



**Población e infección micorrícica arbuscular en papa (*Solanum tuberosum* L.), var. Súper chola,  
con tres dosis de fertilización de fósforo en San Roque, Atuntaqui, Imbabura**

Saltos Apolo, Max Jonathan

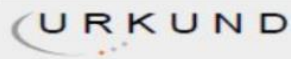
Departamento de Ciencias de la Vida y la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Agropecuario

MSc. Basantes Morales, Emilio Rodrigo

24 de marzo 202



## Urkund Analysis Result

Analysed Document: Tesis Max Saltos final.docx (D95836721)  
Submitted: 2/17/2021 8:25:00 PM  
Submitted By: paperez11@espe.edu.ec  
Significance: 5 %

### Sources included in the report:

TRABAJO-DE-TITULACIÓN-CASTRILLÓN-ALEXANDER.docx (D62707334)  
DÍAZ TRELLES FERNANDO.pdf (D8438713)  
[http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/99599/Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf%3Fsequence%3D4%26isAllowed%3Dy](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/99599/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf%3Fsequence%3D4%26isAllowed%3Dy)  
<http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/9792/2/PG%20761%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>  
[https://www.researchgate.net/publication/267035289\\_Evaluacion\\_del\\_estado\\_de\\_micorrizacion\\_de\\_Vallea\\_stipularis\\_y\\_Hesperomeles\\_goudotiana\\_y\\_efecto\\_de\\_la\\_aplicacion\\_de\\_micorrizas\\_arbusculares](https://www.researchgate.net/publication/267035289_Evaluacion_del_estado_de_micorrizacion_de_Vallea_stipularis_y_Hesperomeles_goudotiana_y_efecto_de_la_aplicacion_de_micorrizas_arbusculares)

### Instances where selected sources appear:

10

EMILIO RODRIGO  
BASANTES MORALES

Firmado digitalmente por  
EMILIO RODRIGO  
BASANTES MORALES  
Fecha: 2021.04.21  
21:24:12 -05'00'



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación: **“Población e infección micorrízica arbuscular en papa (*Solanum tuberosum* L.), var. Súper Chola, con tres dosis de fertilización de fósforo en San Roque, Atuntaqui, Imbabura”**, fue realizado por el Sr. **Max Jonathan Saltos Apolo**, el mismo que ha sido revisado en tu totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente de forma pública.

Sangolquí, 24 de marzo 2021

EMILIO RODRIGO  
BASANTES  
MORALES

Firmado digitalmente  
por EMILIO RODRIGO  
BASANTES MORALES  
Fecha: 2021.04.21  
21:26:12 -05'00'

---

**Ing. Emilio R. Basantes, M.Sc.**

Cc: 1704709797



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Max Jonathan Saltos Apolo**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Población e infección micorrízica arbuscular en papa (*Solanum tuberosum* L.), var. Súper Chola, con tres dosis de fertilización de fósforo en San Roque, Atuntaqui, Imbabura”** son de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

En consecuencia, el contenido de esta investigación es veraz.

Sangolquí, 24 de marzo 2021



Max Saltos  
Firma Electrónica  
totem2.34.513.78.3972.

**Saltos Apolo, Max Jonathan**

CC: 1715968515



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y LA AGRICULTURA

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Max Jonathan Saltos Apolo**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Población e infección micorrízica arbuscular en papa (*Solanum tuberosum* L.), var. Súper Chola, con tres dosis de fertilización de fósforo en San Roque, Atuntaqui, Imbabura”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 24 de marzo 2021



Max Saltos  
Firma Electrónica  
totem2.34.513.78.3972.

---

**Max Jonathan Saltos Apolo**

CC: 1715968515

## Dedicatoria

*Dedico esta investigación a todas esas personas que anhelan la construcción de un nuevo paradigma de relación entre la producción y el consumo de alimentos libre de explotación social, ambiental y de agroquímicos.*

*Dedico este trabajo a Cecilia Apolo madre y padre, que en momentos de incertidumbre pudo tomar las mejores decisiones llenando el camino de sabiduría, valor y amor.*

*A mis hermanos Napo, Maritza y Mónica Saltos que fueron, son y serán una guía de constante aprendizaje, amor, confianza, equilibrio y apoyo sin ustedes no hubiera logrado.*

*A mis sinvergüenzas Kenny, David, Sebas, Dany, Mía y Natasha que son mi fuente de inspiración, les dejo este trabajo como constancia que se puede cumplir sus metas con esfuerzo y que es más grande tus sueños que el miedo.*

*A la Familia Apolo por ser el ejemplo de unidad, solidaridad, afecto y demostrar que es posible vivir en comunión en especial a Máximo Apolo y Galo Navarro por dejar una huella de amor.*

*A la asociación LPPS (Srs. Alexander, Contrerillas y José; y las Srtas. Ardiana y Mona) quienes más que amigos en este camino se convirtieron en parte de la gran familia.*

*Al Msc. Daniel Valdez y al Msc. Juan Sosa, hermanos de diferentes madres.*

### **Agradecimiento**

Agradezco a la fuerza por colocarme en esta familia quienes con esfuerzo, sabiduría y sacrificio pudieron encaminarme durante todo este ciclo de aprendizaje.

Al Msc. Emilio R. Basantes por su esfuerzo apoyo, su conocimiento, por la confianza transmitida y la gran capacidad de resolver problemas.

A la Dra. María Emilia Medina por extenderme la invitación a formar parte de esta investigación. Además por transmitir su luz en forma de conocimiento, paciencia y consejos, gracias por demostrar que aún existen personas que actúan desde un sentir.

Al Dr. José L. Pantoja ejemplo de esfuerzo, trabajo, superación y constancia; agradezco sus enseñanzas las cuales no están en un texto y porque en el camino se convirtió en amigo y mentor.

A la Ing. Eliza Plazarte por las enseñanzas impartidas en el laboratorio y sobre todo por su amistad.

A los y las trabajadores auxiliares y administrativos del IASA, por el apoyo brindado en cada evento propuesto.

## Índice de Contenido

Carátula .....	1
Reporte Urkund .....	2
Certificación.....	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación .....	5
Dedicatoria .....	6
Agradecimiento .....	7
Índice de Contenido .....	8
Índice de Tablas .....	12
Índice de Figuras .....	13
Resumen.....	14
Abstract .....	15
Capítulo I .....	16
Introducción .....	16
Problema .....	18
Causas .....	19
Efectos.....	19
Justificación .....	19
Objetivos .....	20
<i>General</i> .....	20
<i>Específico</i> .....	20
Hipótesis.....	20



Capítulo II .....	21
Revisión de Literatura .....	21
Papa .....	21
<i>Importancia</i> .....	21
<i>Desarrollo del cultivo</i> .....	21
<i>Variedades Súper Chola</i> .....	22
<i>Requerimientos nutricionales</i> .....	22
<i>Requerimientos agroclimáticos</i> .....	26
Fósforo .....	26
Hongos micorrícicos.....	28
<i>Generalidades</i> .....	28
<i>Clasificación de las micorrizas</i> .....	28
<i>Hongos micorrícicos arbusculares (HMA)</i> .....	29
<i>Ciclo de vida y el desarrollo</i> .....	29
<i>Estructura</i> .....	31
<i>Aporte nutricional de los HMA</i> .....	31
<i>Glomeromycota</i> .....	32
<i>Influencia de los HMA en los cultivos</i> .....	34
<i>Especificidad de asociación simbiótica</i> .....	35
Precio de la papa en el mercado local .....	36
Capítulo III .....	37
Materiales y Métodos .....	37
Tipo de investigación .....	37
Lugar de la investigación en campo.....	37
<i>Ubicación política</i> .....	37

<i>Ubicación geográfica</i> .....	37
<i>Ubicación ecológica</i> .....	37
Análisis inicial de suelo .....	37
Clima .....	38
Material experimental .....	38
Material complementario .....	38
Pruebas de laboratorio .....	38
Diseño experimental, factores, tratamientos y características de la unidad experimental (UE).....	39
Actividades específicas de manejo del cultivo .....	40
Variables evaluadas y metodología de evaluación.....	40
<i>Población de esporas micorrízicas</i> .....	40
<i>Tinción de raíces (para visualizar micorrizas)</i> .....	41
Productividad del cultivo .....	41
Análisis estadístico.....	41
Análisis de varianza.....	42
Análisis de correlación .....	42
Análisis económico .....	42
Capítulo IV .....	43
Resultados y Discusión.....	43
Clima .....	43
Productividad del cultivo .....	44
Número de esporas.....	45
Colonización .....	46
Análisis de correlación .....	46
Análisis económico .....	50

<b>Capítulo V .....</b>	<b>51</b>
<b>Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>51</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>51</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>51</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>52</b>

**Índice de Tablas**

<b>Tabla 1</b> <i>Función y deficiencia de N ,P, K, S, B, Cu, Ca, Mg, Zn y Fe en papa</i> .....	24
<b>Tabla 2</b> <i>Detalle de tratamientos, presencia o ausencia de hongos HMA en la siembra y dosis de <math>P_2O_5</math>.</i> ....	39
<b>Tabla 3</b> <i>Esquema del análisis de varianza</i> .....	41
<b>Tabla 4</b> <i>Datos climáticos del sitio experimental durante los meses de estudio</i> .....	44
<b>Tabla 5</b> <i>Análisis de varianza de la productividad del cultivo, número de esporas micorrícicas y la colonización de esporas en raíces.</i> ....	48
<b>Tabla 6</b> <i>Análisis del costo beneficio</i> .....	50

**Índice de Figuras**

<b>Figura 1</b> <i>Morfología externa de espora de micorriza</i> .....	33
<b>Figura 2</b> <i>Glomeromycota Arum (A) y París (B). Modificado a partir de Taylor y Krings (2015).</i> .....	34
<b>Figura 3</b> <i>Comportamiento de precio de papa, var. super chola, en el año 2019 en el Mercado Municipal de Quito, Ecuador. Fuente: SIPA (2020)</i> .....	36
<b>Figura 4</b> <i>Correlaciones: A) entre el número de esporas y el porcentaje de colonización, B) entre el número de esporas y la productividad, y C) entre el porcentaje de colonización y la productividad</i> .....	49

## Resumen

La necesidad del uso de herramientas tecnológicas sustentables y compatibles en la producción de papa (*Solanum tuberosum* L.) impulsa la inoculación de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) para aumentar la disponibilidad de nutrientes para la planta y regenerar las características del suelo. El objetivo fue Determinar la población e infección micorrícica arbuscular en papa, var. Súper Chola bajo tres dosis de fertilización de P. En el diseño se utilizó un DBCA con 3 niveles de P, además de la aplicación de micorrizas y un testigo. Se determinó el número de esporas por gramo de suelo, el porcentaje de la colonización, la producción y la interrelación entre estas variables. Los datos fueron analizados en el paquete estadístico SAS<sup>9.3</sup>. No se encontró diferencias en la productividad ( $P > 0.10$ ). Los tratamientos no inoculados con HMA presentaron mayor número de esporas a los 60 días ( $P > 0.10$ ). Esta colonización mantuvo una relación inversamente proporcional a la dosis de P debido al desarrollo de estrigolactona en la raíz. En cuanto a la interacción de estas variables no se observaron diferencias significativas ( $P > 0.10$ ).

**Palabras clave:** Fósforo, Micorrizas, *Solanum tuberosum*

### Abstract

The need for the use of sustainable and compatible technological tools in the production of potato (*Solanum tuberosum* L.) drives the inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) to increase the availability of nutrients for the plant and regenerate soil characteristics. The objective was to determine the population and arbuscular mycorrhizal infection in potato, var. Super Chola under three doses of P fertilization. The experimental design used a DBCA with 3 levels of P in addition to the application of mycorrhiza and a control. The number of spores per gram of soil, the percentage of colonization, production and the interrelation between these variables were determined. The data were analyzed in the statistical package SAS9.3. No differences were found in productivity ( $P > 0.10$ ). The treatments not inoculated with AMF had a higher number of spores at 60 days ( $P > 0.10$ ). Colonization was affected by the dose of P due to the development of strigolactone in the root. Regarding the interaction of these variables, no significant difference is expressed ( $P > 0.10$ ).

**Key words:** *Phosphorus, Mycorrhizae, Solanum tuberosum*

## Capítulo I

### Introducción

Entre los principales cultivos a nivel mundial se encuentra la papa (*Solanum tuberosum* L.); es una de las principales fuentes de carbohidratos, vitaminas y minerales en la dieta humana (Reátegui *et al.*, 2019). Según la FAO (2018), el área cosechada de papa en el 2018 fue de  $17.5 \times 10^6$  ha y la producción fue de  $368.7 \times 10^6$  t, de las cuales el 30% están en China e Indonesia.

