frecuencia de esporas de hongos micorrízicos arbusculares en 100 g de suelo obtenido de cultivos trampa de cebollín (*Allium schoenoprasum*) cultivados a partir de fragmentos de raíces con presencia de micorrizas provenientes de tres provincias del Sur de Ecuador

En la Tabla 7, se muestra el resumen del número de esporas presentes en cada una de las muestras procedentes de las tres zonas de estudio. Se evidenció que el mayor número de esporas totales corresponde a Cañar; no obstante, el número de esporas por 100 g suelo difirió en cada muestra una de las parroquias y provincias.

Tabla 7. Resumen del número de esporas / 100 g de suelo de los cultivos trampa inoculados con micorrizas procedentes de las tres zonas de estudio

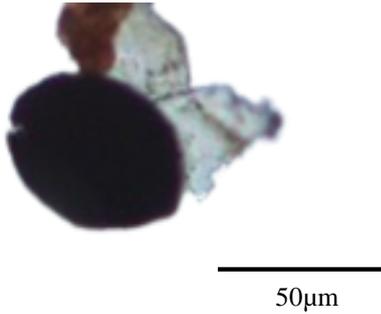
Zona de estudio	Muestra	Parroquia	Número de esporas	Número de esporas totales
Loja	1	Saraguro	83	220
	2	San Lucas	33	
	3	Urdaneta	13	
	4	Urdaneta	33	
	5	Urdaneta	57	
Azuay	1	Tomebamba	13	143
	2	Tomebamba	10	
	3	Dug Dug	57	
	4	Tomebamba	47	
	5	Chumblín	17	
Cañar	1	Chorocopte	10	593
	2	Chorocopte	70	
	3	Zhud	333	
	4	Ingapirca	67	
	5	Pindilig	113	

6.2.2. Identificación morfológica de los HMA

La determinación de las morfoespecies se llevó a cabo mediante la caracterización de las esporas respondiendo a rasgos morfológicos como el tamaño, la forma, el color y la textura de la pared. Se encontraron en total veinte diferentes tipos de esporas (Tabla 8) en los cultivos trampa inoculados con fragmentos de raíces con presencia de micorrizas de tres provincias de la sierra sur de Ecuador. Las fotografías se observan en microscopio compuesto a un aumento de 40x y 63x para determinar las principales características de las morfoespecies o morfotipos de las esporas de HMA. Por cuestiones de tiempo para realizar el trabajo de titulación y presupuesto no se pudo identificar a nivel molecular.

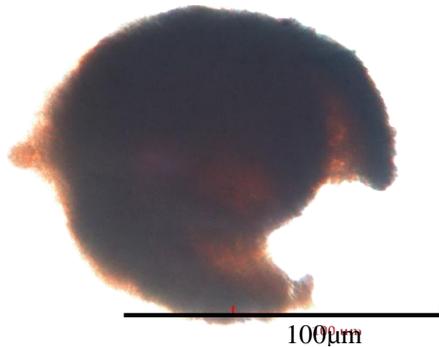
Tabla 8. Descripción morfológica de géneros de HMA identificados en tres zonas de estudio

Especie	Caracterización morfológica
Loja	
 <p style="text-align: center;">50µm</p>	<p>Género: <i>Glomus</i> spp M1 Color: Marrón oscuro a negro. Forma: Subglobosa Diámetro: 50-60 µm. Número de paredes: Dos (L1 y L2). Ornamentación: No Hifa de suspensión: Ausente Lugar de procedencia: Loja (San Lucas)</p>
 <p style="text-align: center;">50µm</p>	<p>Género: <i>Acaulospora</i> spp M2 Color: Amarillo a crema. Forma: Globosa. Diámetro: 50-60 µm. Número de paredes: Tres (L1, L2 y L3). Ornamentación: No Hifa de suspensión: Ausente Lugar de procedencia: Loja (Saraguro)</p>
 <p style="text-align: center;">50µm</p>	<p>Género: <i>Glomus</i> spp M3 Color: Marrón oscuro a negro. Forma: Globosa a subglobosa Diámetro: 40-50 µm. Número de paredes: Dos (L1 y L2). Ornamentación: No Hifa de suspensión: Ausente Lugar de procedencia: Loja (Urdaneta)</p>
 <p style="text-align: center;">20µm</p>	<p>Género: <i>Glomus</i> spp M4 Color: Crema, plateado. Forma: Globosa. Diámetro: 20 µm. Número de paredes: Tres (L1, L2 y L3). Ornamentación: No Hifa de suspensión: Presente Lugar de procedencia: Loja (Urdaneta)</p>

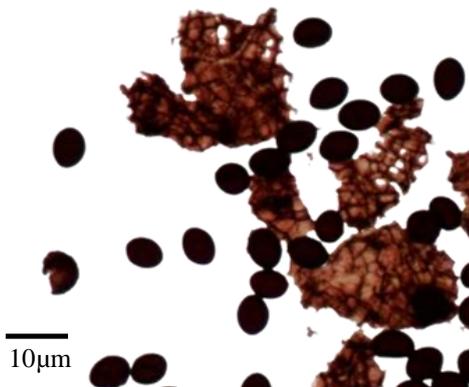


Género: *Scutellospora* spp M5
Color: Marrón oscuro a negro.
Forma: Globosa a subglobosa
Diámetro: 45-50 µm.
Número de paredes: Dos (L1 y L2).
Ornamentación: No
Hifa de suspensión: Ausente
Lugar de procedencia: Loja (Urdaneta)

Azuay

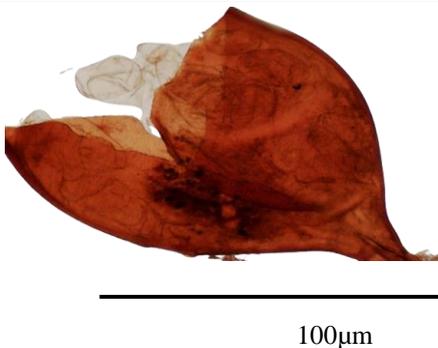


Género: *Glomus* spp M6
Color: Marrón oscuro a negro.
Forma: Globosa a subglobosa
Diámetro: 100-150 µm.
Número de paredes: Dos (L1 y L2).
Ornamentación: No
Hifa de suspensión: Ausente
Lugar de procedencia: Azuay (Tomebamba)



Género: *Glomus* spp M7
Color: Marrón oscuro a negro.
Forma: Globosa a subglobosa.
Diámetro: 5-10 µm.
Número de paredes: Dos (L1 y L2).
Ornamentación: No
Hifa de suspensión: Ausente
Lugar de procedencia: Azuay (Chumblín)

Cañar



Género: *Acaulospora* spp M8
Color: Pardo rojizo a naranja
Forma: Globosa a subglobosa
Diámetro: 100-150 µm.
Número de paredes: Dos (L1 y L2)
Ornamentación: No
Hifa de suspensión: Ausente
Lugar de procedencia: Cañar (Chorocopte)



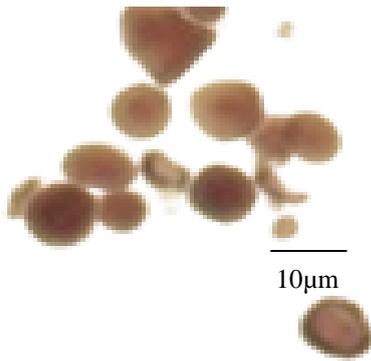
50µm

Género: *Glomus* spp M9
Color: Marrón claro a oscuro.
Forma: Globosa a subglobosa
Diámetro: 50 µm.
Número de paredes: Dos (L1 y L2).
Ornamentación: No
Hifa de suspensión: Ausente
Lugar de procedencia: Cañar (Chorocopte)



10µm

Género: *Glomus* spp M10
Color: Marrón claro a marrón oscuro.
Forma: Globosa, subglobosa.
Diámetro: 10-15 µm.
Número de paredes: Dos (L1 y L2).
Ornamentación: No
Hifa de suspensión: Presente
Lugar de procedencia: Cañar (Chorocopte)



