UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE MICORRIZAS COMERCIALES EN EL CULTIVO DE PAPA (*Solanum tuberosum*)"

Trabajo de titulación previo a la obtención del título en Ingeniera en Biotecnología

Línea de investigación: Biotecnología, energía y recursos naturales renovables

AUTOR:

Mónica Johanna Imbaquingo Vasquez

DIRECTOR:

Ing. Gabriel Alejandro Chimbo Yépez MSc.

Ibarra – Ecuador (2026)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	IMBAQUINGO VASQUEZ MÓNICA JOHANNA

DATOS DE LA OBRA					
TÍTULO:	"EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE MICORRIZAS COMERCIALES EN EL CULTIVO DE PAPA (Solanum tuberosum)"				
AUTOR (ES):	IMBAQUINGO VASQUEZ MÓNICA JOHANNA				
FECHA: DD/MM/AAAA	19/08/2026				
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO					
PROGRAMA:		X	**PREGRADO**		**POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera en Biotecnología				
DIRECTOR:	Ing. Gabriel Alejandro Chimbo Yépez. MSc.				

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 24 días del mes de agosto de 2026

LA AUTORA:



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
MÓNICA JOHANNA IMBAQUINGO VASQUEZ

_____

Mónica Johanna Imbaquingo Vasquez

C.I.: 1756115042

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN

CURRICULAR

Ibarra, 24 de agosto de 2026

Ing. Gabriel Chimbo Yepez MSc.

DIRECTOR/A DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales y pertinentes.



(f)……

Ing. Gabriel Chimbo Yepez MSc.

C.C.: 1721444196

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del trabajo de Integración Curricular **"EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE MICORRIZAS COMERCIALES EN EL CULTIVO DE PAPA (Solanum tuberosum)",** elaborado por Mónica Johanna Imbaquingo Vasquez, previo a la obtención del título de Ingeniería en Biotecnología, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
GABRIEL ALEJANDRO CHIMBO YEPEZ

(f) .....

Ing. Gabriel Chimbo Yepez MSc.

C.C.: 1721444196

(f) .....Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
MARIA CRISTINA ECHEVERRIA DE LABASTIDA.....

Ing. María Cristina Echeverría De Labastida PhD.

C.C.: 1717917189

PRESENTACIÓN

Yo, **IMBAQUINGO VASQUEZ MÓNICA JOHANNA** como autora de la Tesis Titulada **"EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE MICORRIZAS COMERCIALES EN EL CULTIVO DE PAPA (*SOLANUM TUBEROSUM*)",** me hago responsable de los resultados, discusión, conclusiones y demás parte de la investigación; y pongo este documento como fuente de apoyo para consultas dirigidas a todos los estudiantes.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, Teresa y Carlos, y a mis hermanas, mi mayor sostén y el motor que impulsa cada uno de mis pasos. Gracias por su amor incondicional, por sus sacrificios silenciosos y por sostener mi fe cuando yo dudaba de la mía. Este triunfo es tanto suyo como mío; en cada meta alcanzada laten sus enseñanzas, su esfuerzo y sus sueños hechos realidad.

A mis abuelitos, por ser refugio en la tormenta, abrazo cálido y sabiduría en el camino. Su bondad y su ejemplo son la luz con la que me oriento en la vida.

A Jimmy, mi mejor amigo y hermano de la vida. Gracias por estar siempre, por tu lealtad inquebrantable, por escuchar cada desahogo, sostener mis días difíciles y celebrar mis alegrías. Tu presencia en esta etapa no solo fue importante; fue imprescindible. Lograr esto a tu lado hizo todo más ligero y memorable.

A mis mascotas, compañeras silenciosas y leales de tantas noches desveladas. Su amor puro me enseñó el valor de la calma, la paciencia y los pequeños instantes de paz.

A Nino, mi amigo fiel que trascendió, pero jamás se marchó del todo; tu ausencia aún duele, pero tu recuerdo sigue siendo mi fuerza y tu huella habita en cada uno de mis logros.

A Damaris y Mélany, mis compañeras de ruta en esta aventura universitaria. Gracias por la complicidad, las risas en medio del cansancio y por hacer de las batallas académicas un camino compartido mucho más cálido y significativo.

A todos quienes cruzaron este camino brindándome una palabra de aliento, una mano extendida o simplemente su compañía: este logro también lleva un pedazo de ustedes.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTERGRACIÓN CURRICULAR 3
APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR 3
AGRADECIMIENTO IV
2. CONSTANCIAS 2
ÍNDICE DE CONTENIDO 8
ÍNDICE DE FIGURAS 11
Índice de tablas 12
RESUMEN 14
ABSTRACT 15
CAPÍTULO I 16
INTRODUCCIÓN 16
1.1 Planteamiento del problema 16
1.2 Justificación 18
1.3 Objetivos 19
1.3.1 Objetivo general 19
1.3.2 Objetivos específicos 19
1.4 Pregunta de investigación 19
CAPÍTULO II 20
1. MARCO TEÓRICO 20
2.1. El cultivo de papa 20
2.1.1. Descripción botánica 20
2.1.2. Origen 22
2.1.3. Importancia del cultivo 23
2.1.4. Requerimientos nutricionales 24
2.1.5. Fertilización fosfatada en papa 24
2.2. El fósforo como macronutriente 25
2.2.1. Funciones fisiológicas del fósforo 25
2.2.2. Mecanismos de absorción y movilidad del nutriente 26
2.2.3. Rol de los microorganismos en la absorción de fósforo 26
2.3. Micorrizas 27
2.3.1. Clasificación 27

2.3.2. Micorrizas arbusculares 28
2.3.3. Mecanismos de acción de la micorriza 28
2.3.4. Efectos de la inoculación de micorrizas en las plantas 29
CAPÍTULO III 31
3. METODOLOGÍA 31
3.1. Descripción del área de estudio 31
3.2 Material vegetal 31
3.2.1 Cebolla (*Allium cepa*) 31
3.2.2 Papa (*Solanum tuberosum*) var. Superchola 32
3.3 Inóculos de micorrizas 32
3.4 Determinación del número de propágulos presentes en el producto mediante NMP. 33
3.5 Cultivo trampa- micorrización 34
3.5 Cálculos de fertilización fosfatada 35
3.6 Diseño experimental 37
3.7 Variables evaluadas 38
3.8 Determinación de colonización micorrízica 39
3.11 Análisis estadístico 39
CAPÍTULO IV 40
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 40
CAPÍTULO V 58
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 58
5.1 Conclusiones 58
5.2, Recomendaciones 59
ANEXOS 61
REFERENCIAS 70

LISTA DE SIGLAS.

ADN: Ácido desoxirribonucleico

ANOVA: Análisis de varianza

ARN: Ácido ribonucleico

ATP: Adenosín trifosfato

BLD: Bajo el límite de detección

CE: Conductividad eléctrica

CICe: Capacidad de intercambio catiónico efectiva

CV: Coeficiente de variación

DAP: Fosfato diamónico

DCA: Diseño completamente al azar

DDS: Días después de la siembra

EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

HMA: Hongos micorrícicos arbusculares

IC: Intervalo de confianza

INIAP: Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias

MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería

MAP: Fosfato monoamónico

MSF: Microorganismos solubilizadores de fósforo

NMP: Número más probable

NTE INEN: Norma Técnica Ecuatoriana del Instituto Ecuatoriano de Normalización

OMS: Organización Mundial de la Salud

P: Fósforo

pH: Potencial de hidrógeno

TSP: Superfosfato triple

UE: Unión Europea

WHO: Organización Mundial de la Salud

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 porcentaje *de colonización micorrícica en cultivo trampa* 42

Figura 2 po*rcentaje de colonización micorrícica en cultivo de papa*.....44

Figura 3 a*ltura final de las plantas de papa en respuesta a la inoculación con micorrizas* ..48

Figura 4 *número de tubérculos producidos por planta*.....52

Figura 5 ren*dimiento promedio de tubérculos por planta* 55

Índice de tablas

Tabla 1 *tratamientos experimentales del cultivo trampa* 34

Tabla 2 *resultados del análisis de suelo*.....36

Tabla 3 *niveles de fertilización fosfatada*.....36

Tabla 4 *cronograma de fertilización* 37

Tabla 5 *tratamientos experimentales para el cultivo de papa* 38

Tabla 6 *variables evaluadas*.....35

Tabla 7 *determinación del número más probable (nmp) de propágulos infectivos de hongos micorrícicos arbusculares en los inoculantes comerciales evaluados* 40

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 resultados análisis de suelo 61

Anexo 2 Tabla 9221 para determinar resultados positivos cuando se utilizan 5 repeticiones por dilución. 64

A**nexo 3** de student para colonización en cultivo trampa 65

Anexo 4: anova y tukey de micorrización en cultivos trampa 65

Anexo 5 anova y tukey de micorrización en cultivos de papa (por factores y tratamientos) 65

Anexo 6 anova y tukey de altura final de las plantas de papa (por factores y tratamientos) 66

Anexo 7 anova y tukey de número de tubérculos por planta de papa (por factores y tratamientos) 67

Anexo 8 anova y tukey de peso de tubérculos por planta de papa (por factores y tratamientos) 68

RESUMEN

La producción de papa (*Solanum tuberosum* L.) en Ecuador está limitada por la baja disponibilidad de fósforo (P) en los suelos andinos debido a su elevada fijación, lo que incrementa la dependencia de fertilizantes químicos. Los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) constituyen una alternativa para mejorar la absorción de P. El objetivo fue evaluar la efectividad de dos inoculantes comerciales de HMA en el cultivo de papa bajo diferentes niveles de fertilización fosfatada.

El estudio se realizó en invernadero con dos inoculantes comerciales de HMA y un testigo absoluto, combinados con tres niveles de P. Se evaluó la viabilidad mediante el Número Más Probable (NMP), además de la colonización micorrícica, altura de planta, número de tubérculos y rendimiento. Ambos inoculantes presentaron alta viabilidad; C1 alcanzó la mayor colonización (77,7 %) con 50 % de P. Este tratamiento también registró la mayor altura (66,7 cm), número de tubérculos (23,7 planta^{-1}) y rendimiento (1135 g planta^{-1}). En contraste, el 100 % de P redujo significativamente la colonización.

La inoculación con HMA mejoró la colonización radical, el crecimiento y la productividad de la papa. La combinación de HMA con 50 % de P optimizó su uso y redujo la necesidad de fertilizantes químicos sin afectar el rendimiento, evidenciando su potencial como estrategia sostenible para la producción de papa.

Palabras clave: *Solanum tuberosum*, hongos micorrízicos arbusculares (HMA), colonización micorrízica, fósforo biodisponible, cultivo trampa, número más probable (NMP) .

ABSTRACT

Potato (*Solanum tuberosum* L.) production in Ecuador is constrained by low phosphorus (P) availability in Andean soils due to high P fixation, increasing reliance on chemical fertilizers. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) offer an alternative to enhance P uptake. This study evaluated the effectiveness of two commercial AMF inoculants in potato under different P fertilization levels.

The experiment was conducted under greenhouse conditions using two commercial AMF inoculants and an uninoculated control combined with three P levels. Inoculant viability was assessed using the Most Probable Number (MPN) method, along with mycorrhizal colonization, plant height, tuber number, and yield. Both inoculants showed high viability; C1 achieved the highest colonization (77.7%) with 50% P. This treatment also recorded the greatest plant height (66.7 cm), tuber number (23.7 plant^{-1}), and yield (1,135 g plant^{-1}). In contrast, 100% P significantly reduced mycorrhizal colonization.

AMF inoculation improved root colonization, plant growth, and potato productivity. Combining AMF with 50% P optimized P use and reduced the need for chemical fertilizers without affecting yield, demonstrating its potential as a sustainable strategy for potato production.

Keywords: *Solanum tuberosum,* arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), mycorrhizal colonization, available phosphorus, trap culture, most probable number (MPN)

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

En el ámbito agrícola, la disponibilidad de nutrientes en el suelo es un factor clave que influye directamente en el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Entre estos nutrientes, el P destaca por su importancia en diversos procesos metabólicos (Mixquititla-Casbis & Villegas-Torres, 2016). No obstante, su limitada disponibilidad en suelos agrícolas, especialmente en los Andosoles, constituye una de las principales limitaciones para la producción de cultivos en la región andina. Estos suelos, ampliamente distribuidos en Ecuador y formados a partir de cenizas volcánicas, cubren aproximadamente el 30 % del territorio nacional, predominando en las zonas altas y húmedas de la Sierra (Silva-Yumi et al., 2022). Se caracterizan por presentar baja densidad aparente, elevado contenido de materia orgánica, alta porosidad, gran capacidad de retención de agua y una elevada superficie específica, propiedades que favorecen su fertilidad física (Alcalá de Jesús, 2009). Sin embargo, desde el punto de vista químico, poseen una marcada capacidad de fijación de P debido a la abundancia de minerales de baja cristalinidad, como alófano, imogolita y ferrihidrita, además de complejos organo-alumínicos (Arifin et al., 2022).