MAG (2019), menciona el mercado de la papa en Ecuador presenta una alta demanda por parte de los consumidores e indispensable en la canasta básica (porque se encuentra entre los diez productos con mayor consumo). Ecuador consume 23 kg per cápita de papa, superado solo por Perú (80 kg) y Chile (51 kg) dentro de Latinoamérica FAO (2019). Las exigencias del mercado han obligado el aumento de la productividad, con el uso excesivo de agroquímicos que intoxican los suelos (Phillip, 2014).

En la década de los 40 se implementó el uso de fertilizantes y pesticidas para aumentar la producción y disminuir las labores culturales. Este sistema de producción tuvo un impacto en la agricultura en diferentes ámbitos, entre ellos, los principales fueron: disminución de la fertilidad del suelo y contaminación con pesticidas en los alimentos de consumo humano Ceccon (2008). Como consecuencia, la producción de los cultivos mantiene una estrecha dependencia con los fertilizantes, porque de cada 100 kg de alimento, 30 kg son el efecto de fertilizante (Ceccon, 2008; MAG, 2019; Romero, 2014).

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe aspira a generar un cambio en el sistema de producción agrícola, donde se priorice la utilización de bioinsumos (productos de origen biológico e inoctrinos con el ambiente) para disminuir la dependencia de agroquímicos (CEPAL, 2019). Las micorrizas se presentan como una alternativa, por su capacidad de aumentar la disponibilidad de nutrientes, disminución de la incidencia de



patógenos y la reducción de fertilizantes. Estos factores disminuyen el costo de producción (Ortaz, 2019).

Ramírez *et al.* (2010) describe el inicio de la infección micorrícica en papa con la estimulación de fitohormonas radiculares, activando a las esporas o propágulos, que forman hifas exploratorias con la capacidad de colonizar la rizósfera. El tiempo de colonización varía entre 8 a 12 semanas, en función de la especie inoculada (Duffy 2000) y el genotipo de la planta (Coob *et al.*, 2016). Además, se requiere establecer parámetros adecuados de lámina de riego y porcentaje de materia orgánica (MO) para beneficiar la colonización micorrícica (Ortas, 2019). En varias investigaciones se determinaron que la fertilización con altas cantidades de N y P, disminuyen el grado de micorrización y la permanencia de esporas en el suelo (Thioub, 2019; Alghamdi, 2020).

Wang *et al.* (2016), indica que el 80% de especies vegetales aceptan la interacción micorrícica. Aunque no se establece una especificidad, existen diferentes efectos (positivo o negativo) por parte de la asociación micorrícica sobre la planta (Thioub, 2019). Además, en la inoculación de microorganismos en el suelo, existe una interacción entre el microbiota preexistente que podría suprimir o potencializar el efecto de los microorganismos en la planta (Chenchouni *et al.*, 2019).

La calidad del tubérculo de papa se distingue entre interna y externa. En el exterior se requiere poca profundidad de ojos, sin daños físicos, con un tamaño y forma homogénea que permita la sistematización de los procesos industriales (Pumishaco y Sherwood, 2002). Las condiciones internas están relacionadas con la variedad y el manejo del cultivo (Huarte y Capezio, 2014). Según Arribillaga (2013), los parámetros medibles son: coloración enzimática, contenido de sólidos (> 20%), color de la pulpa, decoloración después del cocido, contenido de azúcares reductores (0.04%-1.00%).

La deficiencia de P en el plan de fertilización se refleja en el número de tubérculos por planta y en el contenido de materia seca de cada uno de ellos (Fernández, 2016). Este efecto se debe a que el P permite la acumulación y producción de almidón (representa del 60 a 80% de la materia seca del tubérculo) en la época de tuberización (Hasbún, 2009). Además, la deficiencia presenta manchas necróticas en el interior del tubérculo (Becerra, 2007). Malhoret *al.* (2018), menciona que la falta de P disminuye la gravedad específica (GE) de los tubérculos, porque se puede correlacionar con los sólidos totales y el porcentaje de almidón. Este factor aumenta el rechazo del tubérculo, disminuye el precio y la utilidad esperada.

El interés comercial de las HMA se relaciona con el potencial para incrementar la productividad de los cultivos, disminuir costos y aumentar la concentración de metabolitos secundarios en la parte aérea y subterránea de las plantas; es decir ampliar el valor agregado de éste comoditi (Srivastava, 2017). Pero este efecto depende de la selección correcta de la especie inoculada. El desconocimiento de la especificidad de infección genera que las casas comerciales distribuyan microorganismos que no generan beneficios para el productor. Según Martín (2017), *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* se ha probado en 35 países, 19 cultivos diferentes con incrementos productivos de hasta 45%. Este microorganismo se evaluó en Ecuador por Sotomayor *et al.* (2017), en aguacate (*Persea americana* Mill.) cultivar "Criollo" aumentando el tamaño de la planta y el calibre del fruto. Al ser escaso las investigaciones de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* en papa en Ecuador, es necesario evaluar el comportamiento en el campo de la población y la capacidad infectiva de las micorrizas arbusculares en el cultivo de papa.

### **Problema**

El uso excesivo de agroquímicos en el manejo del cultivo de papa genera susceptibilidad a plagas y enfermedades. Esto afecta la fertilidad del suelo, el equilibrio

ambiental, los costos de producción y la salud tanto del productor como del consumidor.

Además, los productos biológicos que se hallan en el mercado no se encuentran evaluados en papa.

### **Causas**

Desconocimiento del uso y efectos de los agroquímicos.

Carencia de análisis de suelos y su utilidad.

Desconocimiento de la microbiota del suelo.

Desconocimiento de la interacción planta micorriza.

Limitada disponibilidad de bioinsumos en casas comerciales.

### **Efectos**

Presencia de fitotoxicidad por combinación inadecuada de agroquímicos.

Pérdida de la fertilidad del suelo (acidificación, alcalinización, bloqueo de nutrientes en el suelo).

Reducción de carga de microorganismos benéficos (*Pseudomonas*, *Bacillus*, *Lactobacillus*, *Azotobacter*).

Disminución del porcentaje de colonización de las micorrizas.

Bajo conocimiento de tecnologías amigables con el ambiente.

### **Justificación**

El consumo masivo y la producción de papa en Ecuador reflejan la necesidad de garantizar productos de calidad, sustentables y con margen económico rentable. El crecimiento poblacional y la capacidad infectiva de las micorrizas arbusculares en las raíces del cultivo de papa requieren una tecnología alternativa para la producción. Con ello se busca disminuir costos y el uso de agroquímicos que generan pérdida de la fertilidad del suelo, daños ambientales y enfermedades en los seres humanos. Además, es importante

verificar que los productos comerciales contengan inóculos compatibles con el cultivo evaluado y que generen efectos significativos en términos productivos.

## **Objetivos**

### ***General***

Determinar la población e infección micorrícica arbuscular en papa, var. Súper Chola, con tres dosis de fertilización de fósforo en San Roque, Atuntaqui, Imbabura.

### ***Específico***

Determinar la población e infección inicial de micorrizas en el suelo de papa.

Determinar la población de micorrizas bajo diferentes dosis de fertilización con P, a los 60 días de la siembra, 120 d (tiempo de floración) y antes de la cosecha.

Determinar el efecto de la dosis de P en el grado de infección de micorrizas.

Evaluar la diferencia en la colonización entre las plantas inoculadas y las no inoculadas.

Determinar la relación entre el porcentaje de infección, la colonización y la productividad de papa.

Determinar la relación costo beneficio del uso de micorrizas en la producción de papa.

## **Hipótesis**

**H<sub>0</sub>**. La inoculación de micorrizas y fertilización con P no aumenta la población e infección de micorrizas ni la productividad del cultivo de papa.

**H<sub>1</sub>**. La inoculación de micorrizas y fertilización con P si aumenta la población e infección de micorrizas y la productividad del cultivo de papa.

## Capítulo II

### Revisión de Literatura

#### Papa

##### ***Importancia***

La papa es uno de los tubérculos más cultivados en el mundo; en el 2017 alcanzó una producción de  $388 \times 10^6$  t en  $19 \times 10^6$  ha. En el Ecuador se encuentra entre los principales cultivos de consumo interno (29.73 kg/año/persona), representando el 4% del PIB. La producción se distribuye en 11 provincias del Ecuador. El alcance laboral es de 84000 empleos directo e indirecto; estos datos convierten a la papa en un cultivo indispensable desde el aspecto cultural hasta lo económico (FAOSTAT, 2018; Mejía, 2016).

En la base de datos de MAG (2019) la productividad media del Ecuador es de  $16 \text{ t ha}^{-1}$ . La provincia de Pichincha presenta la mayor productividad ( $21 \text{ t ha}^{-1}$ ) y la de Cotopaxi ( $9 \text{ t ha}^{-1}$ ) la menor productividad. Según Lojan y Suárez, (2017) para el 52% de los productores de papa es su única fuente económica. Esta cifra marca la necesidad de aumentar la productividad o disminuir los costos de operación con un enfoque sustentable (MAG, 2019).

##### ***Desarrollo del cultivo***

El ciclo del cultivo en Ecuador es alrededor de 180 d. El proceso inicia con la dormancia de la semilla por 2 a 3 meses. Se induce la ruptura de la dormancia mediante citoquininas, ácido giberélico, aceites esenciales o factores ambientales, que inducen la brotación (Cortez, 2010; Shukla, 2019; Ramírez *et al.*, 2010). A los 10 - 12 d es ideal tener 3 brotes vigorosos por semilla. La etapa vegetativa inicia después de la brotación. Los tallos, hojas, raíces, flores y estolones se desarrollan. La tasa de división celular y el gasto energético aumenta, requiriendo una alta demanda de nutrientes, agua y labores culturales (Cortez, 2010; Reátegui, 2019). Además, según Huarte y Capezio (2014) la floración del cultivo marca el

comienzo de la tuberización, el crecimiento vegetativo se paraliza, los nutrientes se traslocan y estimulan el desarrollo de los estolones. La senescencia de la parte aérea marca el comienzo de la maduración fisiológica del tubérculo. Después de esta etapa se encuentra listo el tubérculo para su cosecha.

### ***Variedades Súper Chola***

Es la variedad más consumida según INIAP (2016) en el Ecuador con un índice de consumo de 30.4%. La Súper chola resulta de cruzar dos híbridos: *Curipamba* negra x *Solanum demissum* por clon resistente x chola seleccionada en la provincia del Carchi liberada en la década de los ochenta (Espinosa *et al.*, 1998). Su uso es múltiple, desde el uso familiar en sopas hasta papas fritas manufacturadas; una de las razones para su amplia distribución en el Ecuador es su tolerancia al nematodo (*Globodera pallida*), y su productividad es de 20 - 30 t ha<sup>-1</sup>, con un contenido de materia seca del 23% (CIP, 2011;).

Los tubérculos mantienen una forma ovalada, con un tono rosa predominante y una pigmentación crema en el centro. Los brotes son blancos con morado en los bordes. Las flores son de color morado y en el centro se encuentra el androceo en forma de estrella. Las hojas en su madurez son compuestas con cuatro folíolos en cada lado. El crecimiento de su tallo es erecto de color verde (CIP, 2011; MAG, 2019).

Para Huarte y Capezio (2014) la densidad recomendada es de 15 a 20 tallos por m<sup>2</sup>, con un distanciamiento entre surcos de 1,10 m y entre plantas es de 0,30 m. El clima que se recomienda es el templado frío, con una altitud de 2700 a 2900 msnm. Estos valores concuerdan con la zona andina del Ecuador (MAG, 2016).

### ***Requerimientos nutricionales***

La papa se caracteriza por una alta demanda de nutrientes, en especial de N y K (Hernández *et al.*, 2012; Soratto *et al.*, 2020), sin embargo, la baja disponibilidad de P en el

suelo, aumenta la dosis requerida, que llegan a sobrepasar al N y K (Mokrani *et al.*, 2018). La recomendación de nutrientes se basa en la fertilidad del suelo, condiciones climáticas, pH del suelo, riego, temperatura, fertilidad biológica y producción esperada. Se requieren 3.3, 1, 5, 0.7 y 0.4 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO, MgO, respectivamente, por cada tonelada cosechada de papa (Dvořák *et al.*, 2016). Las necesidades nutricionales para una producción esperada de 35 t ha<sup>-1</sup>, es de: 250, 90, 390, 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O y CaO.