10µm

Género: *Glomus* spp M11
Color: Marrón claro a marrón oscuro.
Forma: Globosa, subglobosa.
Diámetro: 5-10 µm.
Número de paredes: Dos (L1 y L2).
Ornamentación: No
Hifa de suspensión: Ausente
Lugar de procedencia: Cañar (Chorocopte)



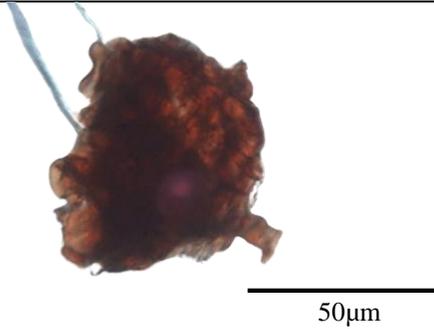
10µm

Género: *Glomus* spp M12
Color: Amarillo, naranja a marrón claro.
Forma: Globosa, subglobosa.
Diámetro: 5-10 µm.
Número de paredes: Dos (L1 y L2).
Ornamentación: No
Hifa de suspensión: Presente
Lugar de procedencia: Cañar (Chorocopte)

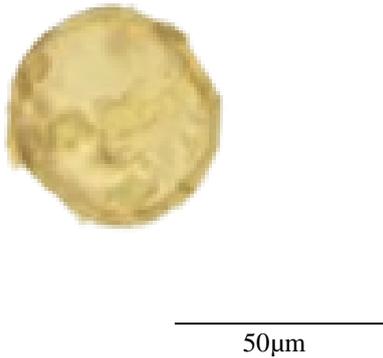


50µm

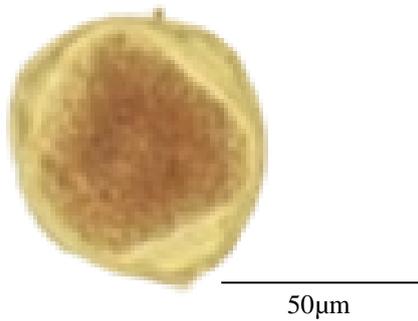
Género: *Glomus* spp M13
Color: Marrón oscuro a negro.
Forma: Globosa a subglobosa
Diámetro: 30-40 µm.
Número de paredes: Dos (L1 y L2).
Ornamentación: No
Hifa de suspensión: Ausente
Lugar de procedencia: Cañar (Zhud)



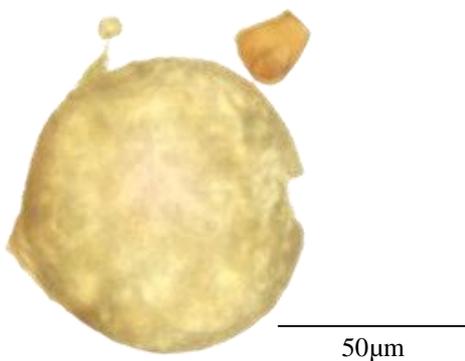
Género: *Sclerocystis* spp M14
Color: Marrón claro a oscuro
Forma: Globosa a subglobosa
Diámetro: 50-100 µm.
Número de paredes: Dos (L1 y L2).
Ornamentación: No
Hifa de suspensión: Presente
Lugar de procedencia: Cañar (Zhud)



Género: *Acaulospora* spp M15
Color: Amarillo claro a crema.
Forma: Globosa.
Diámetro: 40-50 µm.
Número de paredes: Tres (L1, L2 y L3).
Ornamentación: Si
Hifa de suspensión: Ausente
Lugar de procedencia: Cañar (Ingapirca)



Género: *Acaulospora* spp M16
Color: Amarillo claro a crema.
Forma: Globosa.
Diámetro: 40-50 µm.
Número de paredes: Tres (L1, L2 y L3).
Ornamentación: Si
Hifa de suspensión: Ausente
Lugar de procedencia: Cañar (Ingapirca)

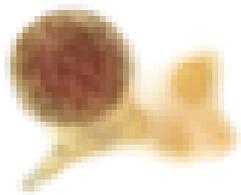


Género: *Glomus* spp M17
Color: marrón claro a crema.
Forma: Globosa.
Diámetro: 40-50 µm.
Número de paredes: Dos (L1 y L2).
Ornamentación: No
Hifa de suspensión: Ausente
Lugar de procedencia: Cañar (Ingapirca)



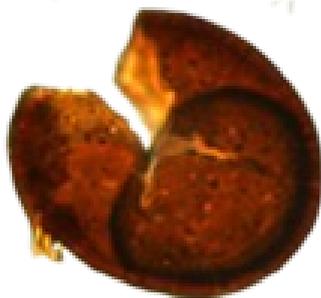
50µm

Género: *Glomus* spp M18
Color: Amarillo claro a crema.
Forma: Globosa.
Diámetro: 50 µm.
Número de paredes: Dos (L1 y L2).
Ornamentación: No
Hifa de suspensión: Ausente
Lugar de procedencia: Cañar (Pindilig)



10µm

Género: *Glomus* spp M19
Color: Pardo rojizo, marrón claro.
Forma: Globosa.
Diámetro: 10 µm.
Número de paredes: Dos (L1 y L2).
Ornamentación: No
Hifa de suspensión: Presente
Lugar de procedencia: Cañar (Pindilig)



50µm

Género: *Glomus* spp M20
Color: Pardo rojizo, marrón oscuro.
Forma: Globosa, subglobosa.
Diámetro: 40-50 µm.
Número de paredes: Dos (L1 y L2).
Ornamentación: No
Hifa de suspensión: Ausente
Lugar de procedencia: Cañar (Pindilig)

No todas las morfoespecies se encuentran en las muestras de las tres zonas; se observa que algunos de ellos suelen concentrarse o ausentarse en ciertas zonas. En este sentido, se identificaron cinco morfoespecies procedentes de las muestras de Loja, dos de las muestras de Azuay y trece morfoespecies de las muestras procedentes de Cañar (Tabla 9). Se evidenció al género *Glomus* spp. conformarse como un género cosmopolita, ya que estuvo concurrente en todas las zonas de estudio, sin embargo, su número varía en cada localidad o parroquia. También se constató la presencia de otros géneros como *Acaulospora* spp., *Scullespora* spp. y *Sclerocytis* spp., aunque en menor cantidad y diversidad.

Tabla 9. Resumen de la identificación de las morfoespecies de HMA encontrados en las muestras de suelo de los cultivos trampa inoculados con micorrizas de las tres zonas de estudio

Zona de estudio	Muestra	Parroquia	Género de HMA	Número de Morfoespecies	Número total de morfoespecies
Loja	1	Saraguro	<i>Glomus</i> spp M1	1	5
	2	San Lucas	<i>Acaulospora</i> spp M2	1	
	3	Urdaneta	<i>Glomus</i> spp M3	1	
	4	Urdaneta	<i>Glomus</i> spp M4	1	
	5	Urdaneta	<i>Scullespora</i> spp M5	1	
Azuay	1	Tomebamba	<i>Glomus</i> spp M6	1	2
	2	Tomebamba	<i>Glomus</i> spp M6		
	3	Dug Dug	<i>Glomus</i> spp M6		
	4	Tomebamba	<i>Glomus</i> spp M6		
	5	Chumblín	<i>Glomus</i> spp M7		
Cañar	1	Chorocopte	<i>Acaulospora</i> spp M8, <i>Glomus</i> spp M9, <i>Glomus</i> spp M10	3	13
	2	Chorocopte	<i>Glomus</i> spp M11, <i>Glomus</i> spp M12	2	
	3	Zhud	<i>Glomus</i> spp M13, <i>Sclerocytis</i> spp M14	2	
	4	Ingapirca	<i>Acaulospora</i> spp M15, <i>Acaulospora</i> spp M16, <i>Glomus</i> spp M17	3	
	5	Pindilig	<i>Glomus</i> spp M18, <i>Glomus</i> spp M19, <i>Glomus</i> spp M20	3	