En condiciones de pH ácido, comunes en estos suelos, dichos minerales desarrollan cargas positivas capaces de adsorber fuertemente los aniones fosfato mediante enlaces específicos, disminuyendo su concentración en la solución del suelo y, por tanto, su disponibilidad para las plantas (Alcalá de Jesús, 2009). Como consecuencia, los Andisoles presentan una capacidad de retención de fosfatos que puede superar el 85 % en suelos con propiedades ándicas bien desarrolladas, mientras que incluso los Andosoles más jóvenes muestran valores superiores al 25 %, lo que obliga a incrementar las dosis de fertilizantes

.

fosfatados para satisfacer los requerimientos nutricionales de los cultivos (Alcalá de Jesús, 2009).

En Ecuador, la producción de papa enfrenta múltiples limitaciones agronómicas, entre las cuales destaca la deficiencia de P en los suelos, atribuida a su elevada fijación y reducida disponibilidad para las plantas . Este cultivo, además de ser un alimento básico, posee una alta relevancia económica y social en el país, pues constituye una fuente importante de ingresos para pequeños y medianos agricultores en la Sierra ecuatoriana y aporta significativamente a la seguridad alimentaria nacional . Esta problemática se intensifica en los suelos volcánicos característicos de la región andina como lo son las zonas con mayor producción como Carchi, Pichincha, Chimborazo y Cotopaxi, cuyas propiedades fisicoquímicas favorecen la adsorción de fosfatos, lo que disminuye su biodisponibilidad para las plantas (Espinosa et al., 2018). Ante ello, el uso de fertilizantes fosfatados se ha generalizado como estrategia correctiva; sin embargo, su aplicación excesiva puede ocasionar efectos adversos, como la contaminación de fuentes hídricas y el deterioro de la salud del suelo (Liu et al., 2021).

Por otra parte, el elevado costo de los fertilizantes fosfatados en Ecuador representa una carga económica importante para los agricultores, quienes en muchos casos reducen la aplicación de nutrientes debido a limitaciones económicas, afectando la productividad de los cultivos (Yaselga Alvarado & Bunce, 1978). A pesar de los avances logrados en la investigación sobre hongos micorrícicos arbusculares (HMA) en diversos cultivos, todavía existe una limitada información sobre cómo estos funcionan específicamente en los sistemas locales de producción de papa en Ecuador.

1.2 Justificación

El creciente interés por los efectos ambientales del uso intenso de fertilizantes químicos ha impulsado la búsqueda de estrategias más sostenibles para ayudar a mejorar la fertilidad del suelo. Si bien estos insumos han sido eficaces para incrementar la producción agrícola, también se han vinculado con problemas como la contaminación de fuentes hídricas y el deterioro de la estructura del suelo (Mixquititla-Casbis & Villegas-Torres, 2016).

En este contexto, los HMA se presentan como una alternativa viable, ya que favorecen la disponibilidad de nutrientes esenciales sin generar impactos negativos. Además, su presencia contribuye a mejorar las propiedades del suelo, al incrementar la retención de agua y estimular la diversidad microbiana (Carrillo-Saucedo et al., 2022). La combinación de HMA con bacterias solubilizadoras de P no solo optimiza el aprovechamiento de este nutriente, sino que también fortalece el crecimiento vegetal y mejora la resistencia frente a enfermedades, aportando así a sistemas de producción más sostenibles (Mora-Quilismal et al., 2021).

Ante esta situación, el uso de HMA es una alternativa eficiente para optimizar el uso del P sin incrementar la dependencia de insumos químicos. La incorporación de microorganismos en los programas de fertilización puede disminuir significativamente la necesidad de insumos externos, promoviendo una agricultura más rentable y respetuosa con el ambiente (Santander, 2022). Los beneficios de las micorrizas en este cultivo no se limitan únicamente a la mejora en la absorción de P. También se ha observado que su aplicación influye positivamente en otros aspectos del desarrollo vegetal, como el aumento en la cantidad y calidad de los tubérculos (Bonilla Vichot, 2021).

En este marco, el presente estudio tiene como propósito evaluar la eficacia de los HMA comerciales en la mejora de la disponibilidad de P en la mejora del cultivo de papa en Ecuador. Con ello, se busca aportar evidencia que respalde la adopción de prácticas agrícolas más

.

sostenibles, orientadas a reducir el uso de fertilizantes químicos y a fomentar un manejo más equilibrado de los recursos naturales.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la efectividad de las micorrizas comerciales en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*)

1.3.2 Objetivos específicos

- Cuantificar la densidad de esporas por gramo de producto de las micorrizas comerciales.
- Determinar la efectividad de colonización mediante el uso de cultivos trampa
- Evaluar la influencia de la disponibilidad de fósforo en el efecto de las micorrizas en un cultivo de papa *Solanum tuberosum.*

1.4 Pregunta de investigación

¿Cuál es la eficiencia de cepas comerciales de hongos micorrícicos arbusculares (HMA) en la absorción de fósforo y el porcentaje de micorrización en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*)?

CAPÍTULO II

1. MARCO TEÓRICO

2.1. El cultivo de papa

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es uno de los principales cultivos alimentarios del mundo y un componente fundamental de los sistemas agrícolas andinos. Pertenece a la familia Solanaceae y produce tubérculos subterráneos ricos principalmente en carbohidratos, que constituyen su principal órgano de reserva y propagación vegetativa (Hawkes, 1992). La especie presenta una amplia diversidad genética, con numerosas variedades adaptadas a diferentes condiciones de altitud, temperatura y manejo, lo que representa un recurso importante frente al cambio climático, las enfermedades y las limitaciones productivas. (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), 2026)

En Ecuador, la papa se cultiva principalmente en la región Sierra, aproximadamente entre 2.700 y 3.500 m s. n. m. (Racines et al., 2023). Las principales zonas productoras corresponden a las regiones norte, centro y sur, que presentan diferencias climáticas, edáficas y de manejo (Araujo, 2021). El cultivo es especialmente importante para pequeños y medianos productores, ya que constituye una fuente de alimentos e ingresos y forma parte de sistemas de rotación agrícola. Por ello, el conocimiento de sus características botánicas y requerimientos nutricionales es fundamental para mejorar su productividad. (Hawkes, 1992)

2.1.1. Descripción botánica

Solanum tuberosum L. es una especie herbácea de la familia Solanaceae cuyo ciclo comprende etapas vegetativas, reproductivas y de formación y llenado de tubérculos. La planta desarrolla raíces, tallos, hojas, flores, frutos, estolones y tubérculos (Hawkes, 1992). Los

tubérculos son tallos modificados que presentan yemas u "ojos", capaces de originar nuevos brotes y permitir la propagación vegetativa.

El sistema radical está constituido principalmente por raíces adventicias cuya distribución depende del cultivar, las condiciones del suelo y la disponibilidad de agua y nutrientes (Struik, 2007). Estas raíces cumplen funciones de absorción y anclaje, mientras que la baja movilidad del P puede limitar su adquisición, especialmente en suelos donde este elemento presenta elevada fijación (Bucher, 2007). La asociación con hongos micorrícicos puede ampliar la capacidad de exploración del suelo mediante el desarrollo de hifas extrarradicales.

Los tallos presentan una porción aérea y otra subterránea. Los tallos aéreos poseen nudos, entrenudos y hojas, mientras que los subterráneos originan estolones que posteriormente forman los tubérculos (Hawkes, 1992). Durante la tuberización, los fotoasimilados producidos en las hojas son transportados hacia los estolones, donde se acumulan principalmente como almidón (Struik, 2007).

Las hojas son compuestas e imparipinnadas y constituyen el principal órgano fotosintético de la planta. Su actividad depende de la radiación, temperatura, disponibilidad de agua y estado nutricional (Hawkes, 1992). El P participa en procesos relacionados con la transferencia de energía y el metabolismo de carbohidratos, por lo que su disponibilidad puede influir sobre el crecimiento y la producción de biomasa (Vance et al., 2003).

Las flores se agrupan generalmente en inflorescencias y pueden presentar diferentes coloraciones según el cultivar. Aunque la planta puede producir frutos y semillas botánicas, comercialmente predomina la propagación mediante tubérculos-semilla, debido a que permite conservar las características del material vegetal. (Hawkes, 1992)

El tubérculo se desarrolla por el engrosamiento de los extremos de los estolones y constituye el principal órgano de almacenamiento. Contiene principalmente almidón, además de proteínas, minerales y vitaminas. Durante la tuberización y el llenado, la acumulación de reservas depende de la actividad fotosintética y de la disponibilidad de agua y nutrientes. (Struik, 2007)

2.1.2. Origen

La papa tiene su centro de origen y diversificación en los Andes sudamericanos. La evidencia arqueológica y genética señala que su domesticación estuvo relacionada principalmente con poblaciones del altiplano de Perú y Bolivia, hace aproximadamente 8.000 años (Spooner et al., 2014). La selección realizada por agricultores andinos permitió obtener materiales adaptados a bajas temperaturas, diferentes altitudes y condiciones ambientales variables.

Ecuador forma parte del centro andino de diversidad de la papa y posee numerosas variedades nativas adaptadas a diferentes pisos altitudinales. Esta diversidad se originó mediante procesos de domesticación, selección campesina, intercambio de semillas y adaptación local (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), 2026). Las variedades nativas representan un importante recurso biocultural, mientras que las variedades mejoradas han sido seleccionadas por características como rendimiento, precocidad, calidad culinaria y resistencia a enfermedades. (Spooner et al., 2014)

Taxonómicamente, la papa pertenece al reino Plantae, orden Solanales, familia Solanaceae, género *Solanum* y especie *Solanum tuberosum* L. (Hawkes, 1992). El género *Solanum* presenta numerosas especies silvestres y cultivadas que constituyen una fuente de genes para resistencia a enfermedades, tolerancia ambiental y características de calidad del tubérculo (Hijmans, 2001).

.

2.1.3. Importancia del cultivo

La papa posee importancia alimentaria, económica, social y cultural. Constituye una fuente de carbohidratos, proteínas, vitaminas y minerales y destaca por su capacidad para producir cantidades importantes de alimento por unidad de superficie (Douds et al., 2007). Actualmente, más de mil millones de personas consumen papa regularmente y la producción mundial supera los 300 millones de toneladas (Gopal & Khurana, 2006).

En Ecuador, la producción se concentra principalmente en la Sierra. Las principales zonas productoras se agrupan en las regiones norte, centro y sur, que comprenden provincias como Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo, Bolívar, Cañar, Azuay y Loja (Racines et al., 2023).

De acuerdo con la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua, en 2024 Ecuador registró 14.548 ha plantadas, 13.689 ha cosechadas y una producción de 221.187 toneladas de papa. Carchi concentró aproximadamente el 60,7 % de la producción nacional (Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) & Dirección Producción de Estadística Agropecuarias y Ambientales (INEC), 2025). Estos datos evidencian la importancia del cultivo y la necesidad de mejorar la productividad mediante estrategias nutricionales eficientes.

Una parte importante de la producción de papa en la Sierra se desarrolla sobre suelos de origen volcánico, entre ellos los Andisoles (Arifin et al., 2022). Estos suelos presentan minerales de corto rango de ordenamiento y superficies reactivas de aluminio y hierro capaces de retener P, reduciendo su disponibilidad para las plantas (Dahlgren et al., 2004). Sin embargo, las propiedades edáficas varían entre localidades, por lo que la caracterización del suelo es necesaria para interpretar la respuesta del cultivo a la fertilización y a la inoculación micorrícica.

2.1.4. Requerimientos nutricionales

La papa requiere macro y micronutrientes para completar adecuadamente sus etapas de crecimiento, tuberización y llenado(Hawkesford et al., 2012). Entre los principales macronutrientes se encuentran nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), además de calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S). Los micronutrientes incluyen Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl y Ni (Marschner, 2012). La demanda depende del cultivar, rendimiento esperado, duración del ciclo y condiciones del suelo.

El nitrógeno favorece la formación de proteínas, clorofila, ácidos nucleicos y biomasa, aunque su exceso puede prolongar el crecimiento vegetativo y retrasar la maduración de los tubérculos. El potasio interviene en la regulación osmótica, actividad enzimática y transporte de fotoasimilados, siendo importante para la formación y calidad de los tubérculos. (Marschner, 2012)

El P participa en el metabolismo energético, síntesis de ATP, ácidos nucleicos y fosfolípidos, además del desarrollo radical y formación de tubérculos (Vance et al., 2003). Su importancia es mayor en suelos volcánicos, donde puede quedar retenido por minerales y superficies de aluminio y hierro, disminuyendo su disponibilidad (Dahlgren et al., 2004). En estas condiciones, los microorganismos benéficos, particularmente los hongos micorrícicos arbusculares, pueden contribuir a mejorar la adquisición de P.

2.1.5. Fertilización fosfatada en papa

La fertilización fosfatada es importante para mantener la productividad de la papa, pero la dosis requerida depende de la disponibilidad inicial de P y de las propiedades del suelo. Estudios recientes muestran que la respuesta del cultivo a la fertilización puede variar entre

.

sitios, por lo que las recomendaciones deben considerar el análisis de suelo y el rendimiento esperado. (Rutan & Steinke, 2026)

En los Andisoles, la eficiencia del fertilizante fosfatado puede reducirse debido a la elevada reactividad de las superficies de aluminio y hierro (Dahlgren et al., 2004). Por ello, aumentar indiscriminadamente la dosis de P no garantiza una mayor absorción por la planta. La eficiencia depende de la fuente, dosis, momento de aplicación, propiedades del suelo y capacidad de la planta para adquirir el nutriente.