El calendario de fertilización debe planificar la disponibilidad de nutrientes de forma oportuna en función del requerimiento del cultivo, etapa fenológica y el análisis del suelo para asegurar el rendimiento. El término nutriente se refiere al elemento que necesita la planta el cual cumple con característica de ser: irremplazable por otro elemento, permite el óptimo desarrollo de la planta e interviene en una ruta metabólica específica. Los nutrientes se dividen en macro nutrientes (N, P, K, S, Ca y Mg) y micronutrientes (B, Co, Cu, Fe, Mo, Mn y Zn) (Barcelo, 2019).

Se denominan macronutrientes por su alta presencia en la materia seca de la planta. El cultivo de papa requiere mayor cantidad de K que de N, debido a la fragmentación de carbohidratos. Coraspe (2009) determinó que la planta de papa contiene 236 mg de K. El N contiene 198 mg y forma parte constitutiva de las proteínas, las coenzimas, las enzimas y la clorofila, entre otras. El exceso de N produce un retraso de la floración, aumento del follaje, susceptibilidad a las plagas debido a radicales libres y pérdida de la calidad del tubérculo.

**Tabla 1**

*Función y deficiencia de N, P, K, S, B, Cu, Ca, Mg, Zn y Fe en papa*

<b>Nutriente</b>	<b>Efecto</b>	<b>Deficiencia</b>
N	Estimula el crecimiento vegetativo Alta relación con la productividad Interviene en la fotosíntesis	Disminuye el transporte de fotoasimilados de las hojas a los tubérculos Reducción del área foliar Reducción del tamaño del tubérculo. Clorosis foliar
P	Su correlación es positiva con la disminución de glucosa en el tallo Intervienen en la fotosíntesis	Reducción de la asimilación de carbono Disminuye la resistencia a enfermedades Hojas y tallos con tonos azules Crecimiento menor al promedio Plantas pequeñas
K	Estimula la enzima sintasa, para la acumulación de almidón en el tubérculo. Aumenta el tamaño del tubérculo	Necrosis en la zona apical Reducción del área foliar en hojas nuevas Necrosis en el ápice de la hoja y las nervaduras
S	Esta relacionado con los procesos fotosintéticos, en la formación de clorofila e inductor de la floración	Disminuye el tamaño de la hoja El follaje presenta un tono amarillo pálido
B	Interviene en la división celular, en la estructura de la pared celular y en la fecundación de la flor	Hojas arrugadas Ápices y brotes necrosados



Nutriente	Efecto	Deficiencia
Cu	<p>Interviene en desintoxicación de radicales superóxido.</p> <p>Coenzima en procesos enzimáticos y en la formación de la pared celular</p>	<p>Hojas jóvenes con tonos azules</p> <p>Clorosis en las hojas</p> <p>abscisión de hojas maduras</p> <p>Retardo en la floración</p>
Ca	<p>Conforma el plasmalemma de la estructura de la pared celular, permite la absorción de otros nutrientes. Estimula la secreción de auxinas en las células meristemáticas. Retarda la senescencia de los cultivos</p>	<p>Las hojas juveniles presentan clorosis, deformaciones en su estructura. El retraso en el crecimiento de las raíces es. Putrefacción en la punta de los frutos.</p>
Mg	<p>Cofactor en el proceso de fosforilación enzimática. Factor para almacenar azúcares en la planta y la formación de carbohidratos</p>	<p>Las hojas maduras presentan clorosis entre las nervaduras llegado a la necrosis. La caída de hojas es prematura. Disminuye la concentración de carotenoides.</p>
Zn	<p>Oxidación de los radicales libre, influencia en la producción de precursores de ácido indolacético e interviene en la viabilidad del polen.</p>	<p>Reducción del área foliar, clorosis en la zona entre las nervaduras de las hojas y entrenudos cortos.</p>
Fe	<p>Interviene en el proceso de oxidación y reducción de la fotosíntesis.</p>	<p>Clorosis en las hojas nuevas mientras que las nervaduras se oscurecen</p> <p>Hojas sin color</p>

Fuente: Mokrani *et al.* (2018), Delgado (2015)

### **Requerimientos agroclimáticos**

La temperatura óptima para el crecimiento de la papa varía entre 12 y 18 °C durante el desarrollo vegetativo y la tuberización. Es necesario que exista una diferencia de 10 °C entre el día y la noche (Reategui *et al.*, 2019). Si la diferencia es menor y constante durante el ciclo de producción esta condición afectará al desarrollo y la tuberización, porque es una planta termoperiódica (Lim, 2016). Las temperaturas altas estimulan el desarrollo vegetativo, pero limitan el desarrollo del tubérculo (Román y Hurtado, 2002). Además, se requiere fotoperiodos de 8 a 12 h luz d<sup>-1</sup> para la producción de glucosa que es almacenada en forma de tubérculo (Reategui *et al.*, 2019).

La precipitación óptima es de 600 mm durante todo el ciclo del cultivo, aunque este requerimiento depende de cada variedad. Por su altura soporta vientos ligeros no mayores de 20 km h<sup>-1</sup>, es frecuente el uso de barreras rompe vientos que eviten el daño de las hojas y el tallo, además la altitud ideal de siembra es de 1500 a 2500 msnm (Román y Hurtado, 2002).

### **Fósforo**

El P es un macro nutriente que es absorbido en su forma de fosfato mono y diácido, es de movilidad reducida en comparación con otros elementos que se absorben en forma de anión (N y S) (Mokrani *et al.*, 2018). Además, en el estudio de Wan (2019) establece que la disponibilidad de P en la solución del suelo es favorable. Además, es dependiente de parámetros como: humedad, textura del suelo, saturación de bases, pH del suelo, coloides inorgánicos y la MO.

En el suelo existe P orgánico e inorgánico, pero es el ortofosfato inorgánico en la solución en que se asimila por la planta (Wan, 2019). La región Sierra posee el 80% de suelos tipo Andisoles, que se caracterizan por la baja disponibilidad de P en especial por dos factores: 1) Minerales amorfos como halloisita imogolita y alófonos que fijan el P en su

superficie, desplazando el Si estructural; y 2) Complejo humus-Al (HAL), donde el humus genera complejos con metales que captan C y fijan el P por la reacción con el  $\text{HPO}_4^-$  y  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , lo cual ocurre por lo general a alturas > 2700 msnm, con pH ácido y alto contenido de MO (Espinosa, 2008).

El P cumple un rol vital en la fisiología de las plantas porque interviene en la transferencia de energía, fotosíntesis y respiración (Becerra *et al.*, 2007). El 0.03 al 0.05% de la materia seca de la planta representa la concentración de P. En las primeras etapas fenológicas de las plantas se requiere altos contenidos de P que permitan la división celular y producción de raíces nuevas (Mazetti *et al.*, 2017). Además, forma parte estructural de fosfoproteínas, fosfolípidos, coenzimas ARN y ADN (Fernández y Sorrato, 2016). La suma de todos estos procesos, exigen a la planta, una alta demanda de P en forma asimilable.

Las recomendaciones de la necesidad de P dependerán del análisis del suelo, poder de fijación, variedad de papa y la productividad proyectada. La FAO (2012) recomienda en Colombia  $175 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  y en República Dominicana  $95 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ . En Ecuador se recomiendan  $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , sin olvidar los factores descritos con anterioridad. Además, Pumishaco y Sherwood (2002) describen que la aplicación de  $150 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  presenta una eficiencia del 11% en la asimilación de este nutriente, mientras que la aplicación de  $420 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  disminuyó la eficiencia al 4%.

Se recomienda la fragmentación del P con énfasis en las primeras etapas del cultivo, para favorecer la división celular y el crecimiento de la raíz. Después de tres semanas de la siembra aplicar el fertilizante en chorro continua y a una distancia de 5 cm del tallo. La última fracción a la octava semana en el medio del aporque (Mokrani *et al.*, 2018).

## **Hongos micorrícicos**

### ***Generalidades***

La interacción benéfica que genera una simbiosis entre un hongo y la raíz de una planta se denomina micorriza (Adavi, 2020). Esta relación optimiza los procesos biológicos de cada especie con una mayor probabilidad de subsistencia (Thioub, 2019). Las HMA reciben carbohidratos por parte de la planta. A su vez las HMA proporcionan, un aumento del área de captación de nutrientes (despliegue del hongo en zonas donde la rizósfera de la planta, no alcanza a explorar), eficiencia en el consumo de agua y producción de glomalina. Además, proporciona una nueva vía de movilidad de nutrientes hacia las células de la raíz (Pavithra y Neelamanie, 2018; Montañaño *et al.*, 2011).

### ***Clasificación de las micorrizas***

Las Ectomicorrizas son micorrizas que acumulan hifas en la zona externa de la epidermis radical, denominándose manto. Además, el micelio del hongo fija un vínculo entre la raíz y las hifas en el espacio intercelular del córtex radical, sin llegar a penetrar sus células. La red formada por el micelio intra radical (MIR) se denomina red de Hartig (Guzman, 2017) y altera la morfología externa de la raíz, con mayor número de raíces cortas y raíces secundarias largas, de ese modo aumenta la zona de exploración del suelo (Martín, 2011). Para Montañaño *et al.* (2011), el ciclo de vida del hongo experimenta formas asexuales y sexuales de reproducción o propagación. En la fase sexual se liberan esporas, mientras que, los micelios son parte de la fase asexual. Existen 6000 especies de hongos que pertenecen a esta clasificación (Guzmán *et al.*, 2017).

Las Endomicorrizas se caracterizan por la colonización de las células corticales mediante arbusculos y vesículas. El proceso empieza con el ingreso del micelio en la epidermis radical, explora el espacio inter e intracelular mediante arbusculos, lo que aumenta el área de contacto entre el tejido de la planta y el hongo. La morfología radical no

presenta grandes cambios al compararla con las ectomicorrizas. Las endomicorrizas se clasifican a su vez en tres tipos: Orquidioides, Ericoides y Arbusculares (Mohammadi *et al.*, 2020).

Las ectendomicorrizas se caracterizan por la dualidad en el comportamiento entre endomicorrizas y Ectomicorrizas, porque a veces genera una red de Hartig, mientras que, en otras circunstancias, penetran en la célula, produce un intercambio de compuestos entre el hongo y la planta. Se diferencian dos tipos: Arbutoides, aquellas que presentan un manto plectenquimatoso y Monotropoides que se caracterizan por tener hifas externas que atraviesan a las células y colonizan a la familia Monotropaceae que pertenece al orden Ericales (Lewis, 2016).

#### ***Hongos micorrícicos arbusculares (HMA)***

Son microorganismos simbióticos obligados del *phylum Glomeromycota*, que presentan un micelio extrarradical (MER) y otro micelio intrarradical (MIR), la primera estructura absorbe los nutrientes presentes en la rizósfera, mientras que el MIR deposita los nutrientes en el apoplasto de la célula radical y también capta los nutrientes que necesitan los HMA para su desarrollo (Martín, 2011). La presencia de los HMA se establece desde el período Ordovícico, porque ayudaron al proceso de conquista de las plantas acuáticas al medio terrestre. El papel de los hongos fue promover la adaptación de las plantas a la tierra y se piensa que esta interacción hongo- planta ha tenido tal relevancia que alcanzó una alta dependencia con ellos, su simbiosis rodea el 80% de las plantas que existen en la actualidad (Fusconi y Muccierellini, 2018; Kropotkin, 1902; Montañaño *et al.*, 2007).

#### ***Ciclo de vida y el desarrollo***

Los HMA son organismos que requieren de un huésped para el desarrollo del ciclo vida. Este proceso genera un cambio a nivel molecular, fisiológico y anatómico en la planta,

como es la producción de fitohormonas para estimular la simbiosis. El hongo aumenta el número de núcleos e incrementa la actividad mitocondrial (Geurts, y Vleeshouwers, 2012).

El proceso inicia con la germinación de esporas que mantienen una independencia del material a colonizar, por ende, existe una relación directa con los factores ambientales (temperatura y humedad) para su formación (Smith, 2008), en los que involucra triacilgliceroles y el glucógeno de la spora (Bhandari, 2017); sin embargo, los exudados de la raíz generan fitohormonas que aceleran el crecimiento de las esporas (Wan, 2019). En el estudio de Akiyama y Hayashi, (2006) se determinó que la estrigolactona, es una fitohormona inhibidora del crecimiento secundario de los tallos y estimuladora de la germinación de las semillas. Esta hormona se encuentra en los exudados de las raíces y tiene la capacidad de activar el crecimiento pre simbiótico de la spora del hongo. Además, los hongos generan su propia señal de contacto para las raíces llamada *factor Myc* (Myc) (Geurts, y Vleeshouwers, 2012) que son asimiladas por los receptores de lisina de la pared radical que aumenta la secreción de estrigolactona (Gough y Cullimore, 2011).