***M:** morfoespecies de HMA

7. Discusión

En la presente investigación, el mayor porcentaje de frecuencia de micorrizas en el sistema radicular (F %) del cultivo de papa corresponden a las muestras de Azuay (90,7 %). Resultados que se contradicen a los obtenidos por Rodríguez y Serrano (2011) quienes en su estudio encontraron el porcentaje más alto de colonización en el cultivo de papa en el sector de Loja-Carboncillo (69.9 %) y los valores más bajos se encontraron en las provincias de Cañar (3.3 %), igualmente autores como Cesaro et al. (2008) en su estudio en dos áreas de cultivo de papa en Italia, encontraron niveles muy bajos de colonización de 5,5 y 2,1%. Esto se puede justificar debido a que las condiciones edáficas y climáticas de la región juegan un papel determinante en la dinámica de colonización de los HMA (Barrer, 2009) afectando su intensidad de colonización en la planta hospedante. Autores como Scagel et al. (2005) han informado que la intensidad de colonización de raíces por HMA puede disminuir en suelos debido a los altos niveles de disponibilidad de nutrientes, es decir que el aumento de las tasas de fertilización disminuye la colonización de los HMA por lo que puede ser responsable de algunas de las diferencias en la frecuencia e intensidad de la colonización que detectamos en las diferentes zonas de estudio. Por su parte, Hoeksema (2010) manifiesta que la intensidad de colonización micorrízica y la respuesta de la planta a esta colonización, muestra una variación genética hereditaria sustancial dentro de las especies de plantas y hongos y por lo cual tienen el potencial para responder a la selección coevolución, que se encuentra desarrollando un papel importante en el impulso de la diversificación dentro y entre las poblaciones de plantas y HMA. Además, de acuerdo a Garzón (2016), la efectividad de la acción de las micorrizas puede variar en diferentes épocas del año o en una temporada específica. Por ejemplo, en su estudio, Da silva y Cardoso (2006) evaluaron la colonización de micorrizas arbusculares en plantas de copoazú (*Theobroma grandiflorum*) y pijuayo (*Bactris gasipaes*) en época lluviosa y seca, determinando que en el caso del copoazú hubo mayor colonización de micorrizas en época lluviosa (21,93%) que en época seca (7,19%). Por el contrario, el pijuayo presentó una mayor colonización en época seca (43,95%) que en la lluviosa (13,54%).

Adicionalmente, se recalca que los cultivos de papa en la provincia de Azuay se encontraban bajo sistemas de monocultivo, mientras que en la provincia de Loja la producción de papa nativa se hace bajo sistema de chakras (variedad de cultivos). En este sentido, la interacción de los HMA con el monocultivo por ciclos consecutivos sin que se roten otros cultivos puede ser otro factor determinante para la reducción de diversidad de HMA y, por ende, de su colonización en cultivos posteriores. Según Cervantes-Gámez et al. (2021), la diversidad

genética y funcional de los géneros y especies de HMA asociados con la misma especie huésped pueden presentar diferencias relacionadas con la capacidad de esporulación y de colonización. Lo cual se relaciona a lo mencionado por Verbruggen et al. (2012) quienes manifiestan que la abundancia de HMA está asociada negativamente con la producción agrícola intensiva. Particularmente se señala a la labranza, los altos niveles de nutrientes (específicamente fósforo) y los frecuentes períodos de barbecho factores que reducen o disminuyen la abundancia absoluta de propágulos viables de HMA, como las esporas y el micelio infeccioso para la colonización. Es importante comentar que algunas especies pueden ser más tolerantes a las prácticas agrícolas, mientras que otras pueden ser muy sensibles a ellas (De La Cruz-Ortiz et al., 2020).

A esto se incluye que el factor altitud también influye en la colonización de los HMA, Senés- Guerrero et al. (2013) encontraron que, en los campos de papa de la zona andina, la mayor colonización de HMA ocurrió a mayor altitud (4 075 msnm) tanto en muestras de suelo como de raíces. Por su parte, Lugo et al. (2018) mencionan que la riqueza, diversidad y niveles de colonización de HMA en pastos de la región de Puna en América del Sur se correlacionaron negativamente con el aumento de la altitud. Mientras que Alba (2019) en su estudio determinó el promedio del factor altitud en relación a colonización micorrízica, encontrando que existe diferencia estadística significativa entre ellos; el porcentaje más alto se reportó en 800-1000 m.s.n.m con 17,42 %, mientras que el más bajo se reportó en 1000-1200 m.s.n.m con 14,23% Estos datos coinciden con Coral (2015) quien determinó que el mayor porcentaje de colonización micorrízica fue alcanzado a una altitud de 800–1000 m.s.n.m.

En las tres zonas de estudio se observaron estructuras micorrízicas como hifas, esporas y vesículas, resultado de la simbiosis entre los hongos micorrízicos y la raíz del cultivo de papa. También se contrastó la presencia de arbusculos, aunque fue baja sobre todo en las muestras de Loja y Cañar. Feijoo (2014) menciona la presencia de arbusculos como un indicativo de actividad metabólica asociada al transporte de sustancias a través de la membrana; esto puede explicar que al momento de realizar el muestreo a planta ya no estaba en un proceso activo de intercambio de nutrientes en cuyos casos los arbusculos mueren y su presencia en las placas teñidas es nula o casi nula. Si bien los resultados muestran que todas las muestras evaluadas en las tres zonas de estudio tuvieron porcentajes mayores al 50 %, relacionando a lo que algunos autores como Pérez-Luna et al. (2012) han sugerido que el porcentaje mínimo de colonización de HMA debe ser superior al 40% para que favorezca la relación simbiótica con la planta y sirva como indicador biológico de la calidad del suelo y además constituyen un buen referente para su utilización como bioinóculo o biofertilizante, de acuerdo a Lohman et al. (2018) los trozos de raíces de cultivos colonizados, las esporas micorrízicas y las hifas micorrízicas viables

como propágulos activos de los HMA que pueden usarse como inóculo para "infectar o inocular" otras plantas. Aun así, cabe mencionar que el porcentaje de colonización no ha sido referenciado como un indicador del rendimiento, autores como Del Pozo (2015) manifiesta que incluso niveles muy bajos de colonización pueden tener un impacto positivo en la producción de papa.

En la segunda etapa, referente al establecimiento y multiplicación de los HMA en los cultivos trampa de cebollín, se determinaron valores superiores de frecuencia micorrízica (F %) a los estimados inicialmente en campo en las muestras de Loja y Cañar. Por su parte, los cultivos trampa de HMA inoculados con fragmentos de raíces de papa nativa con micorrizas procedentes de Azuay, los porcentajes obtenidos fueron menores a los porcentajes estimados en las raíces de papa a nivel de campo. Aun así, el porcentaje obtenido es bueno ya que es superior al 50 %, indicando que si se estableció simbiosis. Aunque es importante resalta que, obtener porcentajes inferiores a los colectados a nivel de campo puede deberse a ciertos factores como lo manifiesta Cuenca et al. (2003), quienes reportaron que la propagación de HMA en cultivos trampa presenta dificultades porque no se pueden reproducir las condiciones naturales exactas; esto provoca un sesgo hacia la proliferación de especies que son capaces de tolerar las condiciones de invernadero y que se asocian mejor con la planta huésped en las condiciones específicas del cultivo trampa, no obstante los HMA pueden acoplarse a condiciones controladas, solo que se requiere más tiempo para su proliferación, ya que los HMA siendo unos hongos simbiótico es menester de un huésped o planta desarrollando sus capacidades fisiológicas para que se dé una asociación simbiótica entre hongo-planta. Existen estudios que indican que la diversidad de hongos en las raíces de una planta puede facilitar la persistencia de simbioses de baja calidad, lo que deriva en un beneficio de crecimiento muy limitado para su hospedero (Hart et al., 2012), puede que la colonización micorrízica haya sido mayor en Azuay en condiciones de campo, pero existe la posibilidad de que estos simbioses no sean los más favorables para las plantas de cebollín debido a la experimentación de adaptabilidad en condiciones de invernadero, si se cambia las condiciones propias de su medio y también factores como el tipo de suelo o sustrato utilizado y su manipulación también pueden incluir la amplia variedad de especies de plantas utilizadas para propagar HMA en cultivos trampa (Yao et al., 2010). Estos resultados indican que los hongos micorrízicos responden de manera diferente según la especie huésped. Por lo tanto, estas diferencias podrían resultar en una presión selectiva que favorece ciertas combinaciones huésped-hongo (Aguilar et al., 2013). Hasta el momento se sabe que la colonización radicular está relacionada a la familia de HMA a la que pertenece, por lo que la capacidad de colonización es muy variada. Según Hart y Reader (2002) los hongos de la familia

Glomerales colonizan principalmente sistemas de raíces a partir de un fragmento hifal y la colonización de raíces por Diversisporales comienza a partir de esporas, esto implica que los hongos de la familia Diversisporales son colonizadores más lentos que los miembros de los Glomerales. Las diferencias en las estrategias de crecimiento entre estos hongos sugieren que el manejo agronómico del suelo puede tener un impacto importante en la diversidad de los HMA y, por lo tanto, en el papel que desempeñan dentro de un ecosistema. (Acosta, 2021). Por su parte, Klironomos y Hart (2002) evaluaron las habilidades de ocho especies de HMA pertenecientes a cuatro géneros diferentes para colonizar raíces aplicando tres tipos diferentes de inóculo, corroborando que los aislamientos de *Glomus* y *Acaulospora* colonizaron con todos los tipos de inóculo examinados, mientras que los aislamientos de *Gigaspora* y *Scutellospora* colonizaron principalmente con esporas y en un grado limitado con fragmentos de raíces.