La disponibilidad de P también influye en la relación entre la planta y los hongos micorrícicos. Cuando el P es limitado, la planta puede favorecer la asociación micorrícica para mejorar su adquisición; mientras que una elevada disponibilidad de P puede reducir la colonización radical (López-Ráez, 2016). Por tanto, la fertilización fosfatada y la inoculación micorrícica deben analizarse conjuntamente.

2.2. El fósforo como macronutriente

El P es un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo vegetal. La planta lo absorbe principalmente como $H_2PO_4^-$ y HPO_4^{2-}, dependiendo del pH del suelo (Marschner, 2012). Debido a su baja movilidad, el P puede constituir una limitación importante para las plantas, especialmente en suelos donde permanece fuertemente retenido.

2.2.1. Funciones fisiológicas del fósforo

El P participa en el metabolismo energético mediante moléculas como ATP y ADP, fundamentales para la transferencia de energía en las células (Vance et al., 2003). También forma parte del ADN, ARN y fosfolípidos, por lo que interviene en la división celular, crecimiento y funcionamiento de las membranas (Marschner, 2012).

Asimismo, participa en el metabolismo de carbohidratos y en la transferencia de fotoasimilados. Estas funciones son relevantes en papa debido a que los tubérculos almacenan carbono principalmente como almidón. Por ello, una adecuada nutrición fosfatada contribuye al desarrollo radical, crecimiento vegetal y formación de tubérculos (Vance et al., 2003).

2.2.2. Mecanismos de absorción y movilidad del nutriente

La absorción del P ocurre mediante transportadores específicos ubicados en las membranas de las células radicales (Bucher, 2007). Sin embargo, su disponibilidad para la raíz está limitada por su baja movilidad en el suelo. A diferencia del nitrato, el fosfato se desplaza principalmente mediante difusión, generándose zonas de agotamiento alrededor de las raíces (Bucher, 2007). En los Andisoles, esta limitación puede intensificarse debido a la adsorción del fosfato sobre superficies minerales reactivas de aluminio y hierro (Dahlgren et al., 2004). Por esta razón, la cantidad total de P del suelo no necesariamente representa la fracción disponible para la planta.

2.2.3. Rol de los microorganismos en la absorción de fósforo

Los microorganismos participan en el ciclo del P mediante procesos de mineralización y solubilización. Bacterias y hongos pueden producir fosfatasas, ácidos orgánicos y otros compuestos que transforman formas poco disponibles de P (Alori et al., 2017). Entre las bacterias solubilizadoras destacan géneros como *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Enterobacter* y *Burkholderia*, capaces de modificar las condiciones químicas de la rizosfera y favorecer la movilización del nutriente (Alori et al., 2017).

Los hongos micorrícicos arbusculares representan otro mecanismo importante de adquisición de P. Sus hifas extrarradicales exploran zonas del suelo inaccesibles para las raíces y transportan el P hacia la raíz, donde es transferido a las células vegetales mediante estructuras

especializadas denominadas arbúsculos (Pumplin & Harrison, 2009). Por ello, las micorrizas constituyen un vínculo importante entre la actividad microbiana y la nutrición fosfatada de la papa.

2.3. Micorrizas

Las micorrizas son asociaciones simbióticas entre hongos del suelo y raíces de las plantas. En esta relación, la planta proporciona carbono al hongo, mientras que este contribuye a mejorar la adquisición de nutrientes y agua (S. E. . Smith & Read, 2008). Estas asociaciones presentan amplia distribución en los ecosistemas terrestres y pueden contribuir a mejorar la nutrición y tolerancia de las plantas frente a diferentes condiciones ambientales (Brundrett & Tedersoo, 2018).

2.3.1. Clasificación

Las asociaciones micorrícicas se clasifican de acuerdo con las características de la colonización y los grupos de hongos involucrados. Entre los principales tipos se encuentran las micorrizas arbusculares, ectomicorrizas, ericoides, arbutoides, monotropoides y de orquídeas (Brundrett & Tedersoo, 2018;(S. E. . Smith & Read, 2008).

Los hongos micorrícicos arbusculares han sido reclasificados mediante estudios morfológicos y moleculares, reconociéndose géneros como *Rhizophagus*, *Funneliformis*, *Claroideoglomus*, *Acaulospora*, *Gigaspora* y *Diversispora* (Redecker et al., 2013). Esta diversidad es relevante para comprender la composición y posible eficiencia de los inoculantes comerciales.

2.3.2. Micorrizas arbusculares

Las micorrizas arbusculares son asociaciones simbióticas ampliamente distribuidas y formadas principalmente por hongos del filo Glomeromycota. Su característica principal es la formación de arbúsculos dentro de las células corticales de la raíz, donde ocurre el intercambio de nutrientes entre el hongo y la planta. (Parniske, 2008)

Entre los géneros de importancia agrícola se encuentran *Rhizophagus*, *Funneliformis*, *Claroideoglomus*, *Acaulospora* y *Gigaspora* (Redecker et al., 2013). *Rhizophagus irregularis* y *Funneliformis mosseae* han sido ampliamente estudiados por su capacidad de colonizar diferentes cultivos y mejorar su nutrición.

Las principales estructuras de estos hongos son las esporas, hifas, arbúsculos y, en algunas especies, vesículas. Las esporas permiten la propagación y supervivencia, las hifas exploran el suelo y los arbúsculos constituyen los principales sitios de intercambio entre hongo y planta (S. E. . Smith & Read, 2008).

2.3.3. Mecanismos de acción de la micorriza

El establecimiento de la simbiosis comienza mediante señales químicas entre la raíz y el hongo. Cuando el P es limitado, la planta puede aumentar la producción de estrigolactonas, que favorecen la comunicación y el crecimiento de las hifas micorrícicas. (Bonfante & Genre, 2010)

Después del contacto, las hifas penetran la raíz y forman arbúsculos en las células corticales. Estas estructuras poseen una interfaz especializada donde se produce el intercambio de nutrientes: el hongo proporciona principalmente P y otros minerales, mientras recibe carbono y lípidos de la planta .(Pumplin & Harrison, 2009)

.

Las hifas extrarradicales amplían la superficie de exploración del suelo y pueden alcanzar zonas que las raíces no exploran directamente (Smith & Smith, 2011). El P absorbido es transportado hacia la raíz y posteriormente incorporado al metabolismo vegetal. Además, la red micelial puede interactuar con otros microorganismos de la rizosfera relacionados con la movilización del P(Wang et al., 2023).

La disponibilidad de P regula la intensidad de la simbiosis. Una baja disponibilidad puede favorecer la colonización, mientras que concentraciones elevadas pueden reducirla debido a una menor dependencia de la planta respecto de la vía micorrícica (López-Ráez, 2016).Por ello, la colonización depende no solo del inoculante, sino también de la disponibilidad de P, compatibilidad entre hongo y planta, humedad, temperatura y propiedades del suelo.

2.3.4. Efectos de la inoculación de micorrizas en las plantas

La inoculación con hongos micorrícicos puede mejorar la absorción de P, nitrógeno y algunos micronutrientes, además de favorecer el aprovechamiento del agua y la tolerancia frente a determinados factores de estrés (Begum et al., 2019). Sin embargo, la respuesta depende de la interacción entre el hongo, la planta, el suelo y las condiciones ambientales, por lo que la eficacia debe evaluarse experimentalmente.

Uno de los principales beneficios es el incremento de la absorción de P mediante la red de hifas extrarradicales, que amplía la superficie de exploración del suelo (Smith et al., 2011). Un metaanálisis de 187 estudios encontró incrementos en biomasa y nutrición con P y N después de la inoculación, aunque la magnitud del efecto dependió de las condiciones experimentales (Wu et al., 2024).

En papa, un metaanálisis de 106 estudios independientes encontró efectos positivos de la inoculación sobre el rendimiento de tubérculos, biomasa radical y concentración de P y N.

Sin embargo, la respuesta dependió del cultivar y del tipo de hongo utilizado, destacándose *Rhizophagus irregularis* entre los inoculantes de especie única evaluados (Oladele et al., 2025). Estos resultados evidencian la necesidad de evaluar cada combinación entre cultivar, inoculante y condiciones edáficas.

Las micorrizas también pueden mejorar el aprovechamiento del agua debido a que sus hifas exploran microporos y zonas del suelo alejadas de las raíces (Augé et al., 2015). Además, pueden favorecer la absorción de micronutrientes como Zn, Cu y Fe y modificar procesos fisiológicos relacionados con el balance hídrico (Begum et al., 2019).

Otro efecto potencial es la modificación de la respuesta de las plantas frente a determinados patógenos. La colonización micorrícica puede inducir mecanismos de defensa y modificar la comunidad microbiana de la rizosfera, contribuyendo a una mayor resistencia frente a algunas enfermedades (Pozo & Azcón-Aguilar, 2007). Sin embargo, este efecto depende del cultivar, hongo, patógeno y condiciones ambientales, por lo que las micorrizas no deben considerarse un sustituto directo de los métodos convencionales de control.

Finalmente, la eficiencia de un inoculante no depende únicamente de la cantidad de esporas o propágulos presentes, sino de su capacidad para establecer una colonización funcional en la raíz. Por ello, el porcentaje de colonización debe complementarse con variables de crecimiento, nutrición y rendimiento para determinar su verdadero efecto agronómico (Berruti et al., 2016). En papa, la respuesta también depende del cultivar y del inoculante utilizado(Oladele et al., 2025), por lo que evaluar conjuntamente infectividad, colonización, niveles de P y respuesta agronómica permite determinar con mayor precisión la eficiencia de los inoculantes micorrícicos comerciales.

.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Descripción del área de estudio.

La fase experimental se desarrolló en un invernadero ubicado en la parroquia Juan Montalvo, barrio Santa Isabel, cantón Cayambe, provincia de Pichincha, Ecuador, en las coordenadas geográficas 0.0179° N, -78.1354° W (WGS84), a una altitud aproximada de 2817 m s.n.m.

El ensayo se estableció bajo condiciones controladas de invernadero, lo que permitió reducir la variabilidad ambiental y garantizar uniformidad en factores como temperatura, humedad y radiación. Durante el periodo experimental se mantuvieron temperaturas promedio entre 18 y 25 °C, con ventilación natural y condiciones de radiación propias del entorno.

3.2 Material vegetal

3.2.1 Cebolla (*Allium cepa*)

Para el establecimiento del cultivo trampa, se seleccionó la cebolla (*Allium cepa* L.) como especie vegetal, debido a su capacidad de interacción con microorganismos del suelo y su uso en estudios de dinámica rizosférica.

El material vegetal estuvo constituido por plántulas de cebolla obtenidas de viveros comerciales de la zona de Cayambe, seleccionadas en estado fenológico temprano con el fin de garantizar uniformidad en el desarrollo inicial. Las características para elegir las plántulas se basó en que sean homogéneas en tamaño y vigor, con una altura aproximada de 10 a 15 cm, sistema radicular bien desarrollado y libres de síntomas de enfermedades, daños mecánicos o estrés fisiológico.

3.2.2 Papa (*Solanum tuberosum*) var. Superchola

Se utilizó la variedad de papa Superchola (*Solanum tuberosum*), ampliamente cultivada en la región andina del Ecuador por su adaptación a condiciones de altura y su relevancia económica.

La siembra se realizó a partir de tubérculos-semilla, previamente seleccionados en función de su uniformidad, tamaño (40–60 g) y estado fitosanitario (ausencia de hongos, perforaciones, pudriciones). En ambos casos cada unidad experimental consistió en una planta cultivada en maceta.

3.3 Inóculos de micorrizas

Se evaluaron dos inoculantes comerciales de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y un tratamiento control:

- **Micorriza Comercial 1 (C1)**, compuesto por *Glomus iranicum var. tenuihypharum*
- **Micorriza Comercial 2 (C2)**, compuesto por *Rhizophagus intraradices*, *Funneliformis mosseae*, *Rhizophagus aggregatum* y *Claroideoglomus etunicatum*
- **Control (SM)**, sin aplicación de micorriza

La inoculación se realizó a los 25 días después de la siembra (DDS), aplicando 100 mL de solución por planta, preparada a una concentración de 5 g/L, directamente en la zona radicular, con el fin de asegurar el contacto con raíces activas y favorecer el establecimiento de la simbiosis.

.

3.4 Determinación del número de propágulos presentes en el producto mediante NMP.

La determinación de la cantidad de propágulos infectivos presentes en el inóculo se realizó mediante el método del Número Más Probable (NMP), basado en la capacidad de colonización de un cultivo trampa (Porter, 1979).