La etapa de colonización empieza con el ingreso del hongo en la corteza de la raíz mediante el apresorio de diámetro menor a 0.2 micras (Martín, 2011). Este periodo tarda entre 2 - 3 d (Smith, 2008), el MIR se expande de forma intra y extracelular, donde inicia la división dicotómica de las hifas y arbusculos. En el momento del contacto de la hifa con la corteza de la raíz se genera un aumento de las enzimas catalasa y peroxidasa que se relacionan con la acumulación de ácido salicílico. Este evento es similar a la interacción planta-patógeno (Ramírez *et al.*, 2010; Rodríguez, 2010).

Los factores que intervienen en la efectividad de la colonización son: condición edáfica, especie vegetal e infectividad del hongo (Salloum, 2016; Wang, 2006). El desarrollo del micelio extra radical (MER) comienza con una hifa exploratoria la cual se ramifica y adquiere el nombre de BAS (branched absorption structures). La función de MER es extraer

los nutrientes de la rizósfera e intercambiar con los de la membrana peri arbuscular. Este proceso se sincroniza con la fase de colonización del MIR (Bago *et al.*, 1998).

### **Estructura**

Las esporas son estructuras de propagación asexual formada por el MER (Barrens, 2009), su morfología permite identificar el género y especie del organismo. El color varía desde tonos amarillos hasta café oscuros y su tamaño (Smith, 2008). Los arbusculos provienen de la ramificación dicotómica de las hifas en las células corticales. Aumentan la superficie de intercambio de nutrientes entre MIR hacia el MER y viceversa. El tiempo de vida promedio es de 4 - 10 d, pasado este tiempo, la estructura colapsa con la iniciación de un septo en la hifa (Ramos *et al.*, 2006; Smith, 2011). Las vesículas son cuerpos lipídicos, de forma esférica que se presentan en la terminación de las hifas, colocándose en la zona intra o extracelular de las raíces (Smith, 2008). Las vesículas se forman como reservas nutricionales del hongo después de la aparición de los arbusculos. Los géneros *Gigaspora* y *Scutellospora* no producen vesículas (Barrer, 2009). La estructura que conectan la rizósfera y el citoplasma de la célula se las denomina MIE y MER, según Smith (2008) difieren en morfología y fisiología. El MER es la bomba de succión de nutrientes del suelo mientras que el MIR es la bomba que recibe los nutrientes y los deposita en el citoplasma. Estos roles son invertidos cuando la espora necesita el C de la planta para su crecimiento (Bücking *et al.*, 2012).

### **Aporte nutricional de los HMA**

La baja disponibilidad y movilidad de elementos como el P promovió en las plantas la creación de mecanismos de nutrición, que permitan en una mayor área de absorción y transporte para sus raíces. La simbiosis micorrícica produce este efecto. Las plantas que interactúan con HMA presentan una doble vía de absorción de nutrientes, por la rizósfera y

MER, esta última permite explorar un mayor volumen de suelo y captar nutrientes (García *et al.*, 2016).

El P es muy útil para el metabolismo vegetal, pero suele ser limitante en suelos Andinos y por la escasa disponibilidad en el suelo. Los principales factores que afectan al P y su disponibilidad, es que existe una alta concentración intra radical en la solución del suelo, por lo tanto, no puede ingresar a la raíz P por difusión. Esto implica un gasto de energía de la planta en el proceso de absorción. Además, el P ingresa como orto fosfato (Pi). Las HMA almacenan el P en forma de polifosfato, con concentraciones bajas de P, que estimula el transporte de P desde MER hasta MIR. En este recorrido, el P se hace disponible, porque aumentan la solubilidad de P con la intervención de la fosfatasa ácida. La concentración de P en el suelo debe ser menor a 20 ppm para que se desarrollen las micorrizas (Bücking *et al.*, 2009; Lizarraga y Suárez, 2017; Smith y Jakobsen, 2011).

La contribución de N en la interacción entre HMA – planta, es un tema que está en discusión. Según Ortas (2019) existe una interacción positiva entre HMA y los microorganismos fijadores de N<sub>2</sub>. El P disponible incrementa, también el ATP en los procesos metabólicos de asimilación del N. En contraste, otros autores establecen que el 20% del N en las hojas proviene de micelios extrarradicales de HMA. Aunque el mecanismo de absorción está en discusión, la capacidad de las plantas micorrizadas de absorber fuentes inorgánicas de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no está en duda (Alghamdi, 2020; Bücking *et al.*, 2012). Además, las HMA regulan la concentración de metales pesados en la planta como es el caso del Zn (Xiaona y Luo, 2019).

### ***Glomeromycota***

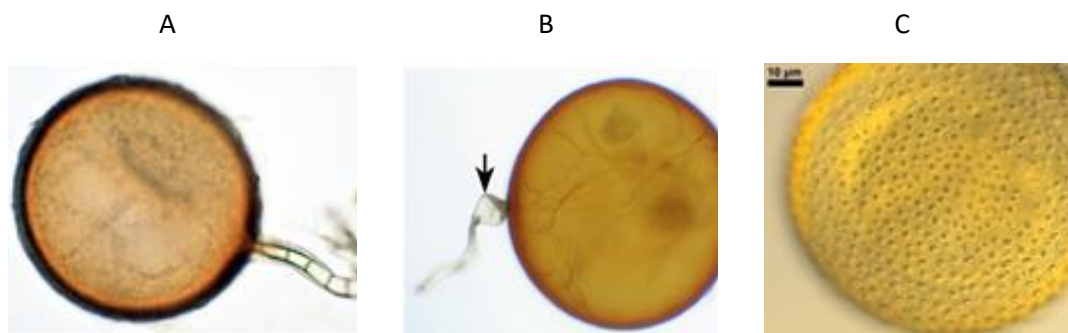
Es un phylum de los HMA que están presentes en todos los ecosistemas del planeta incluso en la Antártida, en esta relación biotrófica se reconocen 250 especies verificadas. Es inusual que estos hongos presenten hifas septadas porque la mayoría son aseptadas (sin



presencia de divisiones celulares a lo largo de la hifa), con una gran concentración de esporas multinucleadas y arbusculos. Las esporas presentan un tamaño entre 40 y 800  $\mu\text{m}$ , con la presencia de varias capas externas que sirven como herramienta para la clasificación taxonómica. Taylor (2015) mencionan que existen 3 tipos de esporas, aquellas que son producto de la inflamación de una hifa (glomoide) (Fig. 1A), las segundas presentan una base que se expande en forma de una gran espora (gigasporoide) (Fig. 1B) y en tercer lugar aquella que se forma dentro de una capsula elástica (acaulosporoide) (Fig. 1C) (Redecker, 2013; Sturmer y Pilvera, 2018; Taylor y Krings, 2015; Walker y Schubler, 2004).

### Figura 1

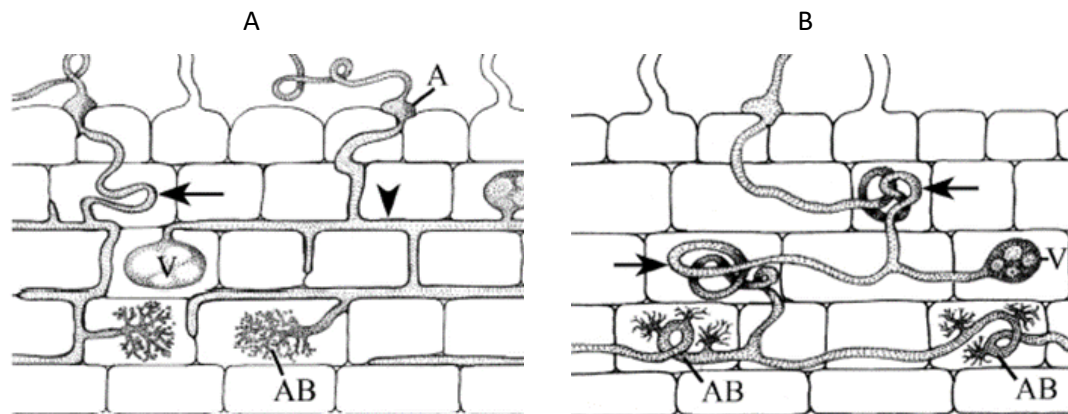
*Morfología externa de espora de micorriza.*



Existen dos tipos de HMA, que se diferencian en el desplazamiento entre las células corticales de la raíz, el primero es *Arum*: sus hifas extracelulares crecen en forma longitudinal en la raíz, con ramas cortas y con ángulos casi rectos con forma de *H*, en las células radicales (Fig. 2A) y *París*: presenta hifas intracelulares largas y en forma enrollada (Fig. 2B) (Taylor y Krings, 2015; Smith y Jakobsen 2011).

**Figura 2**

*Glomeromycota Arum (A) y París (B). Modificado a partir de Taylor y Krings (2015).*



### ***Influencia de los HMA en los cultivos***

Los nuevos mercados demandan un manejo sostenible de las producciones agrícolas con un margen de rentabilidad. Una de las alternativas es la utilización de micorrizas, que aumentan la productividad y disminuye los costos de producción. En el caso específico de la papa, se reporta un aumento de 7.3 tubérculos en plantas micorrizada en comparación con las plantas sin micorrizas (Duffy y Cassells, 2000). El costo de producción y el uso de agroquímicos tienen una relación directa, por lo que el empleo de micorrizas reduce los gastos de producción (Hijri, 2016).

Las HMA consiguen optimizar recursos ambientales desde la captación de agua hasta la disminución de fertilizantes. El efecto ambiental del fertilizante proviene de diferentes aspectos, el primero es el proceso de producción, donde se emplea: gas natural, combustibles fósiles y electricidad para su elaboración. El promedio del gasto energético es de 18.8 MgJ por cada kg de fertilizante producido. El segundo aspecto, evita la acumulación de fertilizantes en el suelo y en fuentes hídricas que disminuyen la población de microorganismos edáficos y las cianobacterias en fuentes hídricas (CIEMAT, 1997; Paerl y Otten, 2012; Zhang y Song, 2018). Alrededor del 20% del carbohidrato de la planta, se trasloca al hongo (Geurts, 2012). Estos hongos se presentan como una herramienta para la producción de cultivos sostenibles, sustentables y con margen de ganancias (Wang, 2017).

### ***Especificidad de asociación simbiótica***

No existe especificidad en la simbiosis hongo micorrícico- planta. La raíz puede ser colonizada por varios tipos de hongos y estos a su vez varias raíces. Aunque, no exista especificidad comprobada, hay un grado de susceptibilidad y efecto de cada especie de HMA en las plantas (Ramírez *et al.*, 2010). En *Medicago truncatula* se reporta que la presencia de *Gigaspora margarita*, produce necrosis en el tejido colonizado (Ramírez *et al.*, 2010) y poliploidia (Carotenuto, 2019), mecanismo que impide la simbiosis micorrícica. Mientras que en *Allium cepa* la respuesta fue positiva, al aumentar la longitud radicular (Tawaraya, 2007).

El 20% de las plantas no presentan una asociación micorrícica, se estima que existen factores coevolutivos que no permiten esta simbiosis (Wang *et al.*, 2016). Los exudados de la rizósfera no estimulan el crecimiento de la hifa de la espora (Ramírez *et al.*, 2010). Se generan mecanismos de defensa, mediante la producción de proteína PR1 (proteína relacionada con la patogénesis) (Álvarez, 2012) y ácidos fenólicos (exudados supresores de patógenos) (Yuan *et al.*, 2018).

Existen tres etapas en la simbiosis de HMA: 1) Etapa de germinación, donde la hifa explora el medio sin la necesidad de un estímulo; 2) Etapa de estimulación, en la cual los compuestos radiculares inducen el crecimiento de hifas; y 3) Etapa simbiótica, se da la asociación HMA-planta, con el crecimiento del MER y MIR. En la etapa 2 se requiere la señal de estrigolactonas específicas para activar rutas transcripcionales que inducen el crecimiento de las hifas, siendo ésta, la primera selección entre plantas hospederas y no hospederas. En la etapa 3 las quinasas receptoras de la lisina (LysM) de la membrana, receptan el estímulo de la señal fúngica Myc (mezcla de sulfatado y lipochito-oligosacáridos no sulfatados), desencadenando la transcripción de genes relacionados con la simbiosis, siendo otro mecanismo de selección para la asociación (Bhandari y Garg, 2017).