Las raíces de cebollín inoculadas con las muestras de Azuay presentaron escasa y nula presencia de arbusculos en comparación con los cultivos trampa inoculados con HMA procedentes de Loja y Cañar, puede relacionarse por el hecho que estas estructuras son de vida corta, con ocurrencia estacional y de formación sensible a la variación de los factores ambientales y metabolismo fisiológico de la planta hospedante (Parra-Rivero et al., 2018). Cano-Santana (2008) menciona que la vida de un arbusculo es muy corta de 8 y 14 días aproximadamente, luego de este tiempo el arbusculo se degrada o entra en un periodo de senescencia, donde al final suelen desaparecer (Javot et al., 2007). Los arbusculos son los responsables de la transferencia bidireccional de nutrientes durante la simbiosis planta-hongo y se encuentra determinada por la capacidad de administrar fosfatos y otros nutrientes, por lo cual la planta emplea un mecanismo para mantener los más eficientes y eliminar el resto mediante una degradación temprana (Parniske, 2008).

Nuestros resultados muestran que el empleo de una especie herbácea como el cebollín (*Allium schoenoprasum*) tuvo buena adaptación por parte de los inóculos de HMA procedentes de Loja y Cañar. Según Tucto (2023) el uso de una especie herbácea como es el caso del llantén (*Plantago lanceolata*) también le permitió obtener valores altos de colonización (mayor al 50 %) e igualmente Ochoa (2023) empleó *Plantago lanceolata* como cultivo trampa obteniendo porcentaje de colonización de 19,4 %. Por su parte, Cabrera (2023) realizó la propagación y la caracterización morfológica de consorcios de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) nativos mediante la aplicación de maíz (*Zea mays*) como cultivo trampa. Por tal motivo, se puede utilizar diversas especies de plantas como cultivo trampa, lo que se necesita es que produzcan bastante biomasa foliar y radicular para garantizar la colonización de los HMA durante mayor tiempo y de esta manera potenciar la multiplicación de HMA y asociarlo a los cultivos

potenciales (Noboa et al., 2018). A su vez, obtener valores muy altos de colonización de las muestras procedentes de Loja y Cañar, se relaciona a la presencia de estructuras micorrízicas en todas las categorías, lo que permite afirmar que hay cierto grado de dependencia entre la planta y el HMA, elemento de gran importancia debido a que, en la simbiosis micorrízica, el hongo permite el incremento en la adquisición de nutrientes, al mismo tiempo que la planta proporciona compuestos carbonados para el crecimiento del hongo (Flores y Cuenca, 2004).

En la figura 9, se puede observar que el mayor número de esporas se encuentran en las muestras de suelo de los cultivos trampa inoculados con HMA procedentes de Cañar y la menor cantidad de esporas se obtuvieron en las muestras de suelo de los cultivos trampa inoculados con fragmentos de raíces con micorrizas procedentes de Azuay. Nuestros resultados fueron contradictorios a los reportados por Rodríguez y Serrano (2011) quienes mediante el empleo de *Plantago lanceolata* como cultivo trampa, obtuvieron nula producción de esporas de HMA provenientes de las zonas de Azuay, Cañar y Loja, esto debido quizá a que las condiciones en las que se mantuvieron los cultivos no fueron las adecuadas para promover la esporulación de los hongos, encontrándose únicamente en estado vegetativo. Además, Cabrera (2023) en su trabajo en maíz como cultivo trampa obtuvo un total de 320 esporas/100 g de suelo, mientras que, Ochoa (2023) empleando *Plantago lanceolata* encontró un mayor número de esporas de 197 esporas/100 g suelo. Según León (2006), la formación de esporas comienza entre la tercera y cuarta semana después de la colonización de la raíz, otras tardan de seis meses a un año. Sin embargo, la producción masiva de esporas de HMA siempre ha sido una limitante para la aplicación y uso permanente en diversos cultivos, particularmente en el caso del cultivo de papa. Las dificultades para obtener grandes cantidades de inóculo de HMA y la explotación comercial todavía sigue estando en investigación inicial. Las poblaciones de esporas de HMA en cantidad y calidad, dependen de las diferentes prácticas de su propagación, cultivos de procedencia, presencia de otras especies, características de los suelos de los inóculos, las condiciones ambientales, sustratos y tipo de hospedante (Kadian et al., 2018). La principal razón por la que relacionamos la cantidad de esporas encontradas en los cultivos trampa establecidos es debido a que para promover la esporulación se sometió a estrés hídrico a las plantas trampa 15 días antes del aislamiento y extracción de esporas. Además, autores como Ochoa-Meza et al. (2009) mencionan que existe una relación entre la senescencia de la planta y la reproducción de los HMA a través de esporas.

Los morfotipos identificados a nivel de esporas más frecuentes corresponden a los géneros *Glomus* y *Acaulospora*, el primer género se encontró en los suelos de los cultivos trampa inoculados con fragmentos de raíces con micorrizas procedentes de Cañar, Loja y

Azuay, mientras que el segundo generó se encontró solo en muestras de suelo de cultivos trampa inoculados con muestras procedentes de Cañar y Loja. Estos resultados obtenidos concuerdan con los descritos por Rodríguez y Serrano (2011) en donde determinaron que los géneros más frecuentes en las zonas de Cañar, Loja y Azuay corresponden a *Glomus* y *Acaulospora*. De igual manera, Hijri et al. (2006) en un estudio a nivel molecular de las comunidades de HMA presentes en ecosistemas cultivados reportó que *Glomus* y *Acaulospora* fueron los géneros más frecuentes. Por su parte, Cabrera (2023) encontró que el género *Glomus* fue el más representativo, seguido de los géneros *Acaulospora*, *Gigaspora*, y *Scutellospora*, al igual que Ochoa (2023) quien manifiesta que los géneros encontrados en su trabajo corresponden a *Glomus*, *Acaulospora*, *Sclerocystis* y *Gigaspora*. Los autores Varela y Trejo (2001), mencionan que existen micorrizas arbusculares que presentan una dominancia en determinadas comunidades vegetales especialmente en las de importancia agrícola y hortícola y que tal dominancia está correlacionada con el estado de los suelos y las latitudes bajas.

Además, cabe mencionar que, en la mayoría de los suelos, las comunidades de HMA se componen de varias especies, de las que tres o cuatro son dominantes en términos de esporulación, mientras que la mayoría de las especies restantes producen bajas cantidades de esporas. De esta manera, las esporas encontradas solo representan a aquellas especies que han logrado una biomasa suficiente dentro de la raíz y que les ha permitido desarrollar más esporas (esporulación) de HMA (Lugo et al., 2018). Además, Trejo (2013) destaca que la utilización de cultivos trampa para multiplicación de HMA permite complementar los estudios de diversidad, ya que en ellas a menudo se desarrollan otras especies que no pueden ser observadas en el suelo directo del sitio debido a que las condiciones de las macetas pueden ofrecer condiciones más favorables para el establecimiento de diversas especies de HMA, sobre todo en el caso que se empleen diversas plantas trampa.