Se preparó una solución madre a una concentración de 5 g/L, para ello se usó 5 gramos del inoculo por cada litro de agua destilada estéril. A partir de esta, se prepararon diluciones seriadas decimales (10^{-1}, 10^{-2} y 10^{-3}), se aplicaron 100ml de cada dilución seriada en una maceta la cual contenía una plántula de cebolla. Se dispusieron tres tratamientos (niveles de dilución) con 5 repeticiones cada uno

Las unidades experimentales se mantuvieron en condiciones controladas durante un periodo de 5 semanas. Finalizado este periodo, las raíces fueron recolectadas al final del experimento, lavadas y cortadas en fragmentos de aproximadamente 1 cm. Posteriormente, se sometieron a un proceso de clarificación con hidróxido de potasio (KOH) al 5 %, seguido de acidificación con HCl al 1 % y tinción con tinta Parker al 0.4% en HCl al 1% siguiendo la metodología propuesta por (Phillips & Hayman, 1970) con modificaciones. La presencia o ausencia de colonización micorrízica fue evaluada mediante observación microscópica.

Los datos obtenidos fueron registrados obteniéndose una tabla con 15 datos con combinaciones de positivos y negativos por cada dilución, de esta manera, se llegó a una combinación de 3 dígitos después de sumar los positivos y negativos de cada dilución. Se procedió a estimar el NMP mediante la tabla de probabilidad descrita en *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Anexo 2) (APHA, AWWA & WEF, 2003). Esta elección metodológica se justifica porque la lógica estadística del NMP es independiente del

organismo evaluado y permite obtener estimaciones confiables de la densidad de propágulos infectivos.

Tabla 1

Tratamientos para la metodología de NMP

Código	Inóculo	Factor de dilución
TT1	C1	10^{-1}
TT2	C1	10^{-2}
TT3	C1	10^{-3}
TT4	C2	10^{-1}
TT5	C2	10^{-2}
TT6	C2	10^{-3}

3.5 Cultivo trampa- micorrización

Para la evaluación de la capacidad infectiva del inóculo, se establecieron cultivos trampa en condiciones controladas. En cada maceta se sembraron plantas trampa (cebolla) y se inocularon exclusivamente con la solución madre (5g/L) sin adición de fertilizantes fosfatados. Las plantas se mantuvieron bajo condiciones de invernadero durante un periodo de 8 semanas, con riego regular y sin aporte de nutrientes adicionales, de manera que la colonización dependiera únicamente de los propágulos presentes en el inóculo.

Al finalizar el periodo de crecimiento, las raíces de las plantas trampa fueron cosechadas, aclaradas y teñidas siguiendo la técnica de Phillips & Hayman (1970, con modificaciones), para observar bajo microscopio la presencia de vesículas, arbúsculos e hifas.

.

3.5 Cálculos de fertilización fosfatada

Los resultados del análisis químico del suelo se presentan en la Tabla 2. Esta caracterización permitió conocer las condiciones iniciales de fertilidad del sustrato experimental y establecer las dosis de P utilizadas en los tratamientos.

Se utilizó fosfato monoamónico (MAP) como fuente de P, cuya aplicación fue ajustada en función de los requerimientos nutricionales del cultivo, determinados mediante análisis del suelo (Anexo 1)

Tabla 2

Resultados del Analisis de suelo

Nombre Muestra		S-1
pH		6.73
EC	uS/cm	44.4
Salinidad	psu	0.03
CICe	(cmol/kg)	6.6
N	%	0.00
Ca	mg/kg	1074.02
Mg	mg/kg	237.02
K	mg/kg	474.04
P	mg/kg	36.54
Relación Ca/Mg		4.5
Relación Ca/K		2.3
Fe	mg/kg	192.36
B	mg/kg	78.76
Zn	mg/kg	0.98
Co	mg/kg	0.30
Mn	mg/kg	6.03

Cu	mg/kg	5.52
Na	mg/kg	220.23
S	mg/kg	8.87
Al	mg/kg	670.69
Cr	mg/kg	0.14

Se establecieron tres niveles de fertilización: 0% (sin aplicación), 50% (dosis reducida a la mitad de los requerimientos) y 100% (dosis que cubría todos los requerimientos de la planta) (Tabla 3):

Tabla 3

Niveles de fertilización fosfatada

Nivel	Código	Descripción
0 %	P0	Sin aplicación
50 %	P50	Dosis reducida
100 %	P100	Dosis completa

Con el fin de mejorar la eficiencia del nutriente y evitar su fijación temprana, la fertilización se aplicó de forma fraccionada (Tabla 4). La segunda aplicación se realizó 65 días después de la inoculación, con el objetivo de evaluar la respuesta del cultivo bajo una disponibilidad progresiva de P.

Tabla 4

Cronograma de fertilización

Momento	Tiempo	Aplicación
Primera aplicación	50 DDS	50 % de la dosis

.

Segunda aplicación	90 DDS	50 % restante

3.6 Diseño experimental

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo factorial 3 × 3, considerando dos factores. El primer factor fueron las micorrizas con tres niveles, mientras que el segundo fueron los niveles de fertilización fosforada con tres niveles. Esto generó 9 tratamientos con 3 repeticiones cada uno, dando un total de 27 unidades experimentales (Tabla 5).

Tabla 5

Tratamientos experimentales para el cultivo de papa

Código	Micorriza	Fertilización fosforada
T1	SM	0 %
T2	SM	50%
T3	SM	100 %
T4	C1	0 %
T5	C1	50 %
T6	C1	100 %
T7	C2	0 %
T8	C2	50 %
T9	C2	100 %

Las unidades experimentales fueron distribuidas de forma aleatoria dentro del invernadero.

3.7 Variables evaluadas

Se evaluaron variables agronómicas, productivas y fisiológicas (Tabla 6):

Tabla 6

Variables evaluadas en el cultivo de papa

Variable	Unidad
Altura de planta	Cm
Número de tubérculos	N°
Rendimiento	g/planta
Colonización micorrízica	%

Momentos antes de la cosecha se midió la altura de las plantas (cm) utilizando una regla graduada desde la base del tallo hasta el ápice principal. El número de tubérculos (N°) se obtuvo mediante un conteo directo de los tuberculos producidos por cada planta. Para el rendimiento (g/planta), se pesaron todos los tubérculos frescos de cada planta en una balanza. Finalmente, la colonización micorrízica (%) se evaluó mediante la técnica de aclarado y tinción de raíces (Phillips & Hayman, 1970) con modificaciones, observando al microscopio la presencia de vesículas, arbúsculos e hifas, se calculó el porcentaje de micorrizacion de manera manual (Ecuacion 1)

.

3.8 Determinación de colonización micorrízica

Tanto para el cultivo trampa al cual solo se añadió los inoculos micorrícicos y para el cultivo de papa al cual se añadió los inoculos micorricos y la fertilización con difenretes concentraciones de P, se utilizó la metodología antes descrita (Phillips & Hayman, 1970)

El cálculo del porcentaje de colonización micorrízica se realizó mediante la fórmula propuesta por p

nnetti y Mosse (Ecuación 1), la cual se basa en la relación entre el número de segmentos radiculares colonizados y el total de segmentos observados (Giovannetti & Mosse, 1980)

$$\%\, Colonización = \frac{N \text{ segmentos colonizados}}{N \text{ segmentos observados}} \times 100 \qquad \textbf{Ecuación 1}$$

3.11 Análisis estadístico

Todos los datos obtenidos en este estudio fueron analizados utilizando el software Infostat 2020. Es necesario mencionar que todas las variables fueron evaluadas para los supuestos de normalidad y homocedasticidad mediante una prueba de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. La confirmación de los supuestos se dio cuando ambas pruebas resultaron en valores $p > 0.05$. Una vez que los supuestos se cumplieron, en el ensayo de plantas trampa se llevó a cabo una prueba t de Student para muestras independientes ($p<0.05$). Por otra parte, el ensayo de fertilización en papa fue evaluado mediante un ANOVA para factoriales ($p<0.05$). Las fuentes de variación que presentaron significancia fueron sometidas a una prueba de Tukey ($p<0.05$).

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación sobre la evaluación de la eficiencia de micorrizas comerciales en el cultivo de papa (Solanum tuberosum).

4.1 Número Más Probable (NMP) de propágulos micorrízicos

El análisis del NMP encontró que las cepas presentan concentraciones diferentes de micorrizas en su composición. C1 presentó 116 propágulos, mientras C2 presentó 188 propágulos por gramo de producto (Tabla 7)

Tabla 2

Determinación del Número Más Probable (NMP) de propágulos infectivos de hongos micorrícicos arbusculares en los inoculantes comerciales evaluados.

Dilución		R1	R2	R3	R4	R5	Positivos	NMP/100 ml	Propágulos/g de producto
C1	10^{-1}	+	+	+	+	+	5	58	116
	10^{-2}	-	-	-	-	-	0		
	10^{-3}	+	+	-	+	-	3		
C2	10^{-1}	+	+	+	+	+	5	94	188
	10^{-2}	-	+	+	-	-	2		
	10^{-3}	-	-	+	-	+	2		

El uso de una concentración declarada de inóculo en los productos micorrízicos responde a las exigencias de organismos internacionales, que establecen la necesidad de garantizar la viabilidad de los microorganismos y la seguridad para la salud y el ambiente. Normativas como el Reglamento (UE) 2019/1009 en Europa y las regulaciones de la EPA en

.

Estados Unidos refuerzan la importancia de declarar y validar la concentración de propágulos, asegurando la trazabilidad y eficacia de los bioinsumos (European Parlament, 2019; Ahmad et al., 2024)

En Ecuador, la regulación de bioinsumos está a cargo de la Agencia de Regulación y Control Fito y Zoosanitario (Agrocalidad), que establece requisitos técnicos y administrativos para el registro y control de productos como las micorrizas, garantizando su calidad y seguridad. La NTE INEN 2972:2013 define parámetros específicos para biofertilizantes, incluyendo la concentración mínima de propágulos por gramo de producto y la ausencia de microorganismos indeseables (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013). Agrocalidad complementa esta normativa con manuales técnicos que incluyen requisitos de etiquetado, trazabilidad y límites de contaminantes (Agrocalidad, 2022).

Considerando que los fabricantes reportan concentraciones de 120 y 200 esporas/g de producto para C1 y C2, respectivamente, los valores obtenidos mediante NMP (116 y 188 propágulos infectivos g^{-1}) indican que ambos productos mantuvieron entre el 94 y 97% de la capacidad infectiva esperada. Es importante reconocer la variabilidad natural de cualquier bioinsumo y el intervalo de confianza que acompaña a todo muestreo estadístico, lo que respalda que las estimaciones sean consistentes y confiables frente a las especificaciones técnicas declaradas.

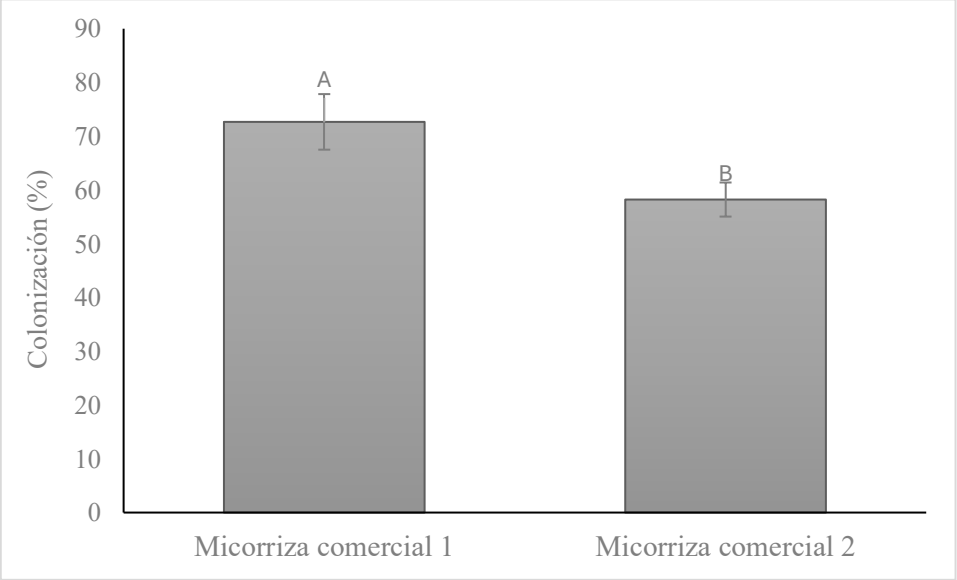
En Ecuador, al igual que en la normativa internacional, se exige que los bioinsumos declaren la concentración de inóculo viable, aunque no se establece la obligación de reportar intervalos de confianza en el etiquetado. Estos resultados justifican una adecuada viabilidad de los inoculantes comerciales y validan su utilización en las etapas posteriores del experimento, ya que la densidad de propágulos infectivos encontrada fue consistente con las especificaciones técnicas de cada producto.

4.2 Colonización en cultivo trampa (%)

La micorriza comercial 1 (C1) alcanzó una colonización promedio de 72.7 ± 5.2 %, mientras que la micorriza comercial 2 (C2) registró 58.2 ± 3.2 % (Figura 1). Ambos productos lograron establecer una simbiosis efectiva con las raíces de las plantas; sin embargo, C1 presentó una mayor capacidad de infección y establecimiento en el sistema radical que C2. La comparación mediante la prueba t de Student para muestras independientes (Anexo 3) confirmó que estas diferencias fueron estadísticamente significativas ($p = 0.0145$), evidenciando un mayor porcentaje de colonización en las plantas inoculadas con C1.