Según Mallon *et al.* (2018), la Hipótesis de diversidad-invasibilidad (DIH) es la presión que ejerce la comunidad microbiana en los microorganismos invasores (MI) y estos a su vez a las bacterias del suelo. Esta incursión de MI puede generar una fuga de la comunidad residente o un aumento de la diversidad y la amplitud del nicho; además, se asume que la diversidad del suelo tiene una relación inversa con el efecto de los MI. Mientras que, Ferreira *et al.* (2020), describen los efectos sinérgicos entre bacterias y micorrizas inoculadas como en el caso de la familia Oxalobacteraceae con *Glomus mosseae*. Estas dos hipótesis apuntan a la necesidad de establecer un estudio previo de carga y compatibilidad microbiana del suelo.

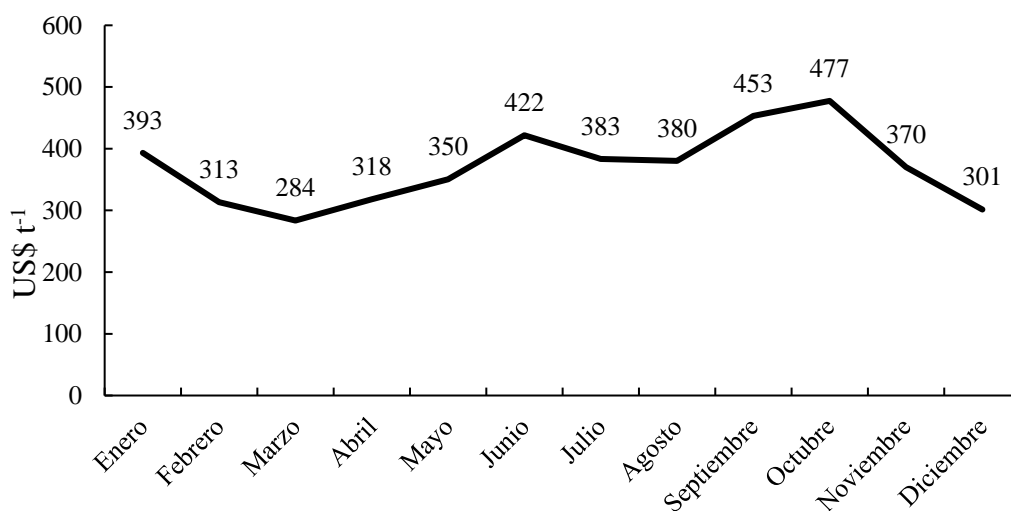
Estos mecanismos de estimo-respuesta a las cuales están sometidas las interacciones microbianas, son omitidos por los comerciantes de microorganismos, los cuales distribuyen sus productos sin discriminación. Como resultado, se incrementan los costos de producción sin un beneficio cuantificable.

### Precio de la papa en el mercado local

En los datos presentados en el portal del sistema de información pública agropecuaria del Ecuador (SIPA) el promedio de venta de la tonelada de papa superchola en el punto de producción fue de 370\$, en el mes de marzo costó US\$ 284 mientras que en octubre alcanzo US\$ 477 (Fig. 3), estos datos marcan la variabilidad del mercado que según Vega (2019) responde a la sobreproducción. Durante cuatro meses del año el precio fue menor a US\$ 318 si contrastamos con el costo de producción que oscila entre 220 a 263 t el margen de ganancia es bajo. Esto resalta la necesidad de evaluar tecnologías (como las micorrizas) para bajar los costos de producción (fertilizantes, agroquímicos, riego).

### Figura 3

*Comportamiento de precio de papa, var. super chola, en el año 2019 en el Mercado Municipal de Quito, Ecuador. Fuente: SIPA (2020).*



### Capítulo III

#### Materiales y Métodos

##### Tipo de investigación

Se realizó una investigación experimental con dos componentes: Fase de producción de cultivo en campo y fase de laboratorio en el Departamento de Biotecnología de la ESPE.

##### Lugar de la investigación en campo

###### *Ubicación política*

Provincia:	Imbabura
Cantón:	Atuntaqui
Parroquia:	San Roque
Sector:	El Cerotal

###### *Ubicación geográfica*

Latitud:	0°17'32.0"
Longitud:	78°13'35.0"

###### *Ubicación ecológica*

Altitud:	2600 msnm
Temperatura media:	14 °C
Precipitación anual:	1200 mm
Zona ecológica:	Bosque semihúmedo - Montano Bajo.
Región:	Húmedo temperado (GAD Antonio Ante, 2012)

##### Análisis inicial de suelo

Para establecer el plan de fertilidad, se realizó un muestreo previo a la instalación del ensayo. Mediante el barreno, se extrajeron 15 submuestras de suelo a 20 cm de profundidad, distribuidos de forma aleatoria en el terreno. Se mezclaron las submuestras y se envió 1 kg al laboratorio. El procesamiento de la muestra inició al secar la misma a

temperatura ambiente, posteriormente para eliminar rocas grandes se tamiza y homogeniza. Se dividió en función de la cantidad requerida para cada procedimiento. Para determinar el contenido de Cu, Zn, Fe y Mn se extrajo mediante ácido dietilentriaminopenta acético. Para determinar el contenido de Ca, NH<sub>4</sub> y K se utilizó NaCl al 0.05 M. Para determinar el contenido de P se usó el método Olsen. Para analizar las características del suelo se empleó: conductividad eléctrica mediante el volumen 1:2 en H<sub>2</sub>O, MO con la metodología AOAC 967.05, el pH se midió en KCl 1.0 M, con el volumen 1:2 (AOAC, 1990).

### **Clima**

Las variables elegidas fueron precipitación y temperatura, desde Julio hasta Diciembre (tiempo que duro el cultivo). La información se obtuvo de la base de datos del sistema meteorológico EOS Climate Inc. (2020).

### **Material experimental**

Semilla de papa var. Súper Chola.

Cepa de *Glomus iranicum* var. *Tenuihypharum*.

Fosfato diamónico.

### **Material complementario**

Fertilizante orgánico (21% de MO, 0.66 N, 0.40 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0.36 K<sub>2</sub>O y 0.7 CaO).

Fertilizante químico Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·5H<sub>2</sub>O, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, KCl, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>,

Na<sub>2</sub>[B<sub>4</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>]·8H<sub>2</sub>O.

Agroquímicos (Dimethomorph + Pyraclostrobin, Ftalimida, Lambda-cyhalotrin +

Tiamethoxam, Clorotalonil, Imidacloprid, Clorpirifos, oxalato de H<sup>+</sup> de tiociclam).

### **Pruebas de laboratorio**

Número de esporas

Colonización de micorrizas

## Diseño experimental, factores, tratamientos y características de la unidad experimental (UE)

Se empleó un diseño de parcela dividida (2 x 3) en un arreglo de bloques completos al azar con 3 repeticiones. El factor inoculación de HMA fue la parcela grande con dos niveles; mientras que la dosis de fertilización de P fue la subparcela con tres niveles. Para el primero se utilizó 0 y 3 kg ha<sup>-1</sup> recomendado por Symborng (2017); mientras que para el segundo factor se utilizó 45, 70 y 90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, que corresponden 50, 75 y 100% del requerimiento de P con base en el análisis de suelo para una fertilización convencional (Tabla 3).

**Tabla 2**

*Detalle de tratamientos, presencia o ausencia de hongos HMA en la siembra y dosis de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>*

Tratamiento	HMA	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----	
T1	0	90
T2	0	70
T3	0	45
T4	3	90
T5	3	70
T6	3	45

Por lo tanto, la unidad experimental tuvo las siguientes características:

<b>Número total:</b>	18
<b>Surcos por parcela:</b>	2 con tratamiento y uno de separación
<b>Dimensiones del surco:</b>	1.20 x 36 m
<b>Distancia entre plantas:</b>	0.35 m

<b>Semilla por sitio:</b>	1
<b>Área por parcela:</b>	130 m <sup>2</sup>
<b>Área del ensayo:</b>	2340 m <sup>2</sup>

#### **Actividades específicas de manejo del cultivo**

A la siembra, se inoculó 3 kg ha<sup>-1</sup> de *Glomus iranicum* var. *Tenuihypharum*, con una concentración de 1.2 x 10<sup>4</sup> propágulos según el número más probable (NMP). Todas las actividades de manejo del cultivo se reportan en Castrillón (2020).

#### **Variables evaluadas y metodología de evaluación**

##### ***Población de esporas micorrícicas***

Para el conteo de micorrizas, se tomaron 3 muestras del suelo, por cada unidad experimental a 20 cm de profundidad. Para espaciar las unidades experimentales se dejó una zona de retiro de un metro entre parcelas. Cada muestra pesó alrededor de 500 g y se compuso de 3 submuestras extraídas de la zona radical de diferentes sectores de la parcela. Para la selección de las unidades muestrales se utilizó la tabla de números aleatorios (López, 2019). Las muestras fueron secadas al ambiente por 24 h, posteriormente las muestras se tamizaron ( Tamiz 2.0um). Luego se pesaron 100 g por cada tratamiento y se colocó Peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) al 1% (1 h). Se usó la metodología de separación por fracciones, donde la muestra es dividida en fracción B y fracción C (esto es por su granulometría). En un tubo falcón se colocaron cada una de las fracciones junto con una solución de 25 mL de agua destilada con sacarosa (45%). Se colocó en la centrifuga por 5 min a 25000 rpm, posteriormente se colocaron en cajas Petri cuadrículadas (1 x 1 cm). Al final se realizó el conteo de esporas viables (Brundrett, 1996). Este muestreo se realizó a los 60, 120 y 180 días (antes de fertilizar).



### ***Tinción de raíces (para visualizar micorrizas)***

En la cosecha se seleccionaron 6 raíces por tratamiento. Para la toma de muestra, se realizó un orificio de 20 cm de profundidad junto a la planta y se cortaron segmentos de raíces secundarias. Se seleccionaron 15 plantas por tratamiento de las que se extrajeron las raíces más finas y gruesas (de cada unidad) lavándolas y dejándolas en KOH al 10% durante 20 minutos. Luego se añadió peróxido de hidrógeno al 2% y se aplicó calor durante 10 minutos. Posteriormente se añadió azul de tripano al 0.05% en lacto glicerol y se sometió a calor durante 30 minutos. Al finalizar el tiempo de tinción, se dejaron las raíces en lacto glicerol 1:1 durante 12 h, para retirar el exceso de colorante (INVAM, 2017).

### **Productividad del cultivo**

Se cosecharon 18 m<sup>2</sup> de cada unidad experimental. Los datos de productividad se reportan por Castrillón (2020).

### **Análisis estadístico**

El estudio contempló un diseño de parcelas divididas en un arreglo de bloques completos al azar, donde la dosis de producto con HMA fue la parcela principal y la dosis de P la subparcela (Tabla 3).

**Tabla 3**

*Esquema del análisis de varianza*

<b>Fuentes de variación</b>	<b>Grados de libertad</b>
Tratamientos	5
P	2
M (micorrizas)	1
P x M	2
Bloques	2
Error	10
Total	17

### **Análisis de varianza**

Los resultados de las variables se evaluaron mediante un análisis de la varianza (ANDEVA) del paquete estadístico SAS<sup>9.3</sup> (SAS Institute, 2009), mediante el procedimiento PROC MIXED. Para realizar el ANDEVA, los tratamientos de P y micorrizas fueron factores fijos, mientras que los bloques fueron aleatorios. Para establecer diferencias entre los tratamientos se utilizó la opción DIFF de SAS. Las diferencias serán significativas con un  $P \leq 0.10$ , según diferencia mínima significativa (LSD).

### **Análisis de correlación**

Como complemento a los ANDEVA, se determinó una posible relación entre el porcentaje de infección, la colonización y la productividad del cultivo durante la cosecha (180 d). Para ello se utilizó el procedimiento PROC CORR de SAS<sup>9.3</sup>, donde los coeficientes de correlación de Pearson  $\geq |0.70|$  y con  $P \leq 0.10$  se consideraron significativos (Hinsinger y Jailard, 1993).

### **Análisis económico**

Se realizó el análisis de costo-beneficio, que es el cociente entre el costo de producción y el ingreso total. Para la determinación de los costos de producción se sumaron los costos de producción en los que incluyen: fertilizantes, agroquímicos, inóculo micorrícico, amortización del predio e infraestructuras. Mientras que el ingreso, se multiplicó la productividad por el costo de venta.