8. Conclusiones

- Se logró multiplicar hongos micorrízicos arbusculares (HMA) procedentes del cultivo de papa nativa mediante el manejo integrado de los cultivos trampa utilizando las plantas huésped de cebollín comprobando que la multiplicación de las esporas de HMA se da a partir de las 12 semanas en adelante.
- La evaluación de los porcentajes de colonización en raíces de papa sirvió como medida de referencia, indicando la presencia inicial de los HMA y su relación simbiótica con el cultivo de papa nativa, mientras que el porcentaje de colonización en raíces de cebollín demostró la multiplicación y establecimiento exitoso de los HMA en el cultivo trampa apto para ser utilizado como biofertilizante el cual contiene propágulos de raíces, esporas e hifas de HMA.
- En general, la aplicación de cultivos trampa de cebollín ha demostrado su potencial como método viable para multiplicar los HMA a partir de las 12 semanas en adelante y luego promover su utilización en el cultivo de papa nativa como biofertilizante.
- El mayor número de esporas se encontró en las muestras de suelo de los cultivos trampa inoculados con HMA procedentes de las provincias de Cañar y de la provincia de Loja con 593 y 220 esporas de HMA en 100 g suelo respectivamente.
- Mediante la observación y caracterización morfológica de esporas de HMA se ha logrado identificar veinte morfoespecies de HMA que colonizan las raíces de cultivos nativos de papa en la Sierra Sur de Ecuador. El estudio reveló que los colonizadores de HMA más representativos se encontraban en el género *Glomus* y *Acaulospora*.

9. Recomendaciones

- Se identificó morfoespecies de HMA en los cultivos trampa inoculados con muestras de las tres provincias de estudio; sin embargo, se recomienda realizar trabajos que incluyan identificación y colonización con técnicas moleculares para tener con exactitud un reconocimiento del género y determinar si la colonización es efectiva en las raíces.
- Multiplicar morfoespecies de HMA en los cultivos trampa inoculados con muestras de raíces de papa nativa o suelo de los cultivares de papa, además seleccionar plantas hospederas de ciclo corto además del cebollín (*Allium schoenoprasum*), el llantén mayor (*Plantago lanceolata*), ayarosa (*Tagetes erecta*), maíz (*Zea mays*) lechuga (*Lactuca sativa*) u otras para potenciar la biodiversidad de las comunidades de HMA y potenciar el bioinóculo a gran escala a través de pellets de biofertilizantes.
- Varios autores han referenciado a los HMA como microorganismos que intervienen positivamente en el crecimiento y establecimiento exitoso de las especies vegetales, es necesario desarrollar proyectos de sistemas productivos sostenibles en los cuales se potencien los cultivos trampa con técnicas de manejo la aplicación y/o inoculación de micorrizas sobre todo en especies nativas como la papa nativa.
- Realizar ensayos de fertilización con el bioinóculo o biofertilizante a través de cultivos trampa y con las especies de HMA identificadas, en plantas de papa nativa u otros cultivos agrícolas, para determinar su influencia en el rendimiento y producción de papa nativa debido a que las comunidades de los hongos micorrízicos o simbióticos permiten mantener una agricultura sustentable y amigable con medio ambiente.

10. Bibliografía

- Acosta, R. A. (2021). *Estudio de la diversidad de Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA) en el cultivo de Sacha Inchi (Plukenetia volubilis L.), en la región San Martín* [Tesis para Título Profesional de Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto].
<https://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/11458/4124/1/AGRONOM%C3%8DA%20-%20Ronny%20Anthony%20Acosta%20C%C3%B3rdova.pdf>
- Aguilar, D. T., Lara-Capistrán, L., Maldonado-Mendoza, I. E., Zulueta-Rodríguez, R., Sangabriel-Conde, W., Mancera-López, M. E., Negrete- Yankelevich, S., & Barois, I. (2013). Loss of arbuscular mycorrhizal fungal diversity in trap cultures during long-term subculturing. *IMA Fungus*, 4(2), 161-167.
<https://doi.org/10.5598/ima fungus.2013.04.02.01>
- Augé, R. M, Toler, H. D y Saxton, A. M. (2015). La simbiosis de micorrizas arbusculares altera la conductancia estomática de las plantas huésped más en condiciones de sequía que en condiciones de riego abundante: un metanálisis. *Micorrizas*, 25 (1), 13-24.
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. S., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. (2019). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Growth Regulation: Implications in Abiotic Stress Tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>
- Bennett, A. E., & Groten, K. (2022). The Costs and Benefits of Plant-Arbuscular Mycorrhizal Fungal Interactions. *Annual review of plant biology*, 73, 649–672.
<https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102820-124504>
- Brundrett, M., & Tedersoo, L. (2018). Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*, 220(4), 1108-1115.
<https://doi.org/10.1111/nph.14976>
- Calero, A., Yoong, N., & Gil, K. (2016, March 28). Región Sierra Sur de Ecuador. Regionsierrasur; regionsierrasur.
<https://regionsierrasur.wordpress.com/2016/03/28/region-sierra-sur-de-ecuador/>
- Cano-Santana, Z., Castillo-Argüero, S., Martínez-Orea, Y., & Juárez-Orozco, S. (2008). Análisis de la riqueza vegetal y el valor de conservación de tres áreas incorporadas a la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, Distrito Federal (México). *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (82), 1-14.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-

[21282008000100001&lng=es&tlng=es](https://doi.org/10.21282/2008000100001&lng=es&tlng=es).

- Centro Internacional de la papa (CIP). (2017, septiembre 26). *Datos y cifras de la papa*. International Potato Center. <https://cipotato.org/es/potato/potato-facts-and-figures/>
- Cervantes-Gámez, R. G., Peñuelas-Rubio, O., Araujo-Benard, N., Fierro-Coronado, R. A., Aguilar, D. T., Maldonado- Mendoza, I. E., & Cordero-Ramírez, J. D. (2021). Diversidad de hongos micorrízicos arbusculares asociados a plantas voluntarias de maíz en suelos de transición: ecosistema natural - uso agrícola. *Scientia fungorum*, 51, e1330. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.51.1330>
- Chen, M., Arato, M., Borghi, L., Nouri, E. y Reinhardt, D. (2018). Servicios beneficiosos de los hongos micorrízicos arbusculares: de la ecología a la aplicación. *Fronteras en la ciencia de las plantas*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01270>
- Chifetete, V. W., y Dames, J. F. (2020). Mycorrhizal Interventions for Sustainable Potato Production in Africa. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.593053>
- Cruz, Y. P., & Morón-Ríos, A. (2021). *Influencia del manejo de suelo en la colonización temprana de tres especies de plantas trampas por hongos micorrizógenos arbusculares*. PCTI. <https://pcti.mx/articulos/pcti-190-influencia-del-manejo-de-suelo-en-la-colonizacion-temprana-de-tres-especies-de-plantas-trampas-por-hongos-micorrizogenos-arbusculares/>
- Cuenca, G., De Andrade, Z., Lovera, M., Fajardo, L., Meneses, E., Márquez, M., & Machuca, R. (2003). Pre-selección de plantas nativas y producción de inóculos de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) de relevancia en la rehabilitación de áreas degradadas de la Gran Sabana, estado Bolívar, Venezuela. *Ecotrópicos*, 16(1), 27-40.
- Cuesta, X., Monteros, C., Racines, M., y Rivadeneira, J. (2022). *Catálogo de variedades de papa*. Segunda edición. Publicación Miscelánea No. 427. Quito (Ecuador). Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. 28 p. Recuperado de, <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/5850/1/CATALOGO%20PAPA%202022.pdf>
- Da Silva, J. P., & Cardoso, E. J. B. N. (2006). Micorriza arbuscular em Cupuaçu e Pupunha cultivados em sistema agroflorestal e em monocultivo na Amazônia Central. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(5), 819-825. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2006000500014>
- Datiles, M., & Acevedo-Rodríguez, P. (2022). *Solanum tuberosum (potato)*. CABI Compendium. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.50561>