Figura 1

Porcentaje de colonización micorrícica en cultivo trampa



Los porcentajes obtenidos pueden considerarse elevados dentro de los rangos reportados para inoculantes comerciales de hongos micorrícicos arbusculares, donde colonizaciones superiores al 50% suelen asociarse con una simbiosis funcional y beneficios agronómicos significativos (Begum et al., 2019). No obstante, ninguno de los tratamientos

.

alcanzó una colonización del 100%, situación que es común en este tipo de asociaciones biológicas debido a que la totalidad del sistema radical rara vez es susceptible a la infección simultánea (Smith & Read, 2008). La colonización micorrícica es un proceso dinámico en el que continuamente se forman nuevas raíces, mientras otras ya se encuentran colonizadas, generando porcentajes parciales aun cuando la interacción sea altamente eficiente (Parniske, 2008).

Otro factor es la regulación fisiológica ejercida por la propia planta hospedera. Una vez establecida la simbiosis y cubiertas parcialmente las necesidades nutricionales, la planta disminuye la producción de estrigolactonas y otras señales químicas responsables de estimular nuevas infecciones micorrícicas (Luginbuehl & Oldroyd, 2017). Como consecuencia, la expansión del hongo dentro de las raíces se autorregula y rara vez alcanza la totalidad del tejido radical. Este mecanismo permite mantener un equilibrio entre los beneficios obtenidos por la planta y el costo energético asociado al suministro de carbono hacia el hongo (Smith & Smith, 2011)

La eficiencia de colonización depende no solo de la cantidad de esporas presentes en el producto, sino también de su capacidad para germinar y establecer estructuras funcionales dentro de las raíces (IJdo et al., 2011). Diferencias en la adaptación de las cepas fúngicas al hospedero o al sustrato pueden generar respuestas contrastantes en la colonización radical (Smith & Read, 2008). Además, algunos inoculantes contienen especies con estrategias de crecimiento más agresivas y mayor capacidad para explorar el suelo mediante redes hifales extensas (Berruti et al., 2016).

4.3 Colonización micorrízica en *S. tuberosum*

El análisis de varianza (ANOVA) mostró diferencias estadísticamente significativas para el factor micorriza ($p < 0.001$), el factor fertilización fosfatada ($p < 0.001$) y la interacción

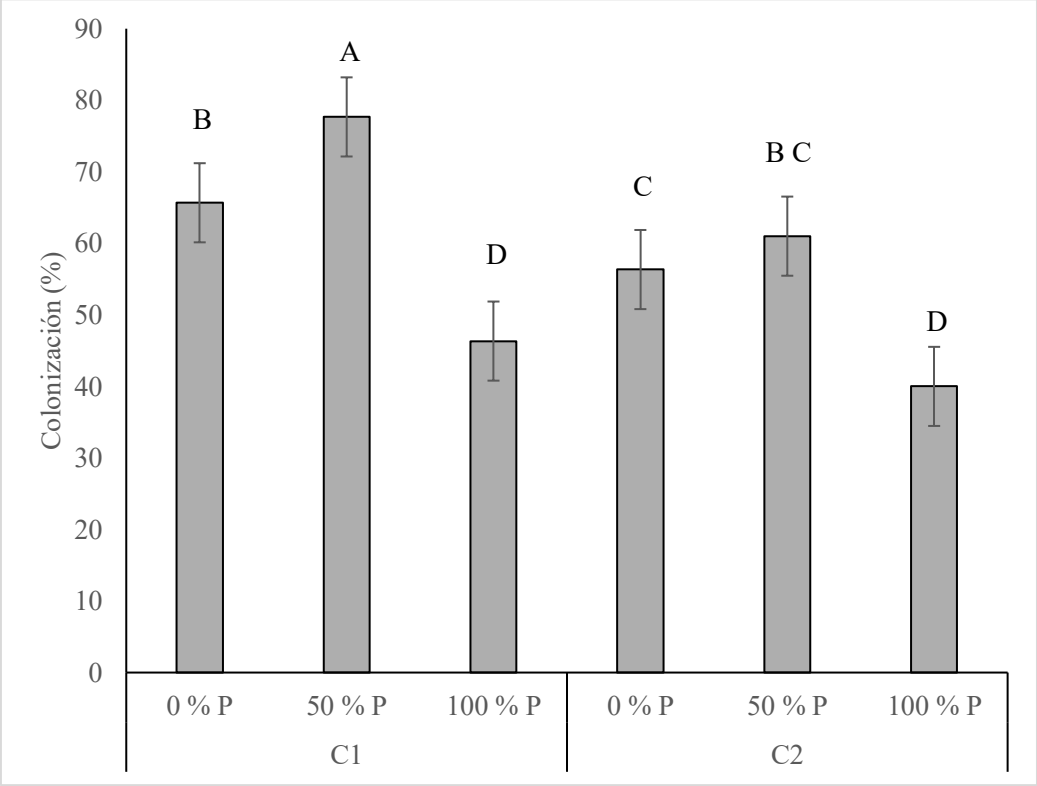
micorriza × fósforo ($p < 0.001$), lo que evidencia que el efecto de los inoculantes estuvo influenciado por la disponibilidad de fósforo en el sustrato.

La prueba de comparación de medias de Tukey identificó seis grupos estadísticamente diferentes entre los tratamientos. El mayor porcentaje de colonización se obtuvo en el tratamiento T5 con 77.7 ± 2.5 %, mientras que el menor correspondió a T9 con 40.0 ± 2.0 %.

En conjunto, la micorriza comercial C1 presentó los mayores niveles de colonización, seguida por C2 y el tratamiento sin micorriza (SM), lo que confirma su mayor capacidad de establecimiento en el sistema radical (Figura 2). Asimismo, se observó que la aplicación del 50 % de P favoreció el desarrollo de la simbiosis, mientras que el 100 % de P redujo significativamente la colonización en ambos inoculantes.

Figura 2

Porcentaje de colonización micorrícica en cultivo de papa



.

El mayor porcentaje de colonización observado en el tratamiento T5 indica que la combinación de C1 con una dosis intermedia de P generó las condiciones más favorables para el establecimiento de la simbiosis micorrícica. La disponibilidad moderada de P suele estimular la asociación planta-hongo debido a que la planta aún requiere mecanismos adicionales para satisfacer sus demandas nutricionales, favoreciendo la formación y desarrollo de arbúsculos dentro de las raíces (Liu et al., 2016). En estas condiciones, la planta mantiene una elevada emisión de compuestos señalizadores hacia la rizosfera que promueven la germinación y ramificación del micelio fúngico (Luginbuehl & Oldroyd, 2017).Como resultado, el hongo recibe carbono de la planta y, a cambio, incrementa la captación de P poco disponible en el suelo (Smith & Smith, 2011). Diversos estudios han reportado que dosis moderadas de P favorecen simultáneamente el crecimiento vegetal y la colonización micorrícica, generando una relación simbiótica más eficiente (W. Liu et al., 2016b). Estos antecedentes coinciden con los resultados obtenidos en el presente estudio, donde el 50% de P produjo los mayores niveles de colonización.

La reducción observada en los tratamientos con 100% de P confirma el efecto inhibitorio que ejerce una alta disponibilidad de este nutriente sobre la simbiosis micorrícica. (Nouri et al., 2014) Cuando el P es abundante en la solución del suelo, la planta disminuye su dependencia de los hongos micorrícicos para adquirir este elemento, reduciendo la inversión de carbono destinada al simbionte (Luginbuehl & Oldroyd, 2017). Como consecuencia, se reduce la formación de nuevas infecciones y disminuye la colonización radical (Liu et al., 2016). Estudios realizados demostraron que niveles elevados de Preducen significativamente la colonización de raíces por hongos micorrícicos arbusculares, mientras que concentraciones intermedias favorecen tanto la riqueza fúngica como la intensidad de micorrización (F. A. Smith & Smith, 2011). Resultados similares fueron reportados observándose una disminución

de la colonización desde valores cercanos al 76% hasta menos del 10% cuando aumentó la disponibilidad de P en el suelo (Nguyen et al., 2019)

La disminución de la micorrización bajo altas concentraciones de P también está relacionada con mecanismos moleculares de regulación de la planta. Cuando las raíces perciben una adecuada disponibilidad de P, disminuye la síntesis y exudación de estrigolactonas moléculas de señalización responsables de atraer a los hongos micorrícicos hacia la rizosfera (Yoneyama et al., 2012). Esta menor señalización limita el reconocimiento entre ambos organismos y reduce el establecimiento de la simbiosis (Marro et al., 2022). En cambio, con niveles intermedios de P, la planta mantiene una mayor dependencia de la asociación micorrícica para mejorar la absorción de nutrientes, lo que favorece una colonización más elevada (Das et al., 2022) .Esta reducción de señales limita la germinación de esporas y el crecimiento inicial de las hifas, disminuyendo la probabilidad de colonización exitosa (Parniske, 2008b). Adicionalmente, la planta puede activar mecanismos de control que restringen el desarrollo excesivo del hongo para evitar costos energéticos innecesarios cuando el P ya no representa un factor limitante. (Pham et al., 2019).

No obstante, la mayoría de las investigaciones desarrolladas en condiciones controladas coinciden en señalar una disminución de la colonización cuando el P se encuentra en concentraciones elevadas (Nguyen et al., 2019). Por ello, los resultados obtenidos en el presente estudio concuerdan con la tendencia más ampliamente reportada en la literatura científica.

4.4 Altura de la planta

La Figura 3 muestra la altura final de las plantas de papa en respuesta a la inoculación con micorrizas comerciales y a los diferentes niveles de fertilización fosfatada. El ANOVA evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0.001$).

.

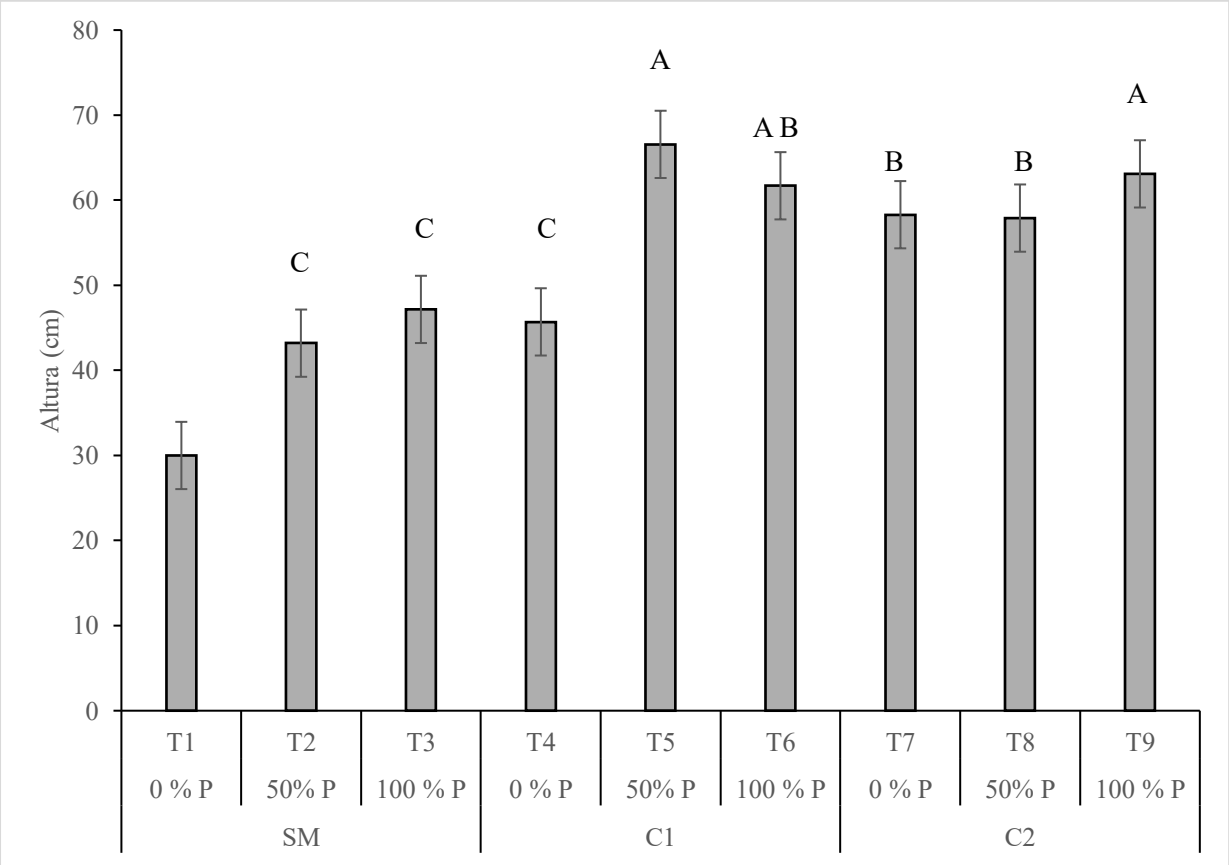
Asimismo, se encontraron diferencias altamente significativas para el factor micorriza comercial (A) ($p < 0,001$), el factor fertilización fosfatada (B) ($p < 0,001$) y la interacción micorriza × fósforo (A × B) ($p < 0,001$), lo que indica que la altura de planta estuvo influenciada significativamente tanto por el tipo de inoculante como por el nivel de fertilización fosfatada y por su interacción. En contraste, el efecto de la repetición no fue significativo ($p = 0,186$).