## Capítulo IV

### Resultados y Discusión

#### Clima

El ensayo inicio en julio de 2019 y durante los 6 meses que duró la fase de campo, la temperatura promedio se mantuvo homogénea hasta diciembre donde se redujo a 9.5°C (Tabla 4). En el mes de agosto se reportó la temperatura mínima de 3.8 °C mientras que en septiembre hubo una máxima de 18.9 °C, siendo el promedio fue de 10.8 °C. Este promedio se debe a la ubicación y el tiempo en el cual se estableció el experimento. Basantes (2015) establece que la temperatura adecuada para el desarrollo vegetativo de la papa se encuentra entre 8 a 25 °C y en la tuberización 13 a 18 °C, temperaturas menores reducen el tamaño, el peso del tubérculo y facilitan el daño mecánico de los tubérculos. Se registró una precipitación total de 1017.2 mm en el ciclo de cultivo siendo mayor al que recomienda Dvořák *et al.* (2016), que es de 650 a 800 mm por ciclo de cultivo, en el cual la época vegetativa demanda el 70%. En los primeros meses se aplicó riego para compensar la falta de precipitación, mientras que en los últimos 3 meses existió un exceso de lluvia que no permitió la aplicación de agroquímicos, induciendo un aumento de plagas, enfermedades que probablemente redujeron el número y peso seco del tubérculo.

**Tabla 4**

*Datos climáticos del sitio experimental durante los meses de estudio*

Mes	Temperatura (°C)			Precipitación total
	Máxima	Mínima	Promedio	mm
Julio	16.6	4.2	10.4	37.6 *
Agosto	17.5	3.8	10.6	31.5 *
Septiembre	18.9	4.5	11.7	107.7 **
Octubre	18.5	5.4	11.9	269.0
Noviembre	16.0	6.2	11.1	310.0
Diciembre	13.3	5.7	9.5	261.2

\* En estos meses se aplicó riego por gravedad.

\*\* En este mes se aplicó riego por aspersión.

#### **Productividad del cultivo**

Los resultados de la productividad no presentaron diferencias entre los tratamientos (Tabla 6). Estas cifras son comparables con las expuestas por Putate (2019) en la provincia del Carchi - Ecuador, donde los tratamientos inoculados con HMA no presentaron diferencias significativas con el resto. Además, Mora *et al.* (2018), no observaron diferencias en el peso del tubérculo en los tratamientos con HMA y en los niveles de P. En los análisis de foliares que realizó Castrillón (2019) no encontró diferencias significativas. Estos datos contrastan con la investigación de Hiri (2016) el cual analizó los resultados de 231 ensayos que utilizaron inóculos de HMA en papa durante 4 años seguidos y donde se reportó un aumento del 9.5% en la productividad. Los resultados podrían haber sido afectados por varios factores. La constante precipitación en el último cuarto del ciclo productivo, obstaculizó el uso de insumos fitosanitarios favoreciendo la incidencia de plagas que impactaron en el rendimiento. Además, es necesario considerar la interacción entre el inóculo (*Glomus iranicum var. Tenuihyarum*) y la variedad del cultivo de papa seleccionada

(Mendez, 2017). En ese sentido podría ser que este inóculo no fue el más apropiado para este tipo de papa (superchola).

### **Número de esporas**

El promedio del número de esporas por gramo de suelo presentó diferencias significativas entre los tratamientos inoculados con HMA y los no inoculados a los 60 d después de la siembra (Tabla 5). El promedio de los tratamientos con HMA fue de 19 esporas g suelo<sup>-1</sup> mientras que los no inoculados fueron 29 esporas g suelo<sup>-1</sup>. Estos resultados podrían responder a la Hipótesis de diversidad-invasibilidad, la cual menciona que existe una interacción entre los microorganismos exógenos y los endógenos generando una competencia y evitando un aumento en el número de esporas (Malllon *et al.*, 2018). Antes de establecer el ensayo se realizó un muestreo estableciendo 23 esporas g suelo<sup>-1</sup> como estado inicial del suelo, este valor sugiere que ya existía una alta diversidad de microorganismos en el suelo (Salloum, 2016) que disminuye con la aplicación de nuevos microorganismos.

La especificidad y la hipótesis de diversidad-invasibilidad podrían explicar el comportamiento de la variable dosis de P, ya que este no presentó un efecto significativo en el número de esporas. Probablemente el inóculo de *Glomus iranicum* var. *Tenuihyarum* tenía baja efectividad con la papa super chola y además la presencia de tantos HMA autóctonos desarrolló una alta competencia que impidió el desarrollo de este inóculo introducido.

El número de esporas en el suelo aumentó entre los 60 y 120 d y posteriormente existe una disminución numérica que se relaciona con la senescencia del cultivo. En ese sentido Barzana *et al.* (2014) (Tabla 5) concuerdan con nuestros resultados, atribuyendo este efecto a la senescencia del cultivo y a la activación del glutathione-S-transferase (GST)

que se presume que está relacionada con la degeneración de los arbusculos (Ramírez *et al.*, 2010).

### **Colonización**

La variable colonización de raíces en la cosecha presentó diferencias significativas para el factor dosis de P. La dosis de 45 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> mostró mayor colonización que el resto ( $P < 0.10$ ) (Tabla 6). Estos resultados concuerdan con los encontrados por Liu *et al.* (2016) y Gabriel *et al.* (2011) quienes a dosis bajas de fósforo obtuvieron mayor porcentaje de colonización. Balzergue *et al.* (2013) determinaron que altas dosis de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> afectan el desarrollo de estrigolactona en la raíz de *Medicago truncatula*, debido a la expresión de los genes MtMAX1, MtCCD7, MtCCD8 y MtD27 precursores de la ruta metabólica de la estrigolactona. Esta fitohormona es secretada en la periferia de la raíz y se encarga de romper la latencia de la espora de HMA estimulando el crecimiento de hifas y aumentando la colonización (Wan *et al.*, 2020).

No existió diferencia significativa en el promedio del porcentaje de colonización entre los tratamientos inoculados y los no inoculados con HMA. La alta cantidad de HMA preexistente en la zona de experimentación y la gran diversidad de la microbiota en el suelo podrían haber afectado la propagación de las HMA. La hipótesis de diversidad-invasibilidad sugiere que los microorganismos endógenos al estar adaptados a las condiciones del suelo generan presión en el inóculo exógeno y evitan su desarrollo (Mallon *et al.*, 2018).

### **Análisis de correlación**

Las variables analizadas no presentaron correlación entre ellas. El número de esporas no presentó correlación con el porcentaje de colonización ( $P = 0.08$ ;  $R^2 = 0.18$ ) (Fig. 4A). Aunque no existió significancia se puede observar una tendencia que a medida que las esporas aumentan la colonización disminuye. Montañó (2011) concuerda con esta

correlación negativa y sustenta que mientras más esporas en el suelo existen la diversidad biológica aumenta siendo un signo de alta fertilidad en el suelo.

Las respuestas a la inoculación en condiciones de campo varían en menor, igual y mayor rendimiento. La correlación entre el número de esporas y la productividad no fue significativa ( $P = 0.13$ ;  $R^2 = 0.14$ ) (Fig. 4B) al igual que la correlación entre el porcentaje de colonización y la productividad ( $P = 0.13$ ;  $R^2 = 0.13$ ) (Fig. 4C). Esto resultados puede deberse a la supresión del desarrollo del inóculo por parte de las HMA preexistentes ya que existía una gran cantidad de micorrizas (23 esporas/g suelo) en el momento de la inoculación. Las altas precipitaciones en el último tercio del cultivo suspendieron la aplicación de insumos agrícolas permitiendo el desarrollo de plagas como paratRIOZA (*Bactericera cockerelli*). Lojan (2016) presentó resultados similares en la ciudad de Loja y Quito quien considerando el protocolo de inoculación, la adaptación del inóculo a la microbiota local, el alto contenido de materia orgánica y la aplicación de agroquímicos como elementos que pudieron afectar el establecimiento de la simbiosis

**Tabla 5**

*Análisis de varianza de la productividad del cultivo, número de esporas micorrícicas y la colonización de esporas en raíces*

Dosis de P kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>	Número de esporas micorrícicas			Colonización	Productividad
	60 d	120 d	180 d	% a los 180 d	t ha <sup>-1</sup>
<u>Con aplicación de micorrizas</u>					
45	18	34	31	83 a <sup>†</sup>	17.7
70	15	37	32	62 c	21.1
90	24	33	34	70 b	15.7
Promedio	19 B <sup>‡</sup>	35	32	72	18.1
<u>Sin aplicación de micorrizas</u>					
45	26	36	33	79 a	19.1
70	27	38	38	61 c	14.5
90	34	43	43	72 b	20.6
Promedio	29 A	39	38	71	18.1
Fuentes de variación	----- P > F <sup>£</sup> -----				
Micorrizas (M)	0.02	0.46	0.28	0.56	0.99
Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (P)	0.17	0.87	0.59	< 0.01	0.99
M x P	0.85	0.73	0.83	0.71	0.58

<sup>†</sup> Valores con diferente letra minúscula en la misma columna indican diferencias por dosis de P dentro de los grupos con y sin micorrizas.

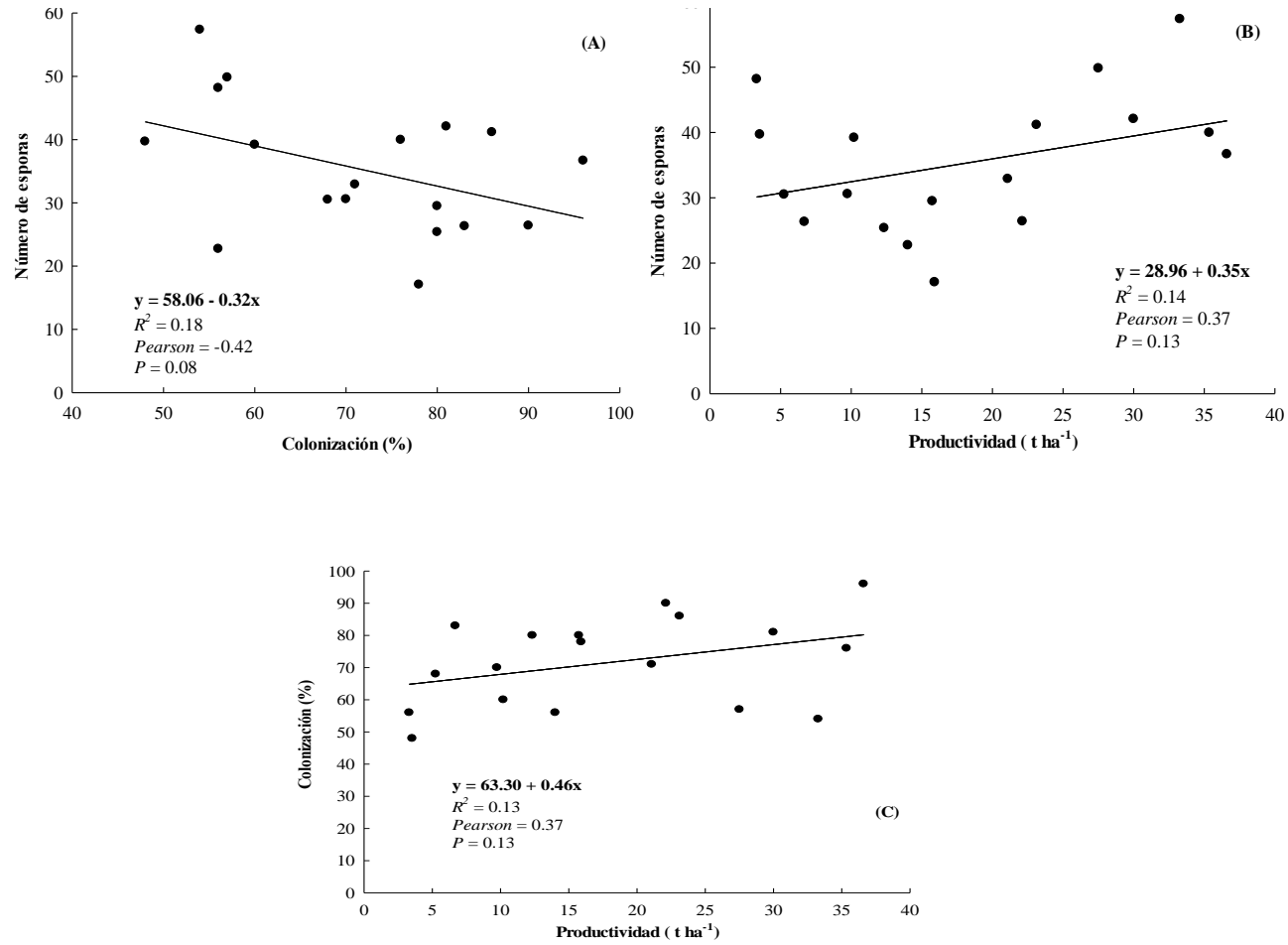
<sup>‡</sup> Valores con diferente letra mayúscula en la misma columna indican diferencias por la aplicación de micorrizas.