- De La Cruz-Ortiz, Á. V., Álvarez- Lopeztello, J., Robles, C., & Hernández-Cuevas, L. V. (2020). Tillage intensity reduces the arbuscular mycorrhizal fungi attributes associated with *Solanum lycopersicum*, in the Tehuantepec Isthmus (Oaxaca), México. *Applied Soil Ecology*, 149, 103519. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103519>
- Del Pozo, D. E. (2015). *Evaluación del efecto de la co-inoculación de Rhizophagus irregularis y Paenibacillus sp. en el crecimiento de dos variedades de papa (Solanum tuberosum L.)* [Tesis para título de Biólogo, Universidad Técnica Particular de Loja]. <https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/12831/1/Del%20Pozo%20Meza%2C%20David%20Emmanuel.pdf>
- Deja-Sikora, E., Kowalczyk, A., Trejgell, A., Szmidt-Jaworska, A., Baum, C., Mercy, L., & Hryniewicz, K. (2020). Arbuscular Mycorrhiza Changes the Impact of Potato Virus Y on Growth and Stress Tolerance of *Solanum tuberosum* L. in vitro. *Frontiers in Microbiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02971>
- Devaux, A., Ordinola, M. E., Hibon, A., & Flores, F. A. (2010). *El sector Papa en la región andina: diagnóstico y elementos para una visión estratégica (Bolivia, Ecuador y Perú)*. International Potato Center. Obtenido de, <https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/73217/73193.pdf?sequence=2>
- Dobnik, D., Gruden, K., Ramšak, Ž., & Coll, A. (Eds.). (2021). *Solanum tuberosum*. Methods in Molecular Biology. doi:10.1007/978-1-0716-1609-3. https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1609-3_1
- Etesami, H., Jeong, B. R., & Glick, B. R. (2021). Contribution of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Phosphate-Solubilizing Bacteria, and Silicon to P Uptake by Plant. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.699618>
- FAOSTAT. (2023). *Cultivos y productos de ganadería: Cultivo de papa*. Fao.org. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Feijoo, D. (2014). *Inoculación in vitro de hongos micorrízicos (MUCL 46238; MUCL 43204) en Cinchona officinalis* [Tesis para Ingeniero en gestión Forestal, Universidad Técnica Particular de Loja]. <https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/9061/1/Feijoo%20Blacio%20Dennis%20Emanuel.pdf>
- Gao, X., Guo, H., Zhang, Q., Guo, H., Zhang, L., Zhang, C., Gou, Z., Liu, Y., Wei, J., Chen, A., Chu, Z., & Zeng, F. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) enhanced the growth, yield, fiber quality and phosphorus regulation in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59180-3>

- Garzón, L. P. (2016). Importancia de las micorrizas arbusculares (MA) para un uso sostenible del suelo en la Amazonia colombiana. *Revista luna azul*, 42, 217-234.
<https://doi.org/10.17151/luaz.2016.42.14>
- Guzmán, A., Gusqui, R., Morán, N., Haunobu, I. (2015). *Manejo Integrado del Cultivo de papa (Solanum tuberosum)*. Guía Técnica 1. Proyecto de Desarrollo Rural Integral Sostenible en la Provincia de Chimborazo “Minga Sumak Kawsay”, GADPCH. Riobamba, Ecuador. 58 p. Obtenido de, http://www.congope.gob.ec/wp-content/uploads/2017/10/Cultivo_de_papa_manual.pdf
- Hart, M. M., Forsythe, J., Oshowski, B., Bücking, H., Jansa, J., & Kiers, E. T. (2012). Hiding in a crowd—Does diversity facilitate persistence of a low-quality fungal partner in the mycorrhizal symbiosis? *Symbiosis*, 59(1), 47-56. <https://doi.org/10.1007/s13199-012-0197-8>
- Hart, M. M., & Reader, R. J. (2002). Taxonomic basis for variation in the colonization strategy of arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 153(2), 335-344.
<https://doi.org/10.1046/j.0028-646x.2001.00312.x>
- Hijri, I., Sýkorová, Z., Oehl, F., Ineichen, K., Mäder, P., Wiemken, A., & Redecker, D. (2006). Communities of arbuscular mycorrhizal fungi in arable soils are not necessarily low in diversity. *Molecular Ecology*, 15(8), 2277-2289.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.2006.02921.x>
- Hoeksema, J. D. (2010). Ongoing coevolution in mycorrhizal interactions. *New Phytologist*, 187(2), 286-300. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03305.x>
- Huey, C. J., Gopinath, S. C. B., Uda, M. N. A., Zuhaimi, H. I., Jaafar, M. N., Kasim, F. H., & Yaakub, A. R. W. (2020). Mycorrhiza: a natural resource assists plant growth under varied soil conditions. *3 biotech*, 10(5). <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02188-3>
- Javot, H., Penmetsa, R. V., Terzaghi, N., Cook, D. R., & Harrison, M. J. (2007). A *Medicago truncatula* phosphate transporter indispensable for the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(5), 1720-1725. <https://doi.org/10.1073/pnas.0608136104>
- Kadian, N., Yadav, K., & Aggarwal, A. (2018). Mass multiplication of arbuscular mycorrhizal fungi associated with some leguminous plants: an ecofriendly approach. *Indian J Exp Biol*.
<http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/44187/1/IJEB%2056%284%29%20258-266.pdf>
- Klironomos, J. N., & Hart, M. M. (2002). Colonization of roots by arbuscular mycorrhizal

- fungi using different sources of inoculum. *Mycorrhiza*, 12(4), 181-184.
<https://doi.org/10.1007/s00572-002-0169-6>
- Kumar, S., & Saxena, S. (2019). Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) from Heavy Metal-Contaminated Soils: Molecular Approach and Application in Phytoremediation. *En Soil biology* (pp. 489-500). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18933-4_22
- Lalangui, C. (2018). *Aislamiento e identificación de morfotipos de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en tres zonas riparias del cantón Loja enfocados a la producción de bioinoculantes* [Tesis de grado para Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de Loja].
- Leifheit, E. F., Veresoglou, S. D., Lehmann, A., Morris, E. K., & Rillig, M. C. (2013). Multiple factors influence the role of arbuscular mycorrhizal fungi in soil aggregation—a meta-analysis. *Plant and Soil*, 374(1-2), 523-537.
<https://doi.org/10.1007/s11104-013-1899-2>
- León, D. (2006). *Evaluación y caracterización de micorrizas arbusculares asociadas a yuca (manihot esculenta sp) en dos regiones de la Amazonía colombiana* [Trabajo de grado para Microbiólogo Agrícola y Veterinaria, Universidad Pontificia Javeriana].
<https://library.co/document/oz1d7o3z-evaluacion-caracterizacion-micorrizas-arbusculares-asociadas-esculenta-amazonia-colombiana.html>
- Lohman, M., Ziegler-Ulsh, C., & Douds, D. (2018, 12 noviembre). *Cómo inocular hongos micorrízicos arbusculares en la granja, Parte 1*. Rodale Institute.
<https://rodaleinstitute.org/es/science/articles/how-to-innoculate-arbuscular-mycorrhizal-fungi-on-the-farm-part-1/>
- Lone, R., Shuab, R., Malla, N., Kumar, A., & Koul, K. K. (2016). Beneficial Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Underground Modified Stem Propagule Plants. *Journal on New Biological Reports*, 5(1), 41-51.
[https://www.researchtrend.net/jnbr/pdf/6_JNBR_5\(1\)_2016.pdf](https://www.researchtrend.net/jnbr/pdf/6_JNBR_5(1)_2016.pdf)
- Lugo, M., Iriarte, H., Crespo, E., Torres, M., Ontivero, E., Risio, L., Menoyo, E., & Ballesteros, S. (2018). Manual de metodologías para el trabajo con hongos y sus simbiosis. (1ª ed.). San Luis: Nueva Edición Torial Universitaria, UNSL.
https://www.researchgate.net/publication/329809810_MANUAL_DE_METODOLOGIAS_PARA_EL_TRABAJO_CON_HONGOS_Y_SUS_SIMBIOSIS
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2022). *Estado del cultivo de papa en Ecuador*. Agricultura.gob.ec. <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/papa/boletines->

[situacionales-papa-ecuador](#)