La prueba de comparación de medias de Tukey (Anexo 6) permitió identificar diferencias significativas entre los tratamientos, distribuidos en cuatro grupos estadísticos (A, B, C y D). La mayor altura se registró en T5, con 66.5 ± 2.1 cm En contraste, el menor crecimiento correspondió al T1 con 30,00 ± 0,40 cm, lo que evidencia una marcada diferencia respecto a los tratamientos que recibieron inoculación micorrícica y fertilización fosfatada.

En general, las plantas inoculadas con micorrizas comerciales alcanzaron mayores alturas que el control sin inoculación, destacándose C1 y C2 por su efecto sobre el crecimiento. En cuanto a la fertilización, el 50 % de P favoreció el desarrollo de las plantas, particularmente cuando se combinó con C1, mientras que la respuesta observada con el 100 % de P varió según el inoculante utilizado. En conjunto, estos resultados muestran que el crecimiento en altura no dependió exclusivamente de la aplicación de P o de la inoculación micorrícica de manera independiente, sino de la respuesta conjunta entre ambos factores.

Figura 3

Altura final de las plantas de papa en respuesta a la inoculación con micorrizas comerciales y diferentes niveles de fertilización fosfatada.



La elevada altura registrada en T5 (66,57 cm), correspondiente a C1 + 50 % de P, coincide con su mayor porcentaje de colonización micorrícica, lo que evidencia una relación favorable entre el establecimiento de la simbiosis y la respuesta agronómica del cultivo. Por su parte, T9 presentó la segunda mayor altura (63.10 cm), lo que indica que el inoculante C2 también favoreció el crecimiento de las plantas bajo una disponibilidad elevada de P. Sin embargo, esta respuesta no estuvo asociada con una mayor colonización micorrícica, ya que el incremento de la fertilización fosfatada al 100 % redujo la colonización, lo que sugiere que la respuesta en crecimiento puede estar influenciada por otros mecanismos asociados a la

.

disponibilidad de nutrientes y a la eficiencia del inoculante.(Smith & Smith, 2011). Los hongos micorrícicos arbusculares incrementan significativamente la superficie efectiva de exploración del suelo mediante redes de hifas extrarradicales capaces de acceder a formas poco disponibles de P (Liu et al., 2016). Esta eficiencia en la captación de nutrientes permite aumentar la actividad fotosintética y la producción de biomasa aérea (Begum et al., 2019). En consecuencia, las plantas inoculadas suelen presentar una mayor elongación de tallos y expansión foliar en comparación con plantas no inoculadas (Berruti et al., 2016).

Los resultados obtenidos concuerdan con investigaciones realizadas en papa, en donde reportaron incrementos significativos en crecimiento y acumulación de biomasa cuando las plantas fueron inoculadas con hongos micorrícicos bajo condiciones de disponibilidad moderada P (McArthur & Knowles, 1993). Los autores observaron que la deficiencia de P redujo la expansión foliar y el crecimiento de los brotes, mientras que la inoculación compensó parcialmente estas limitaciones mediante una mayor absorción del nutriente (McArthur & Knowles, 1993). De manera similar, estudios recientes han demostrado que la inoculación temprana con hongos micorrícicos mejora la eficiencia en el uso del P y favorece el crecimiento vegetativo de la papa durante las etapas iniciales de desarrollo (X. Liu et al., 2025).

La respuesta observada en T2 y T3 demuestra que incluso en ausencia de fertilización fosfatada las micorrizas fueron capaces de mejorar el crecimiento. Este comportamiento se debe a que las hifas micorrícicas exploran volúmenes de suelo inaccesibles para las raíces, permitiendo la movilización de P y otros nutrientes de baja movilidad como zinc y cobre (Smith & Read, 2008). Además, los hongos micorrícicos pueden mejorar la absorción de agua y estimular la producción de fitohormonas relacionadas con el crecimiento vegetal .(Begum et al., 2019). Como resultado, las plantas mantienen una actividad fisiológica más eficiente aún bajo condiciones nutricionales limitantes (Berruti et al., 2016).

La elevada altura registrada en T9 (63,10 cm), correspondiente a C2 + 100 % de P, puede relacionarse con la mayor disponibilidad de fósforo, nutriente esencial para la transferencia de energía, la división celular y el crecimiento vegetal. Aunque este tratamiento presentó menor colonización micorrícica, el aporte completo de P pudo cubrir directamente los requerimientos del cultivo y favorecer su desarrollo. Las hifas micorrícicas amplían el volumen de suelo explorado por las raíces y facilitan la absorción de diferentes nutrientes y agua, además de contribuir a un mejor funcionamiento y desarrollo del sistema radical (Luginbuehl & Oldroyd, 2017). En consecuencia, la asociación micorrícica puede mejorar el aprovechamiento de los recursos disponibles y favorecer el crecimiento de las plantas, incluso bajo diferentes niveles de fertilización. Sin embargo, el P sigue promoviendo procesos fisiológicos fundamentales como la síntesis de ATP, la división celular y el crecimiento de tejidos vegetales (Lazar, 2003).

En papa se reportó que las respuestas más eficientes se obtuvieron cuando la fertilización fosfatada permitió complementar, pero no sustituir, la función de los hongos micorrícicos, bajo estas condiciones, la planta se beneficia simultáneamente del P aportado por el fertilizante y del P explorado por las hifas fúngicas (Black & Tinker, 1977).

4.5 Número de tubérculos

.

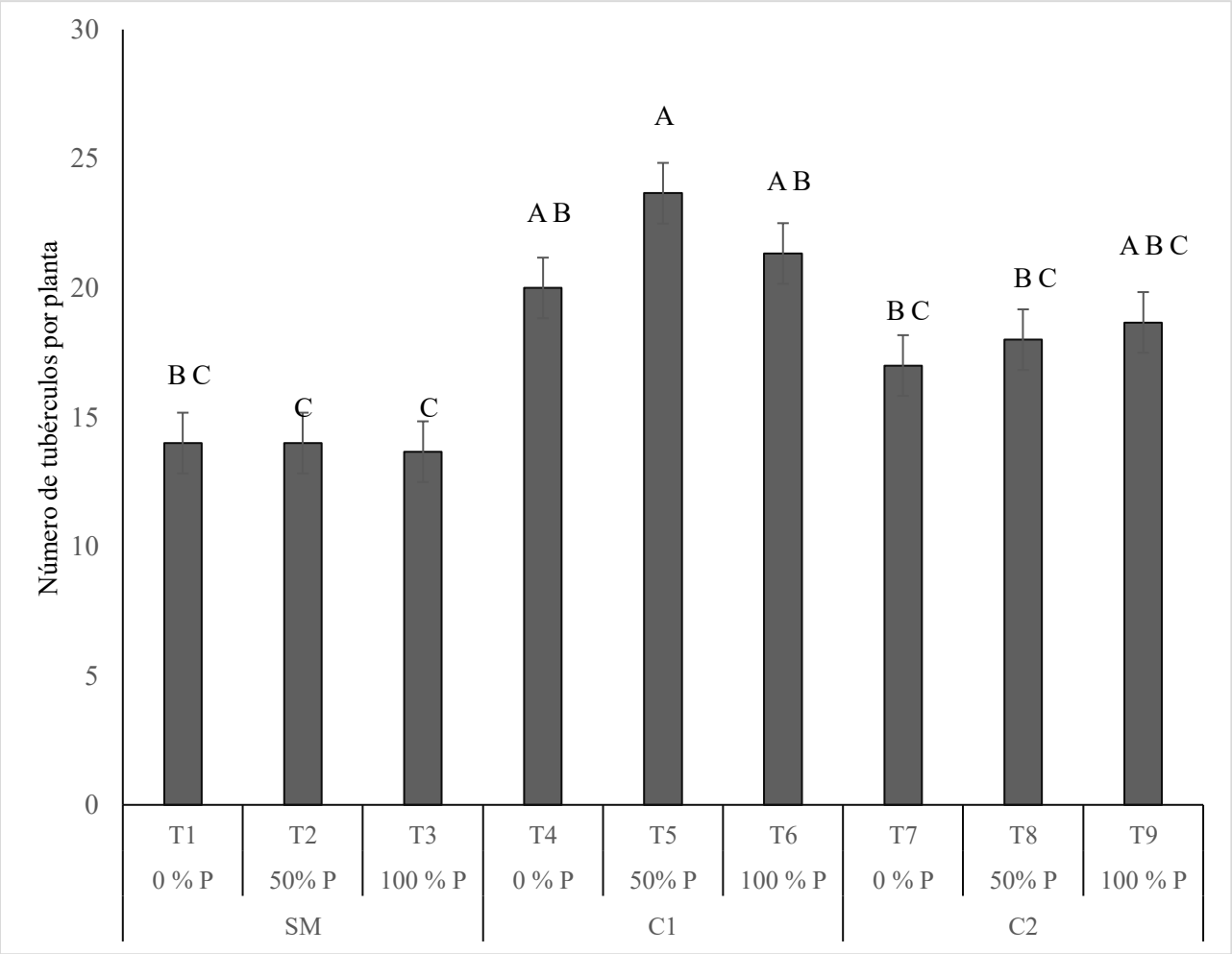
La Figura 4 muestra el número de tubérculos producidos por planta. El análisis de varianza (ANOVA) mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.001$ Al analizar los factores por separado, la micorriza comercial (A) tuvo un efecto significativo sobre el número de tubérculos ($p < 0.001$), mientras que el nivel de fósforo (B) no mostró diferencias significativas ($p = 0.257$). Asimismo, la interacción entre ambos factores (A × B) no fue significativa ($p = 0.462$), indicando que el efecto de la micorriza sobre el número de tubérculos no estuvo condicionado por el nivel de fertilización fosfatada.

La prueba de Tukey mostró que C1 presentó el mayor número promedio de tubérculos (21.67 tubérculos planta^{-1}), seguido de C2 (17.89 tubérculos planta^{-1}) y el testigo (13.89 tubérculos planta^{-1}).De acuerdo con la prueba de comparación de medias de Tukey (Anexo 8), el mayor número de tubérculos se obtuvo en T5 con 23.7 ± 2.5 tubérculos por planta. En cambio, los valores más bajos se registraron en T7, con 13.7 ± 0.6 tubérculos por planta.

En general, las plantas inoculadas con micorrizas produjeron un mayor número de tubérculos que aquellas que no recibieron inoculación, destacándose C1 por presentar los valores más altos. Aunque el mayor promedio se obtuvo con la combinación de C1 y 50 % de P, el efecto del P por sí solo no fue significativo. Esto indica que, bajo las condiciones evaluadas, la presencia de la micorriza tuvo una mayor influencia sobre la formación de tubérculos que el nivel de fertilización fosfatada aplicado.

Figura 4

Número de tubérculos producidos por planta



El mayor número de tubérculos observado en T5 sugiere que la combinación entre una colonización micorrícica eficiente y una disponibilidad moderada de P favoreció los procesos fisiológicos asociados a la tuberización, debido a que el fósforo participa en el metabolismo energético y en la movilización de fotoasimilados necesarios para la formación y desarrollo de los tubérculos. Una adecuada disponibilidad de este nutriente puede, por tanto, favorecer la formación de órganos de reserva y contribuir al rendimiento del cultivo (McArthur & Knowles, 1993; Nasr Esfahani et al., 2025)Este resultado coincide con estudios realizados en la variedad

.

Superchola en Ecuador, donde la inoculación micorrízica junto con niveles intermedios de fertilización fosfórica incrementó el rendimiento y la proporción de tubérculos de categoría primera (Alba, 2026). Las micorrizas arbusculares incrementan la absorción de fósforo, nitrógeno y micronutrientes, elementos esenciales para la formación y diferenciación de tubérculos en papa (Smith & Smith, 2011). Asimismo, la mejora en la nutrición fosfatada incrementa la síntesis de ATP y el transporte de fotoasimilados hacia los órganos de reserva, promoviendo una mayor iniciación de tubérculos (Lazar, 2003). Este comportamiento coincide con los resultados de una investigación en donde se declaró incrementos significativos en la producción de órganos cosechables en cultivos inoculados con hongos micorrícicos debido a una mayor eficiencia en la adquisición de nutrientes (Hijri, 2016). Por tanto, el elevado número de tubérculos observado en T5 estaría relacionado con una interacción favorable entre la micorriza y la disponibilidad de P (Hijri, 2016;F. A. Smith & Smith, 2011).

Los resultados también muestran que la inoculación micorrícica incrementó el número de tubérculos en comparación con los tratamientos que recibieron fertilización fosfatada. El tratamiento T2 produjo un 42.9% más tubérculos que el control T1, demostrándose la capacidad de los hongos micorrícicos para mejorar la exploración del suelo y acceder a fuentes de P poco disponibles para las raíces (Smith & Read, 2008). En consecuencia, la respuesta observada en T2 confirma que las micorrizas pueden compensar parcialmente las limitaciones nutricionales del suelo (Hršelová et al., 1999;Smith & Read, 2008).