<sup>£</sup> Los valores de P > 0.10 indican que no hay diferencias.



**Figura 4**

Correlaciones: A) entre el número de esporas y el porcentaje de colonización, B) entre el número de esporas y la productividad, y C) entre el porcentaje de colonización y la productividad.



### Análisis económico

El Sistema de Información Pública Agropecuaria (SIPA) del MAG reporta que para el 2019 el promedio de venta del productor a nivel Ecuador fue de US\$ 370 t<sup>-1</sup>. Los mejores tratamientos con un mayor costo beneficio usando el costo referencial del 2019 fueron de US\$ 0.72 en el T2 (sin HMA + 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y T4 (con HMA + 45 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) (Tabla 7), donde el productor por cada dólar invertido obtuvo una utilidad de US\$ 0.73. Estos datos superan el promedio de utilidad de US\$ 0.70 determinado por Vega (2019) en 8 cantones de la provincia de Chimborazo. El análisis refleja la oportunidad de disminuir el fósforo como fertilizante ya que el tratamiento T4 con micorrizas obtuvo el mismo costo / beneficio que el T2 preservando la fertilidad del suelo al tener menores cantidades de sales disueltas en la solución del suelo.

**Tabla 6**

#### *Análisis del costo beneficio*

Tratamiento	Producción	Costo de producción	Ingreso bruto	Utilidad neta	Beneficio/costo
	t ha <sup>-1</sup>	----- US\$ ha <sup>-1</sup> -----			
Sin micorriza					
T1 45	14.46	4445.16	5350.20	905.04	0.20
T2 70	20.60	4432.78	7622.00	3189.22	0.72
T3 90	19.13	4520.16	7078.10	2557.94	0.56
Con micorriza					
T4 45	21.07	4520.16	7795.90	3275.74	0.72
T5 70	15.69	4507.78	5805.30	1297.52	0.28
T6 90	17.68	4492.30	6541.60	2049.30	0.45

† Para los tratamientos con micorrizas se incluyó el costo del producto. La aplicación se realizó en conjunto con la siembra por lo que no se aumentó un costo en la mano de obra.

‡ Se utilizó el precio promedio de venta de la papa en el Ecuador para el año 2019 de 370 US\$ t<sup>-1</sup>.

## Capítulo V

### Conclusiones y Recomendaciones

#### Conclusiones

Se determinó que existieron 23 esporas  $g^{-1}$  de suelo en un estado inicial estableciendo una alta cantidad de micorrizas.

El número de esporas disminuyó a los 60 días, los tratamientos sin HMA presentaron mayor promedio que el resto. A los 120 d en la etapa de floración aumentó el número de esporas mientras que en la senescencia del cultivo este valor disminuyó.

El grado de infección micorrícico disminuyó al elevar los niveles de fósforo en el suelo, estableciendo una relación proporcional inversa entre estas dos variables.

No se encontró correlación entre la colonización y la productividad del cultivo.

Los tratamientos 2 (sin HMA + 70 kg  $P_2O_5$ ) y 4 (con HMA + 45 kg  $P_2O_5$ ) generaron mayor utilidad neta que los otros tratamientos.

#### Recomendaciones

Utilizar cepas de zonas cercanas y adaptadas al cultivo, ya que la selectividad de las plantas huésped afectan la colonización de las micorrizas.

Determinar la microbiota preexistente en el suelo previo a la inoculación de HMA, porque esta afecta al desarrollo del inóculo y su funcionalidad.

## Bibliografía

- Adavi, Z., Tadayon, M., Razmjoo, & Ghaffari. (2020). Antioxidant enzyme responses in potato (*Solanum tuberosum*) cultivars colonized with arbuscular mycorrhizas. *Potato Res*(63), 291-301. doi:10.1007/s11540-019-09440-11
- Akiyama, K., & Hayashi, H. (2006). Strigolactones: Chemical Signals for Fungal Symbionts and Parasitic Weeds in Plant Roots. *Ann Bot*, 97(6). doi:10.1093/aob/mcl063
- Andrade. (2010). Micorrizas: Antigua interacción entre plantas y hongos. *Ciencias*, 84-90.
- Bago, B., Azcón, C., & Aguilar, G. (1998). Branched absorbing structures (BAS): a feature of the extraradical mycelium of symbiotic arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytol*, 139(2), 375-388.
- Balzerque, C. C. (2013). High phosphate reduces host ability to develop arbuscular mycorrhizal symbiosis without affecting root calcium spiking responses to the fungus. *Frontiers in plant science*, 4(46), 50-92.
- Barrer, S. (2009). EL USO DE HONGOS MICORRIZICOS ARBUSCULARES COMO UNA ALTERNATIVA PARA LA AGRICULTURA. FCA.
- Basantes, E. (2015). *Manejo de cultivos andinos del Ecuador. Sangolqui, Ecuador*. Sangolqui: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Basantes, E. (2016). Effects of climatic changes on crops, área of santa rosa de cusubamba, Cayambe-Pichincha, Ecuador. *ARPAN Journal of agricultural and biological Science*, 11(4), 149-159.
- Becerra, L. M., & Nustez. (2007). Efecto de niveles de P y K sobre el rendimiento del cultivar 'Criolla Guaneña' en el departamento de Nariño. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 14(1), 13-18.

- Bhandari, P., & Garg, N. (2017). Dynamics of arbuscular mycorrhizal symbiosis and its role in nutrient acquisition: an overview. *Biocontrol, Eco restoration*. doi:10.1007/978-3-319-68867-1
- Brundrett, M. (1996). Mycorrhizas in the Kakadu region of tropical Australia. *Issue 1,, 184*, 159-171.
- Bücking, H., Liepold, E., & Ambilwade, P. (2012). *The Role of the Mycorrhizal Symbiosis in Nutrient Uptake of Plants and the Regulatory Mechanisms Underlying These Transport Processes*. Brookings, USA: INTECH. doi:10.5772/52570
- Buenaño, M., & Mena, J. (2017). Costos de producción de los productos agrícolas y su incidencia en la rentabilidad de los productores de la parroquia de cubijés en el año 2015 Tesis de pregrado en economía. *Universidad Nacional de Chimborazo – UNACH*, 120.
- Carotenuto, G., Volpe, V., Russo, G., Politi, M., Sciascia, L., De Almeida-Engler, J., & Género, J. (2019). Local endoreduplication as a feature of intracellular fungal accommodation in arbuscular mycorrhizas. *New Phytologist Trust*, 223(1), 430-446.
- Ceccon, E. (2008). La revolucion verde tragedia en dos actos. *Clencias*, 1(91), 21-29.
- Centro Internacional de la Papa - CIP. (2011). Variedades de papa en el Ecuador. Obtenido de <https://cipotato.org/papaenecuador/variedades-de-papa/>
- Centro Internacional de la Papa. (2010). Inventario de tencologías e información para el cultivo de papa en Ecuador. *Centro Internacional de la Papa*.
- Chenchouni, H., Mekahlia, M., & Beddiar, A. (2019). Effect of inoculation with native and commercial arbuscular mycorrhizal fungi on growth and mycorrhizal colonization of olive (*Olea europaea* L.). *Scientia Horticulturae*. doi:10.1016/j.scienta.2019.108969.
- Cobb, A., Wilson, G., Goad, C., Bean, S., Kaufman, R., Herald, T., & Wilson, J. (2016). The roe of arbuscular mycorrhizal fungi in grain production and nutrition of

sorghum genotypes: Enhancing sustainability through plant-microbial partnership. . *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 432-440.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe – CEPA. (2019). Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe. 2019-2020.

Coninx, L. (2017). Capítulo cuatro - Fitorremediación asistida por micorriza. *Advances in Botanical Research*, 83, 127-188.  
doi:<https://doi.org/10.1016/bs.abr.2016.12.005>

Cortez. (2002). Guía técnica: Cultivo de La Papa. *CENTA*, 12-35.

Delgado, L. (2015). fertilización con zinc en dos variedades de papa (*Solanum tuberosum*) en suelos de costa y sierra. *Universidad Nacional la Agraria la Molina*, 40-68.

Devikota, H., & Raj. (2015). Steroidal glycosides from the fruits, aerial parts and tubers of potato (*Solanum tuberosum*).

Duffy, E. (2000). El efecto de la inoculación de microplantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) con hongos micorrízicos arbusculares en el rendimiento del tubérculo y la distribución del tamaño del tubérculo. *Ecología aplicada del Suelo*, 137-144.

Eos Climate Inc. (2020). Base de datos meteorológica. Obtenido de <https://www.crunchbase.com/organization/eos-climate-inc-> (Consultado el 12 de Marzo de 2020)

Espinosa, P., Villacés, E., & Bautista, C. (1998). *El uso del análisis sensorial para medir la aceptación de clones promisorios de papa* (1 ed.). Quito: Ediciones Aby-Yala.

Fernandez, M. (2007). Fósforo: amigo o enemigo. *ICIDCA*.

Ferreira, D., da Silva, T., Pylro, V., Salles, J., Andreote, F., & Dini-Andreote. (2020). Soil microbial diversity affects the plant-root colonization by arbuscular

mycorrhizal fungi. *Microbial Ecology*, 13, 44-58. doi:10.1007/s00248-020-01502-z

Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO. (2012). Uso de la tierra a nivel mundial. 150. doi:<http://www.fao.org/3/a-x4781s.pdf>

Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO. (2019). Uso de la tierra a nivel mundial. Obtenido de <http://www.fao.org/faostat/es/#data/EL/visualize>

Food and Agriculture Organization of the United Nations- FAO. (2018). Uso de la tierra a nivel mundial. 16. Obtenido de <http://www.fao.org/faostat/es/#data/EL/visualize>

Fusconi, A., & Mucciarelli, M. (2018). How important is arbuscular mycorrhizal colonization in wetland and aquatic habitats. *Environmental and Experimental Botany*, 1-34. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.06.016>

Gabriel-Neumann, E., Neumann, G., Leggewie, G., & George, E. (2011). Constitutive overexpression of the sucrose transporter SoSUT1 in potato plants increases arbuscular mycorrhiza fungal root colonization under high, but not under low, soil phosphorus availability. *Journal of Plant Physiology*, 168(9), 911–919.

Garcia, K., Doidy, J., & Zimmerman, S. (2016). Take a Trip Through the Plant and Fungal Transportome of Mycorrhiz. *Trends in Plant Science*, 21(11), 937-950. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.07.010>

Garibay, R., & Morales, E. (2013). Caracterización morfológica y genética de las ectomicorrizas formadas entre *Pinus montezumae* y los hongos presentes en los bancos de esporas en la Faja *Pinus montezumae* y los hongos presentes en los bancos de esporas en la Faja. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 153- 169.

Genderman, J. (1975). Vesicular-arbuscular mycorrhizae. . *The development and Function of Roots.*, 575–591.

- Geurts, R., & Vleeshouwers. (2012). Mycorrhizal Symbiosis: Ancient Signalling Mechanisms Co-opted. *Current Biology*, 22(23), 2236-2241. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.10.021>
- Gonzales, M. (2005). Estudio de los mecanismo implicados en la homeostasis de metales pesados en el hongo formador de micorrizas arbusculares. *CSIC*.
- Gough, C., & Cullimore, J. (2011). Señalización de lipo-chitoooligosacáridos en interacciones endosimbióticas planta-microbio. *Mol Plant Microbe Interact.*, 24(8), 867-78. doi:10.1094 / MPMI-01-11-0019.
- Guzman. (2017). Caracterización morfológica y genética de los hongos ectomicorrízicos asociados a bosques de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 41-48.
- Haputta, P., Puttanapong, N., Silalertruksa, T., Bangviwat, A., Prapasongsa, T., & Gheewala, H. (2019). Análisis de sostenibilidad de la promoción de bioetanol en Tailandia utilizando un enfoque de costo-beneficio. *Journal of Cleaner Prod*, 12(2), 112. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119756
- Hernandez, H., Ojalora, D., & Serrano, P. (2012). Respuesta agroeconómica del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) bajo diferentes fuentes de P en Villapinzon. *Cundinamarca. Ciencia y Agricultura*, 9(2), 97-104.
- Hijiri, M. (2016). Analysis of a large dataset of mycorrhiza inoculation field trials on potato shows highly significant increases in yield. *Mycorrhiza*. doi:10.1007/s00572-015-0661-4
- Hinsinger, P., & Jailard, B. (1993). Root-induced release of interlayer K and vermiculitization of phlogopite as related to K depletion in the rhizosphere of ryegrass. *Journal Soil Sci.*, 44(3), 525–534.
- Huarte, M. y. (2014). Cultivo de papa(en línea). *INTA*. Obtenido de [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-\\_huarte\\_capezio\\_papa2013.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-_huarte_capezio_papa2013.pdf)
- INIAP. (2016). El cultivo de Papa en el Ecuador. *INIAP*.



- Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias – INIAP. (2016). Catálogo de variedades de papa del Ecuador (en línea). *INIAP*, 50. Obtenido de <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/2748.pdf>
- International Culture Collection of Arbuscular Mycorrhizal Fungi-INVAM. (2017). Arbuscular Mycorrhizal Fungi (en línea). 30. Obtenido de <http://fungi.invam.wvu.edu/>
- INVAM. (2017). Tinción De Las Raíces Micorrizales. *INVAM*.
- Keller-Pearson, M., Liu, Y., Peterson, A., Pederson, K., Willems, L., Ané, J., & Silva, M. (2020). Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi has a more significant positive impact on the growth of open-pollinated heirloom varieties of carrots than on hybrid cultivars under organic management conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 200.
- Kröpotkin, P. (1902). *EL apoyo mutuo un factor de la evolución*. Reino Unidos: Heinemann.
- Lewis, J. (2016). Mycorrhizal fungi, evolution and diversification of encyclopedia of. *Evolutionary Biology*, 12, 24. doi:10.1016/B978-0-12-800049-6.00251-1
- Lim, T. (2016). *Solanum tuberosum*. *Edible Medicinal and Non-Medicinal Plants*(2), 12–93.
- Liu, W. Y. (2016). Los hongos micorrízicos arbusculares en el suelo y las raíces responden de manera diferente a los aportes de fósforo en un suelo agrícola calcáreo de manejo intensivo. *Scientific Reports*, 6(24), 1-11.
- Lizarraga, S., & Ruiz, A. (2015). Micorrizas vesículo-arbusculares, endófitos septados oscuros y anatomía radical en *Fragaria ananassa* var. Camino Real (Rosaceae), en la provincia de Tucumán, Argentina. *Rev. Agron. Noreste Argentina*, 11-17.
- Lojan, P., & Suárez, J. (2017). raciones de microorganismos promotores del crecimiento vegetal y su uso potencial en formulaciones para el cultivo de papa. pp. 42-44. Memorias del vi congreso ecuatoriano de la papa. *Congreso Ecuatoriano de la papa*.

- Malhotra, H., Vandana, S., & Pandey. (2018). Phosphorus nutrition: plant growth in response to deficiency and excess. *Plant Nutrients And Abiotic Stress Tolerance*, 4(4), 171-190.
- Manzanares, P. (1997). *Introducción al cálculo del balance energético de la producción de Biomasa*. Madrid: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Obtenido de [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/38/106/38106923.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/106/38106923.pdf)
- Martín, A. (2011). Efectos de la Inoculación del Hongo de Micorrización Tuber *Melanosporum* y la Rizobacteria *Pseudomonas Fluorecens* en la calidad de la plántula de *Pinus halepensis*. *Universidad Politecnica de Madrid*.
- Martín, F., Molina, E., Nicolás, J., Alarcón, M., Kirchmair, F., García, G., & Bernabe. (2017). Application of arbuscular mycorrhizae *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* var. *nova* in intensive agriculture: a study case. *J. Agri. Sci. Tech.*, 23, 221-248.
- Mascotrola, N., & Pino, G. (2016). Catálogo de variedades de papa del Ecuador. *INIAP*.
- Mastrocola, N., Pino, G., & Mera, X. (2016). Catálogo de variedades de papa del Ecuador. *FAO-INIAP*, 4-8.
- Mazetti, A., Pérez, R., Freitas, E., & Gómez, A. (2017). Nutrient uptake and removal by potato cultivars as affected by phosphate fertilization of soils with different levels of phosphorus availability. *Rev. Bras, Ciencia*, 3-5. doi:2017;41:e0160288.
- Mejía, D. (2016). Diagnóstico de Comercialización de Papa en Mercados. *MAGAP*.
- Mejia, D. (2016). Perdida poscosecha en la cadena de valor del rubro papa, un estudio de caso en la provincia del Carchi. *PUCE*.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería – MAG. (2017). Informe de rendimiento objetivos de papa en el Ecuador . Obtenido de <http://fliphtml5.com/ijia/sfoj/basic>

- Ministerio de Agricultura y Ganadería – MAG. (2019). Informe de rendimiento objetivos de papa en el Ecuador 2018 (en línea). 40. Obtenido de <http://fliphtml5.com/ijia/tlcp/basic>
- Mohammadi, S., Shahabi, E., & Kasraian, D. (2020). Effect of endomycorrhiza fungi *Glomus* spp. on induction of resistance in potato plants against *Rhizoctonia solani*. *Indian Phytopathology*. doi:10.1007/s42360-020-00207-0.
- Mokrani, K., Hamdi, K., & Tachoun, K. (2018). Potato (*Solanum tuberosum* L.) response to N, P and K fertilization rates. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. doi:10.1080/00103624.2018.1457159
- Montaño, N., & Camargo, S. (2007). *Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos*. Distrito Federal: Mundi-Prensa de CV.
- Morales, F. (2007). Sociedades precolombinas asociadas a la domesticación y cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*). *Revista latinoamericana de la Papa*, 14(1), 1-9.
- Morales, F. (2007). Sociedades precolombinas asociadas a la domesticación y cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en Sudamérica. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 14(1), 1-9.
- Moreno, P. (1988). Inoculación de micorrizas MVA en papa (*Solanum tuberosum*) resta en el crecimiento y nutrición de plantas inoculadas en invernadero y en campo. *Revista latinoamericana de la papa*, 1, 84-103.
- Ortas, I. (2019). Capítulo 6 - Papel de los microorganismos (micorrizas) en la agricultura orgánica. *Agricultura Ecológica*, 181-211.
- Paerl, h., & Otten, T. (2012). Paerl HW, Otten TG (2012) Harmful cyanobacterial blooms: causes,. *Microbial Ecology*, 65(4). doi:10.1007/s00248-012-0159-y
- Pavithra, D., & Neelamanie, Y. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation enhances drought stress tolerance of plants. *Groundwater for Sustainable Development*, 1-12. doi:https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.03.005

- Phillips, R. (2014). Green Revolution: Past, Present, and Future. *Encyclopedia of agriculture and food Systems*, 529-538.
- Plenchette, C. (1983). Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P-fertility. *Plant and Soil*(70), 199-209. doi:<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02374780>
- Ramirez, M., & Rodriguez, A. (2010). Señales de reconocimiento entre plantas y hongos formadores de micorrizas arbusculares. *Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecu.*, 11(1), 53-60.
- Ramos, J., Orellana, R., & Allen, E. (2006). MYCORRHIZAL DYNAMICS AND DEPENDENCE OF *Desmoncus orthacanthos* Martius (ARECACEAE), A NATIVE PALM OF THE YUCATAN PENINSULA, MEXICO. *INCI*, 31(5). Obtenido de [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442006000500008](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442006000500008)
- Reategui, K., & Aguirre1, N. (2019). Fenología y rendimiento de cuatro variedades de papa en el Altiplano peruano. *Scientia Agropecuaria*, 10(2), 265-274.
- Redecker, D., & Schubler, A. (2013). An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Micorrizas*, 515-531.
- Romero, F. (2014). Los agroquímicos: concentración y dependencia en la Argentina. *Revista Interdisciplinaria de Estudios Agrarios*, 60-73.
- Salloum, M. (2016). Variabilidad en la colonización de hongos micorrízicos arbusculares y su efecto en la dependencia micorrízica de cultivares de soja mejorados y no mejorados. *Can J Microbiol*, 62(12). doi:10.1139 / cjm-2016-0383
- Schuler, K. (2013). *Solanum Tuberosum* (Potatoes). *Elsevier*, 4, 1848-1850.
- Schweiger, R., Baier, M., Persicke, M., & Müller, C. (2014). High specificity in plant leaf metabolic responses to arbuscular mycorrhiza. *Nature Communications*, 5(1), 1-11.

- Sherwood. (2002). *El cultivo de la papa en Ecuador*. Quito. Obtenido de <https://cipotato.org/wp-content/uploads/Documentacion%20PDF/Pumisacho%20y%20Sherwood%20Cultivo%20de%20Papa%20en%20Ecuador.pdf>
- Shukla, S., Shanker, P., C, M., A, P., Bhartia, N., Barnawala, D., . . . Kalrab, A. (2019). Application of essential oils as a natural and alternate method for inhibiting and inducing the sprouting of potato tubers. *Food Chemistry*, 283, 171-179.
- Sistema de Información Pública Agropecuaria – SIPA. (2020). Informe de precios de los principales mercados del Ecuador (en línea). Obtenido de <http://sipa.agricultura.gob.ec/>
- Smith, S. L. (2008). 2-Colonización de raíces y anatomía de micorrizas arbusculares. *Academic press*, 42-90.
- Smith, S., & Jakobsen, I. (2011). Roles of Arbuscular Mycorrhizas in Plant Phosphorus Nutrition: Interactions between Pathways of Phosphorus Uptake in Arbuscular Mycorrhizal Roots Have Important Implications for Understanding and Manipulating Plant Phosphorus Acquisition1. *Plant Physiol.*, 156, 1050-1057.
- Smith, S., & Read, D. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*, Ed 3. New York: Academic Press. doi:9780080559346
- Sotomayor, A., A, G., Cho, K., Villavicencio, A., & Viera, W. (2017). Uso de microorganismos para la propagación en vivero de patrones de aguacate (*Persea americana* MILL.) cultivar “criollo”. . *INFAP*, 15.
- Spooner, D., & Ruess, h. (2018). Greatly reduced phylogenetic structure in the cultivated potato clade (*Solanum* section *Petota* pro parte). *American Journal of Botany*, 1-11.
- Srivastava, P., Saxena, B., & Giri, B. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungi: green approach/technology for sustainable agriculture and environment. *Biocontrol, Eco restoration*.(20), 355-380.

- Sturmer, S., & Plivera, L. (2018). Gigasporaceae versus Glomeraceae (phylum Glomeromycota): A biogeographic tale of dominance in maritime sand dunes. *Fungal Ecology*, 32, 49-56.
- Tawarayama, K., Watanabe, S., Vierheilig, H., & Wagatsuma, T. (2007). Formation of appressoria by the arbuscular mycorrhizal fungus *Gigaspora margarita* on roots of *Allium cepa* is linked with root age. . *The Mycological Society of Japan.* , 305–308.
- Taylor, T., & Krings, M. (2015). 7-Glomeromycota. *Fossil Fungi*, 103-128. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387731-4.00007-4>
- Thioub, M. E.-M.-A.-G. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation enhances phosphorus use efficiency and soybean productivity on a Haplic Acrisol . *Soil and Tillage Research*, 174–186.
- USDA. (2019). Classification for Kingdom Plantae Down to Species *Solanum tuberosum* L. *PlantsDatabase*. Obtenido de <https://plants.usda.gov/java/ClassificationServlet?source=display&classid=SO TU>
- Vega, J. (2019). Determinación de los costos de producción del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en la provincia de Chimborazo. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana.*, 110.
- Walker, c., & Schubler, A. (2004). Nomenclatural Clarifications and New Taxa in the Glomeromycota *Pacispora*. *Mycological Research*, 981-982. doi:<https://doi.org/10.1017/S0953756204231173>
- Wang, B. Q. (2006). Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants. *Mycorrhiza*, 16, 299-363. doi:10.1007/s00572-005-0033-6
- Wang, C. (2017). La colonización y la estructura de la comunidad de hongos micorrízicos arbusculares en raíces de maíz a diferentes profundidades en el perfil del suelo responden de manera diferente a las entradas de fósforo en un

sitio experimental a largo plaz. *Micorrizas*, 27(4), 369- 381. doi:10.1007 / s00572-016-0757-5.

Wen, G., Cambouris, A., Ziadi, N., Bertrand, A., & Khelifi, M. (2020). Effects of N Fertilization on the Leaf Chemical Composition of Two Potato Cultivars under Controlled Conditions. *Am. J. of Potato Res.*, 97(2), 175–184.

Xiaona, M., & Luo, W. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi increase both concentrations and bioavailability of Zn in wheat (*Triticum aestivum* L) grain on Zn-spiked soils. *Applied Soil Ecology*, 91-97.

Zhang, Y., & Song, C. (2018). Cause and effect of N/P ratio decline with eutrophication aggravation in shallow lakes. *Science of the Total Environment*, 627, 1294-1302. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.327>