- Parniske, M. (2008). Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology*, 6(10), 763-775. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1987>
- Parra-Rivero, S. M., Sousa, N. M. M., Sanabria-Chopite, M. E., & Pineda, J. (2018). Anatomical description of the arbuscular mycorrhizal fungi colonization in two tree legumes. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 24(2), 183-196. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.02.014>
- Pérez-Luna, Y., Álvarez-Solís, J. D., Mendoza- Vega, J., Pat-Fernández, J. M., Gómez-Álvarez, R., & Cuevas, L. (2012). Diversidad de hongos micorrícicos arbusculares en maíz con cultivo de cobertura y biofertilizantes en Chiapas, México. *Gayana Botanica*, 69(1), 46-56. <https://doi.org/10.4067/s0717-66432012000100006>
- Piliarová, M., Ondreičková, K., Hudcovicová, M., Mihálik, D., & Kraic, J. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi – their life and function in ecosystem. *Pol'nohospodárstvo*, 65(1), 3-15. <https://doi.org/10.2478/agri-2019-0001>
- Restrepo, K. J., Montoya, M. I., Henao, P., Gutiérrez, L. A., & Molina, L. P. (2019). Caracterización de hongos micorrícicos arbusculares de suelos ganaderos del trópico alto y trópico bajo en Antioquia, Colombia. *Idesia (Arica)*, 37(1), 35-44. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019005000301>
- Rodríguez, M. (2021). *Evaluación de micorrizas arbusculares nativas del estado de Morelos en el desarrollo de plantas de caña de azúcar y en el biocontrol de Fusarium andiyazi* [Tesis de Maestría en Biotecnología, Universidad Autónoma del Estado de Morelos].
- Rodríguez, V., & Serrano, A. (2011). *Diagnóstico de la asociación simbiótica micorrícica arbuscular en el cultivo de papa (Solanum tuberosum) en la zona sur del Ecuador* [Universidad Técnica Particular de Loja]. https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/2210/3/UTPL_Rodr%C3%ADguez_Ojeda_Vanessa_Alexandra_1016283.pdf
- Samuel, S. S., & Veeramani, A. (2021). Advantages of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) Production for the Profitability of Agriculture and Biofertilizer Industry. *En IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95458>
- Scagel, C. F., Wagner, A., & Winiarski, P. (2005). Frequency and intensity of root colonization by ericoid mycorrhizal fungi in nursery production of blueberry plants. *Small fruits review*, 4(4), 95-112. https://doi.org/10.1300/j301v04n04_10
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). *La papa un alimento con historia y cultura*. Gob.mx. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/la-papa-un-alimento-con->

[historia-y-cultura](#)

- Senés-Guerrero, C., & Schüßler, A. (2016). A conserved arbuscular mycorrhizal fungal core-species community colonizes potato roots in the Andes. *Fungal Diversity*, 77(1), 317-333. <https://doi.org/10.1007/s13225-015-0328-7>
- Séry, D. J., Kouadjo, Z. G., Voko, B. R., & Zézé, A. (2016). Selecting Native Arbuscular Mycorrhizal Fungi to Promote Cassava Growth and Increase Yield under Field Conditions. *Frontiers in microbiology*, 7, 2063. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02063>
- Sonnino, A., & Ruane, J. (2013). La innovación en agricultura como herramienta de la política de seguridad alimentaria: el caso de las biotecnologías agrícolas. *Biotecnologías e innovación: el compromiso social de la ciencia*, 25-52. <https://www.fao.org/3/ar635s/ar635s.pdf>
- Souza, T. (2015). Handbook of Arbuscular Mycorrhizal Fungi. En *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24850-9>
- Tenorio, M. (2021). *Multiplicación de hongos micorrízicos arbusculares nativos de cacao (Theobroma cacao L.) con cultivos trampa, en Nueva Cajamarca-Rioja* [Tesis para el grado de Ingeniero Agrario, Universidad Católica Sedes Sapientiae]. https://repositorio.ucss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14095/1091/Tenorio_Miguel_tesis_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Torres, L., Cuestas, X., Rivadeneira, J., & Monteros, C. (2023). *Variedades de papa – Inventario de Tecnologías e Información para el Cultivo de Papa en Ecuador*. Cipotato.org. <https://cipotato.org/papaenecuador/variedades-de-papa/>
- Trouvelot, A., Kough, J. L., & Gianinazzi-Pearson. (1986). Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthode d'estimation ayant une signification fonctionnelle. *Mycorrhizae: physiology and genetics*, 217-221. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=8758731>
- Urgiles-Gómez, N. U., Guachanamá-Sánchez, J., Granda-Mora, K. I., & López, L. N. P. (2020). Caracterización morfológica de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) asociados al café en sistemas agroforestales de la provincia de Loja, Ecuador *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/352876767>
- Verbruggen, E., Van Der Heijden, M. G. A., Rillig, M. C., & Kiers, E. T. (2012). Mycorrhizal fungal establishment in agricultural soils: Factors determining inoculation success. *New Phytologist*, 197(4), 1104-1109. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04348.x>

- Weng, W., Yan, J., Zhou, M., Yao, X., Gao, A., Ma, C., Cheng, J., & Ruan, J. (2022). Roles of arbuscular mycorrhizal fungi as a biocontrol agent in the control of plant diseases. *Microorganisms*, 10(7), 1266. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10071266>
- Willis, A., Rodrigues, B. F., & Harris, P. (2013). The Ecology of Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 32(1), 1-20. <https://doi.org/10.1080/07352689.2012.683>

11. Anexos

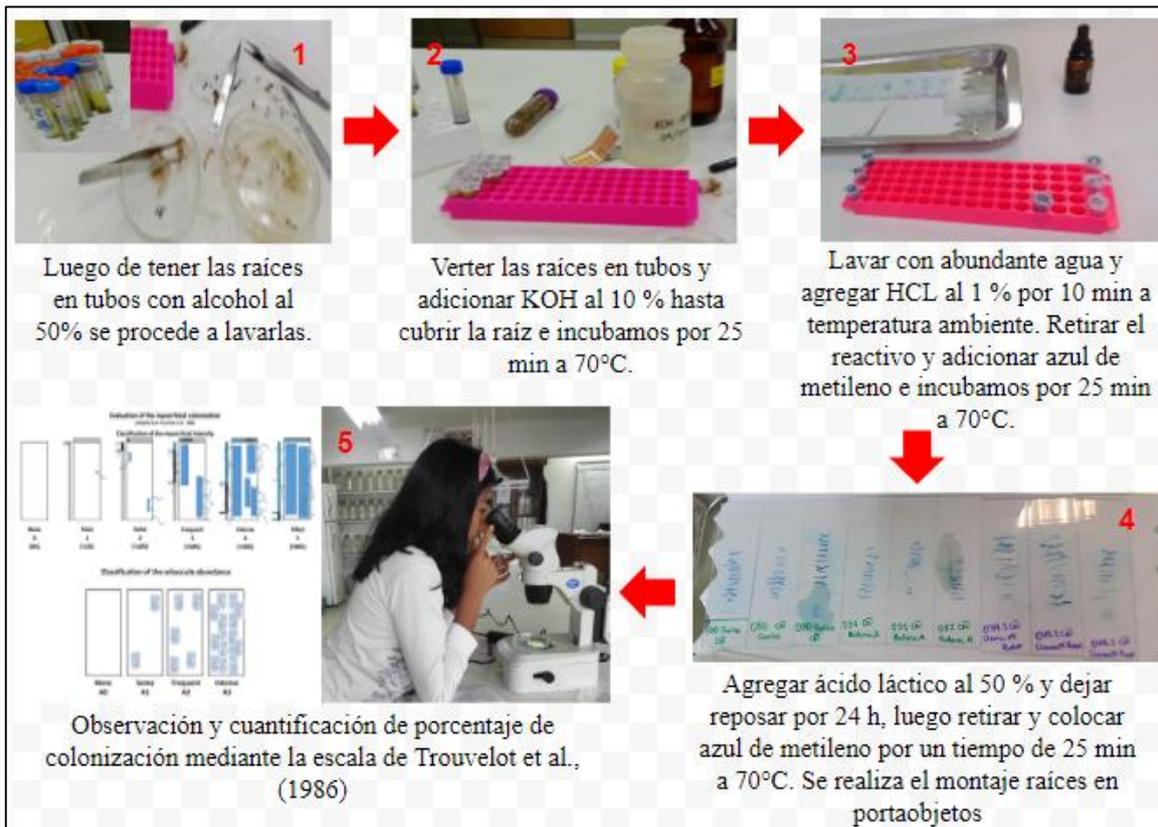
Anexo 1. Siembra de fragmentos de raíces micorrizadas por HMA en cultivos trampa de cebollín