A pesar de que los tratamientos con 100% de P mantuvieron una elevada producción de tubérculos, los valores obtenidos fueron inferiores a los registrados en T5. Esta respuesta podría explicarse porque las altas concentraciones de P reducen la colonización micorrícica y limitan los beneficios derivados de la simbiosis (W. Liu et al., 2016a). Como resultado, la eficiencia

conjunta de la fertilización y la micorrización disminuye respecto a situaciones donde ambos factores actúan de manera complementaria.

Por otro lado, algunos estudios han encontrado respuestas menos consistentes respecto al efecto de las micorrizas sobre la tuberización. Se señaló que la magnitud de la respuesta depende de factores como la variedad cultivada, las especies de hongos utilizadas y las condiciones edafoclimáticas (Douds et al., 2007). En ciertos casos, la alta fertilidad inicial del suelo reduce la dependencia micorrícica y limita las diferencias entre tratamientos inoculados y no inoculados. Sin embargo, la tendencia general observada en la literatura indica que la inoculación micorrícica mejora la producción de tubérculos cuando el P constituye un factor limitante o moderadamente disponible (Douds et al., 2007;Hijri, 2016).

4.6 Rendimiento de la planta

La Figura 5 muestra el rendimiento de tubérculos por planta. El ANOVA mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Tanto la micorriza (A) como el fósforo (B) tuvieron un efecto significativo sobre el rendimiento ($p = 0.029$), al igual que la interacción micorriza × fósforo (A × B) ($p = 0.028$).

La prueba de Tukey (Anexo 8) mostró que el mayor rendimiento correspondió a T5 con 1,135.0 ± 234.7 g/planta. En contraste, los menores valores se registraron en T7 (516.7 ± 35.1 g/planta), En general, C1 presentó el mayor rendimiento, lo que evidencia una respuesta favorable a la inoculación micorrícica, particularmente cuando se combinó con el 50 % de P.

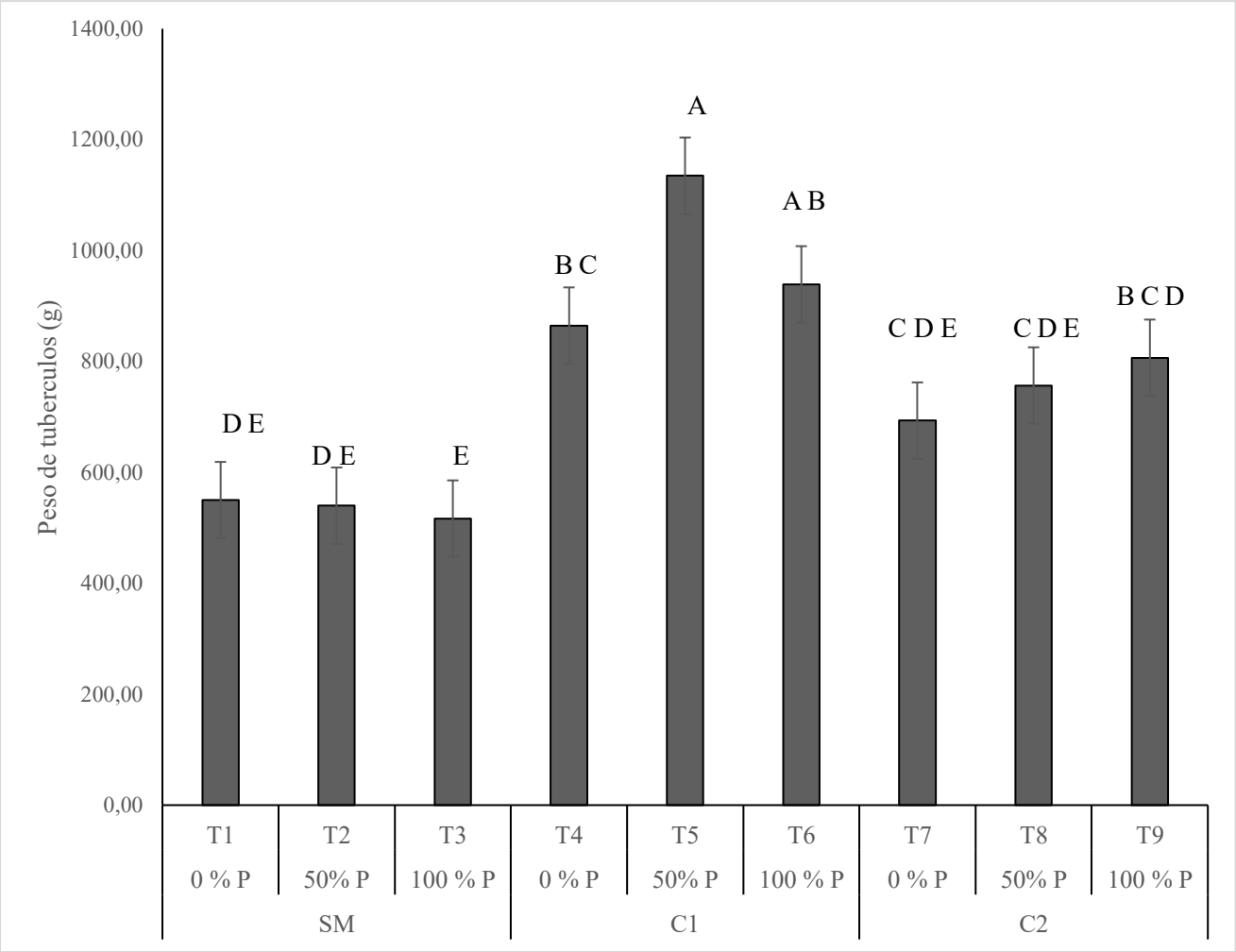
El rendimiento obtenido en T5 equivale aproximadamente a 1135 g por planta. Para determinar si este valor es comparable con otros estudios de la misma variedad, es necesario considerar las condiciones de cultivo y el número de plantas utilizadas. Asimismo, la

.

conversión directa a hectárea depende de la densidad de siembra; por ejemplo, con 40 000 plantas/ha, el rendimiento estimado sería de aproximadamente 45.4 t/ha.

Figura 5

Rendimiento promedio de tubérculos por planta.



El elevado rendimiento alcanzado por T5 demuestra que la combinación C1 y una dosis intermedia de P generó las condiciones más favorables para la acumulación de biomasa en los tubérculos. El P desempeña un papel fundamental en la transferencia de energía celular y en la síntesis de compuestos necesarios para el llenado de los tubérculos (Lazar, 2003) .En efecto,

una mayor disponibilidad de este nutriente suele traducirse en incrementos significativos del rendimiento. Investigaciones reportaron aumentos promedio cercanos al 20–30% en la productividad de diversos cultivos tras la inoculación con micorrizas arbusculares. (Hijri, 2016).

Los resultados obtenidos muestran que la combinación de la micorriza comercial 1 (C1) con el 50 % de P (T5) alcanzó el mayor rendimiento. Estos resultados coinciden con investigaciones realizadas específicamente en papa, donde la inoculación con hongos micorrícicos arbusculares incrementó la biomasa aérea y el rendimiento de tubérculos, particularmente bajo niveles moderados de P (McArthur & Knowles, 1993). De manera similar, se han reportado incrementos en el rendimiento de papa asociados con una mayor absorción de P y nitrógeno en plantas inoculadas con hongos micorrícicos arbusculares (Carrara et al., 2023).

Al comparar los tratamientos con diferentes niveles de P, se observa que T5, que recibió el 50 % de P en combinación con C1, presentó un rendimiento superior al de T8 y T9, que recibieron el 100 % de P. Este comportamiento coincide con estudios que señalan que un incremento en la aplicación de P no necesariamente produce un aumento proporcional del rendimiento, debido a que la eficiencia de uso y recuperación del nutriente puede disminuir con dosis elevadas. Se encontró que tanto la productividad parcial del P como su eficiencia de recuperación disminuyeron significativamente a medida que aumentó la dosis aplicada, incluso bajo condiciones de alta disponibilidad de P en el suelo. (Huo et al., 2024)

La diferencia observada entre T5 y los tratamientos con 100 % de P también puede relacionarse con el efecto de la asociación micorrícica sobre la exploración y aprovechamiento de los recursos del sustrato. Las hifas micorrícicas pueden extenderse más allá de la zona directamente explorada por las raíces y favorecer el acceso de la planta a nutrientes y agua,

.

mejorando el aprovechamiento de los recursos disponibles (Begum et al., 2019). Asimismo, la magnitud de esta respuesta puede variar según la compatibilidad entre el hongo, la planta hospedera y las condiciones del suelo (Pellegrino et al., 2011). Esta variabilidad también ha sido observada en investigaciones recientes con inoculantes micorrícicos comerciales aplicados en papa, en las que la respuesta sobre el rendimiento dependió del tipo de inoculante y de las condiciones experimentales. (Loit et al., 2023)

En papa, se ha demostrado que la eficiencia de uso del P disminuye cuando se aplican dosis elevadas, lo que puede reducir la eficiencia productiva del fertilizante (Huo et al., 2024). Por ello, la utilización de una dosis intermedia de P acompañada de un biofertilizante micorrícico podría constituir una estrategia para mejorar el aprovechamiento de los nutrientes y disminuir parcialmente la dependencia de la fertilización química (Ettlili et al., 2022).

Desde una perspectiva económica, el posible beneficio del biofertilizante no debe considerarse únicamente a partir del incremento del rendimiento, sino también en función de la cantidad de fertilizante químico que podría dejar de utilizarse. La rentabilidad de las diferentes dosis de P depende de la relación entre el rendimiento obtenido, el costo de los insumos y el valor económico de la producción (Huo et al., 2024). En este sentido, el resultado de T5 sugiere un posible beneficio productivo del uso de C1 junto con una dosis reducida de P; sin embargo, no es posible afirmar que este tratamiento sea económicamente más rentable sin conocer el costo del biofertilizante, el precio del fertilizante fosfatado y el valor de los tubérculos producidos.

Además, el uso de inoculantes comerciales debe evaluarse considerando su calidad y composición, ya que la respuesta productiva puede variar entre productos y condiciones de aplicación (Loit et al., 2023). Esto es especialmente importante en el presente estudio, donde C1 y C2 mostraron diferencias en su capacidad de colonización y en la respuesta productiva

de las plantas. Por tanto, los resultados obtenidos sugieren que no basta con considerar la aplicación de una micorriza como una práctica general, sino que es necesario evaluar la efectividad del inoculante específico utilizado.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Los inoculantes micorrícicos evaluados (C1 y C2) presentaron concentraciones de propágulos infectivos que concuerdan con las especificaciones técnicas indicadas por los fabricantes. Además, el nivel de colonización demostró que estas mantienen alta viabilidad y capacidad de colonización.
- C1 mostró los mayores porcentajes de colonización tanto en cultivo trampa como en papa, lo que demuestra una mayor capacidad infectiva y adaptación al hospedero en comparación con C2. Esto sucede incluso presentando menores concentraciones de propágulos infectivos, lo que significaría que esta cepa tiene mayor capacidad de colonización.
- La colonización micorrícica estuvo influenciada significativamente por el tipo de micorriza y el nivel de fósforo aplicado, siendo las dosis intermedias (50 %) las más favorables para el establecimiento de la simbiosis.
- La inoculación con micorrizas favoreció significativamente el desarrollo del cultivo de papa, evidenciado por el incremento en la altura de planta, número de tubérculos y rendimiento, especialmente en el tratamiento C1 + 50 % de P. Estos resultados indican que una mayor eficiencia de establecimiento de la micorriza se relacionó con una

.

respuesta agronómica favorable, permitiendo obtener un mejor desempeño del cultivo con una dosis intermedia de fósforo.

- Los tratamientos con 100 % de fósforo mostraron una reducción en la colonización micorrícica, confirmando el efecto inhibitorio de una alta disponibilidad del nutriente sobre la simbiosis, aunque mantuvieron buenos niveles de crecimiento y rendimiento por el aporte directo del fertilizante.

5.2, Recomendaciones

- Promover el uso de micorrizas comerciales como biofertilizantes complementarios en el cultivo de papa, especialmente en sistemas con fertilización fosfatada reducida, para mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes y disminuir la dependencia de insumos químicos.
- Priorizar dosis intermedias de fósforo (aproximadamente 50 % de la fertilización convencional) para maximizar la colonización micorrícica y el rendimiento del cultivo.
- Realizar controles periódicos de viabilidad y pureza en los inoculantes micorrícicos, verificando la concentración de propágulos y la ausencia de patógenos, conforme a las normativas de Agrocalidad y NTE INEN 2972:2013.
- Evaluar la respuesta de diferentes variedades de papa y condiciones edafoclimáticas para determinar la dependencia micorrícica específica y optimizar las estrategias de inoculación.
- Integrar el uso de micorrizas en programas de manejo sostenible de suelos y fertilización, como parte de prácticas agroecológicas orientadas a reducir el impacto ambiental de la agricultura intensiva.