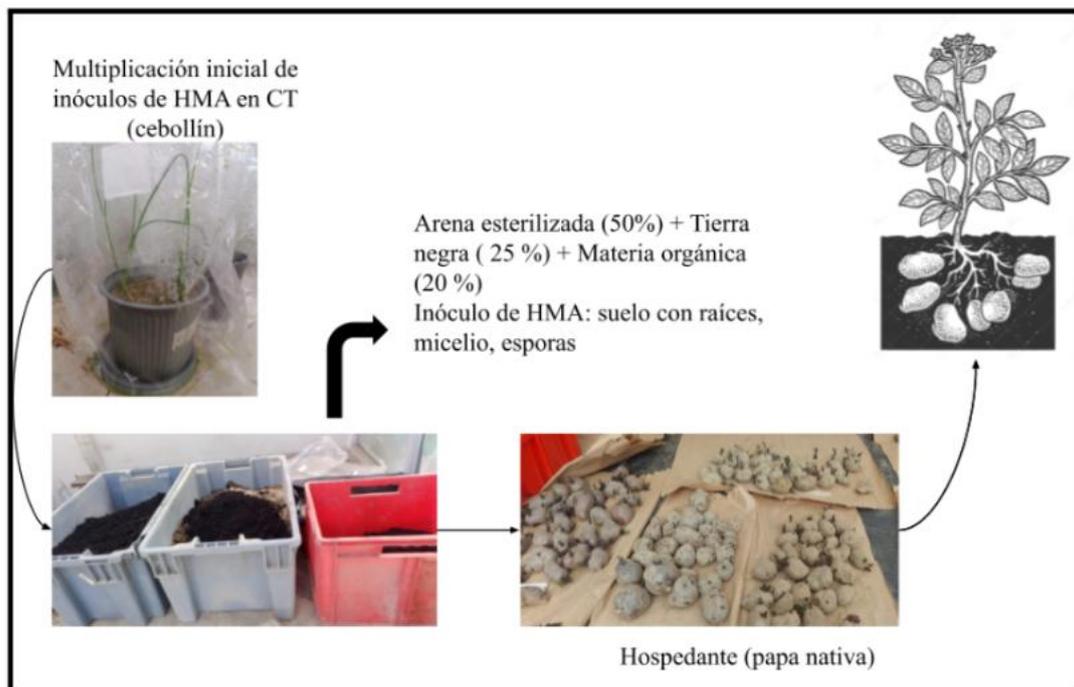
Anexo 2. Mantenimiento de los cultivos trampa a través del riego, fertilización y limpiado de fundas “sunbags”



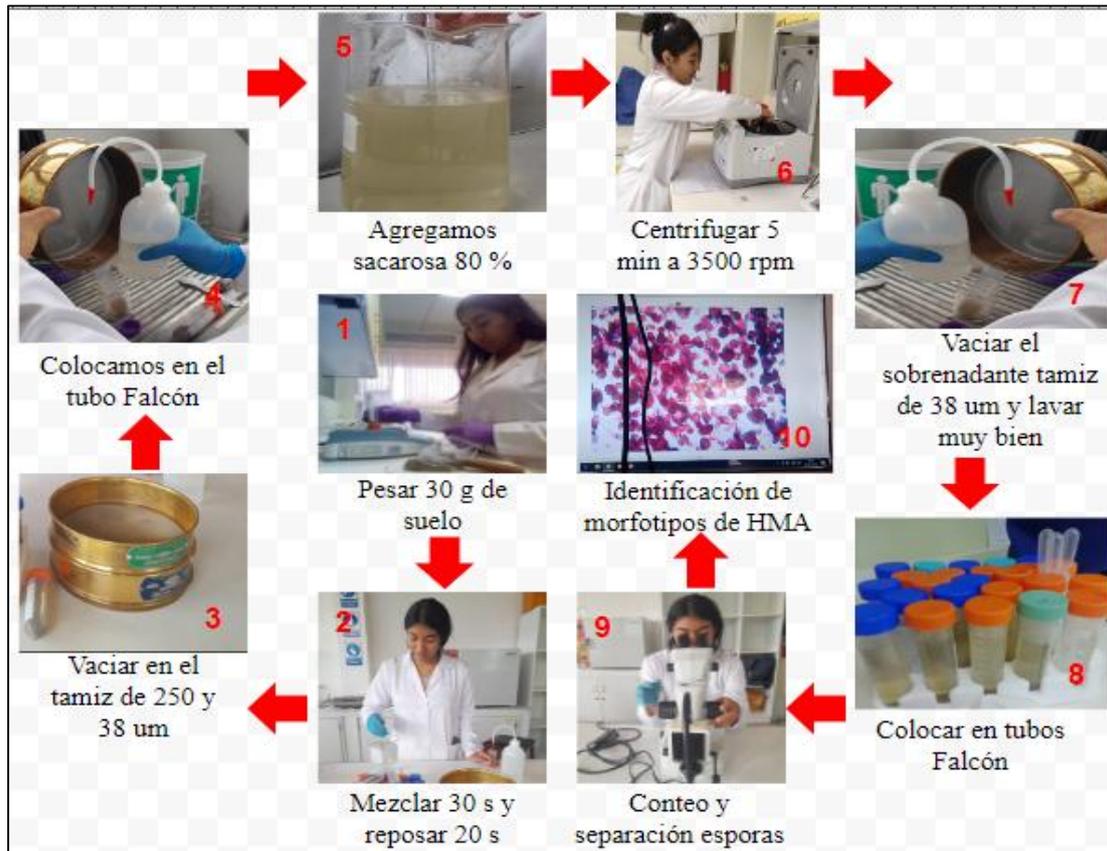
Anexo 3. Procedimiento para la tinción de HMA en raíces de papa y de cebollín (cultivo trampa)



Anexo 4. Procedimiento para la siembra masiva de inóculo de HMA en cultivo trampa (papa nativa)



Anexo 5. Procedimiento de aislamiento, conteo e identificación de esporas de HMA



Anexo 6. Fórmulas para determinar la colonización total de HMA mediante el método de Trouvelot et al. (1986).

Frecuencia de micorrización: F% = (número de fragmentos de micorrizas/número total de fragmentos observados) x 100

Intensidad de micorrización: M% = $(95n_5 + 70n_4 + 30n_3 + 5n_2 + n_1) / (\text{número total de fragmentos observados})$

Donde n_5 = número de fragmentos de micorrizas clasificados 5, n_4 = número de fragmentos clasificados 4, n_3 = número de fragmentos observados 3, n_2 = número de fragmentos clasificados 2, n_1 = número de fragmentos clasificados 1.

Intensidad de micorrización de fragmentos de micorrizas: m% = $M \times 100 / F$.

Intensidad arbuscular de la parte micorrízica: a% = $(100mA_3 + 50mA_2 + 10mA_1) / 100$

Donde mA_3 = $((95n_5A_3 + 70n_4A_3 + 30n_3A_3 + 5n_2A_3 + n_1A_3) / \text{número de fragmentos de micorrizas}) \times 100 / m$, igual para mA_2 y mA_1

Intensidad arbuscular en el sistema radicular: A% = $a \times (M/100)$

Anexo 7. Certificación de traducción Abstract

CERTIFICACIÓN

En calidad de traductor del resumen del trabajo de tesis titulado, **Establecimiento de la producción de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) asociados al cultivo de papa nativa (*Solanum spp.*) a través de cultivos trampa**, de autoría de la señorita egresada María Cristina Guamán Ojeda con número de cédula 1150198123 de la carrera de Ingeniería Agronómica en la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Loja, previa a la obtención del título de Ingeniera Agrónoma.

Es todo lo que puedo certificar en honor a la verdad, autorizando al interesado hacer uso del presente en lo que estime conveniente.

Loja, 01 de marzo de 2024

Atentamente:



Lic. Sara Patricia Chanta Jiménez, Mgs

1105366841