- Fomentar estudios a largo plazo sobre la persistencia de las micorrizas en el suelo, su efecto acumulativo en la fertilidad y su interacción con otros microorganismos benéficos, con el fin de fortalecer su aplicación en sistemas agrícolas sostenibles.

.

ANEXOS

Anexo 1

Analisis de muestra del suelo

espol Escuela Superior Politécnica del Litoral
Guayaquil - Ecuador
Campus Gustavo Galindo Velasco - Km. 30.5 Vía Perimetral - Pbx: (593-4) 2269 269

Reporte Técnico No 037-LABSYNV-2025

ANÁLISIS DE 1 MUESTRA DE SUELO

Elaborado por:

Laboratorio de Suelos y Nutrición Vegetal

Dr. Eduardo Chávez Navarrete
Dra. Martha Hidalgo L.
Ing. María Jama O.
Ing. Marcos Hernández B.

Mayo, 2025

REPORTE DE RESULTADOS DE ANÁLISIS TÉCNICO

CLIENTE:	MÓNICA IMBAQUINGO V
DIRECCIÓN CLIENTE:	Ibarra – El Olivo
SOLICITADO POR:	Mónica Imbaquingo
TIPO DE MUESTRA:	Suelo
ANÁLISIS SOLICITADO:	Completo
NÚMERO DE MUESTRAS:	1
IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS:	Muestra 1
# ORDEN DE TRABAJO	LSYNV-046-2025
FECHA DE ANÁLISIS:	09-mayo-2025

PARÁMETRO	MÉTODO
pH; CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	agua:suelo (5:1)
DETERMINACIÓN DE MACRO, MICROELEMENTOS Y METALES PESADOS MEDIANTE ICP-OES	Mehlich III
Nota: Los resultados corresponden únicamente a las muestras analizadas por el laboratorio.	

1) Características Físico Química:

Nombre muestra	pH	EC uS/cm	Salinidad psu	CICe (cmol/kg)
Muestra 1	6,73	44,4	0,03	6,62

EC= Conductividad Eléctrica
CICe= Capacidad de intercambio catiónico efectiva

2) Macro elementos

Nombre muestra	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)	K (mg/kg)	P (mg/kg)
Muestra 1	1074,02	237,02	474,04	36,54

Macroelementos:
Ca = Calcio, Mg= Magnesio, K= Potasio, P = Fósforo,
mg/kg = miligramo/kilogramo

3) Microelementos:

Nombre muestra	Fe (mg/kg)	B (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Co (mg/kg)	Ni (mg/kg)
Muestra 1	192,36	78,76	0,98	0,30	BLD

Nombre muestra	Mn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Na (mg/kg)	Mo (mg/kg)	S (mg/kg)
Muestra 1	6,03	5,52	220,23	BLD	8,87

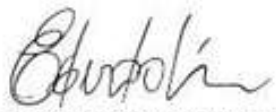
Microelementos:
Fe= Hierro; B= Boro;
Zn = Zinc; Co= Cobalto;
Ni= Níquel;
Mn = Manganeso, Cu= Cobre;
Na= Sodio;
Mo= Molibdeno; S= Azufre
mg/kg = miligramo/kilogramo
BLD= Bajo límite de detección

4) Metales Pesados

Nombre muestra	Al (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Pb (mg/kg)
Muestra 1	678,69	BLD	0,14	BLD

Metales Pesados:
Al= Aluminio; Cd = Cadmio;
Cr = Cromo; Pb = Plomo
mg/kg = miligramo/kilogramo
BLD= Bajo límite de detección

FIRMA DE APROBACIÓN



Dr. Eduardo Chávez Navarrete

Jefe de Laboratorio de Suelos y Nutrición Vegetal

Preguntas, comentarios o sugerencias contactarse con: Dra. Martha Hidalgo
Laboratorio de Suelos – ESPOL, Km 30.5 Vía Perimetral - Campus Gustavo Galindo, Facultad de Ciencias de la Vida (FCV) Edificio 3E
Correos electrónicos labsuelos@espol.edu.ec; mahidal@espol.edu.ec; Página Web: www.espol.edu.ec

Anexo 2

Tabla 9221 para determinar NMP cuando se utilizan 5 repeticiones por dilución.

TABLA 9221: IV. MPN INDEX AND 95% CONFIDENCE LIMITS FOR VARIOUS COMBINATION OF POSITIVE RESULT WHEN FIVE TUBES ARE USED PER DILUTION

Combinación de tubos positivos			NMP/ 100mL	Límites de 95% de confianza		Combinación de tubos positivos			NMP/ 100mL	Límites de 95% de confianza	
				Inferior	Superior					Inferior	Superior
0	0	0	< 1.8	-	6.8	4	0	3	25	9.8	70
0	0	1	1.8	0.090	6.8	4	1	0	17	6.0	40
0	1	0	1.8	0.090	6.9	4	1	1	21	6.8	42
0	1	1	3.6	0.70	10	4	1	2	26	9.8	70
0	2	0	3.7	0.70	10	4	1	3	31	10	70
0	2	1	5.5	1.8	15	4	2	0	22	6.8	50
0	3	0	5.6	1.8	15	4	2	1	26	9.8	70
1	0	0	2.0	0.10	10	4	2	2	32	10	70
1	0	1	4.0	0.70	10	4	2	3	38	14	100
1	0	2	6.0	1.8	15	4	3	0	27	9.9	70
1	1	0	4.0	0.71	12	4	3	1	33	10	70
1	1	1	6.1	1.8	15	4	3	2	39	14	100
1	1	2	8.1	3.4	22	4	4	0	34	14	100
1	2	0	6.1	1.8	15	4	4	1	40	14	100
1	2	1	8.2	3.4	22	4	4	2	47	15	120
1	3	0	8.3	3.4	22	4	5	0	41	14	100
1	3	1	10	3.5	22	4	5	1	48	15	120
1	4	0	10	3.5	22	5	0	0	23	6.8	70
2	0	0	4.5	0.79	15	5	0	1	31	10	70
2	0	1	6.8	1.8	15	5	0	2	43	14	100
2	0	2	9.1	3.4	22	5	0	3	58	22	150
2	1	0	6.8	1.8	17	5	1	0	33	10	100
2	1	1	9.2	3.4	22	5	1	1	46	14	120
2	1	2	12	4.1	26	5	1	2	63	22	150
2	2	0	9.3	3.4	22	5	1	3	84	34	220
2	2	1	12	4.1	26	5	2	0	49	15	150
2	2	2	14	5.9	36	5	2	1	70	22	170
2	3	0	12	4.1	26	5	2	2	94	34	230
2	3	1	14	5.9	36	5	2	3	120	36	250
2	4	0	15	5.9	36	5	2	4	150	58	400
3	0	0	7.8	2.1	22	5	3	0	79	22	220
3	0	1	11	3.5	23	5	3	1	110	34	250
3	0	2	13	5.6	35	5	3	2	140	52	400
3	1	0	11	3.5	26	5	3	3	170	70	400
3	1	1	14	5.6	36	5	3	4	210	70	400
3	1	2	17	6.0	36	5	4	0	130	36	400
3	2	0	14	5.7	36	5	4	1	170	58	400
3	2	1	17	6.8	40	5	4	2	220	70	440
3	2	2	20	6.8	40	5	4	3	280	100	710
3	3	0	17	6.8	40	5	4	4	350	100	710
3	3	1	21	6.8	40	5	4	5	430	150	1100
3	3	2	24	9.8	70	5	5	0	240	70	710
3	4	0	21	6.8	40	5	5	1	350	100	1100
3	4	1	24	9.8	70	5	5	2	540	150	1700
3	5	0	25	9.8	70	5	5	3	920	220	2600
4	0	0	13	4.1	35	5	5	4	1600	400	4600
4	0	1	17	5.9	36	5	5	5	> 1600	700	-
4	0	2	21	6.8	40						

Fuente: **STANDARD METHODS 9221 B. STANDARD TOTAL COLIFORM FERMENTATION TECHNIQUE , JUNE 2003**

.

Anexo 3 *T de student para colonización en cultivo trampa*

Clasificación	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n(1)	n(2)	Media (1)	Media (2)
Micorriza	Resultado	C1	C2	3	3	72,67	58,22

Diferencia de medias	LI (95 %)	LS (95 %)	pHomVar	T	p-valor	Tipo de prueba
14,45	4,72	24,17	0,5451	4,13	0,0145	Bilateral

Anexo 4: *ANOVA y Tukey de micorrización en cultivos trampa*

Cuadro de análisis de varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
A	26636,74	2	13318,37	783,65	<0,0001
Repetición	199,63	8	24,95	1,47	0,2439
Error	271,93	16	17,00		
Total	27108,30	26			

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05).

Tabla 3. Tukey – Factor A (Micorriza comercial)

Tratamiento	Porcentaje de colonización %	n	E.E.	Grupo
C1	72,67	9	1,37	A
C2	58,22	9	1,37	B
SM	0,00	9	1,37	C

Anexo 5 *ANOVA y Tukey de micorrización en cultivos de papa (por factores y tratamientos)*

Cuadro de análisis de varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Repetición	6,22	2	3,11	0,43	0,6547
Micorriza comercial (A)	20590,89	2	10295,44	1439,36	<0,0001
Porcentaje de fósforo (B)	1429,56	2	714,78	99,93	<0,0001
Interacción A*B	799,56	4	199,89	27,95	<0,0001
Error	114,44	16	7,15		
Total	22940,67	26			

Tukey – Micorriza comercial (A)

Tratamiento	Media	n	E.E.	Grupo		
C1	63,22	9	0,89	A		
C2	52,44	9	0,89		B	
SM	0,00	9	0,89			C

Tukey – Porcentaje de fósforo (B)

Concentración (%)	Media	n	E.E.	Grupo		
0	46,22	9	0,89	A		
40	40,67	9	0,89		B	
100	28,78	9	0,89			C

Tukey – Tratamientos generales

Tratamiento	Porcentaje de colonización (%)	n	E.E.	Grupo			
5	77,67	3	1,54	A			
4	65,67	3	1,54		B		
8	61,00	3	1,54		B	C	
7	56,33	3	1,54			C	
6	46,33	3	1,54				D
9	40,00	3	1,54				D
3	0,00	3	1,54				E
2	0,00	3	1,54				E
1	0,00	3	1,54				E

Anexo 6 *ANOVA y Tukey de Altura final de las plantas de papa (por factores y tratamientos)*

.

Cuadro de análisis de varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Micorriza comercial (A)	2124,85	2	1062,42	257,92	<0,0001
Porcentaje de fósforo (B)	864,47	2	432,23	104,93	<0,0001
Repetición	15,41	2	7,70	1,87	0,1863
Interacción A*B	385,54	4	96,39	23,40	<0,0001
Error	65,91	16	4,12		
Total	3456,17	26			

Tukey – Micorriza comercial (A)

Tratamiento	Media	n	E.E.	Grupo	
C2	59,77	9	0,68	A	
C1	57,99	9	0,68	A	
SM	40,12	9	0,68		B

Tukey – Porcentaje de fósforo (B)

Concentración (%)	Media	n	E.E.	Grupo	
100	57,32	9	0,68	A	
50	55,89	9	0,68	A	
0	44,67	9	0,68		B

Tukey – Tratamientos generales

Tratamiento	Altura (cm)	n	E.E.	Grupo			
5	66,57	3	1,17	A			
9	63,10	3	1,17	A			
6	61,70	3	1,17	A	B		
7	58,30	3	1,17		B		
8	57,90	3	1,17		B		
3	47,17	3	1,17			C	
4	45,70	3	1,17			C	
2	43,10	3	1,17			C	
1	30,00	3	1,17				D

Anexo 7 *ANOVA y Tukey de Número de tubérculos por planta de papa (por factores y tratamientos)*

Cuadro de análisis de varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Repetición	36,96	2	18,48	4,95	0,0212
Micorriza comercial (A)	272,30	2	136,15	36,49	<0,0001
Porcentaje de fósforo (B)	10,96	2	5,48	1,47	0,2596
Interacción A*B	14,15	4	3,54	0,95	0,4620
Error	59,70	16	3,73		
Total	394,07	26			

Tukey – Micorriza comercial (A)

Tratamiento	Media	n	E.E.	Grupo		
C1	21,67	9	0,64	A		
C2	17,89	9	0,64		B	
SM	13,89	9	0,64			C

Tukey – Porcentaje de fósforo (B)

Concentración (%)	Media	n	E.E.	Grupo
50	18,56	9	0,64	A
100	17,89	9	0,64	A
0	17,00	9	0,64	A

Tukey – Tratamientos generales

Tratamiento	N° de tubérculos	n	E.E.	Grupo
5	23,67	3	1,12	A
6	21,33	3	1,12	A B
4	20,00	3	1,12	A B
9	18,67	3	1,12	A B C
3	17,00	3	1,12	B C
7	16,00	3	1,12	B C
8	15,00	3	1,12	B C
2	14,00	3	1,12	C
1	13,67	3	1,12	C

Anexo 8 *ANOVA y Tukey de Peso de tubérculos por planta de papa (por factores y tratamientos)*

.

Cuadro de análisis de varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Repetición	39904,89	2	19952,44	3,35	0,0608
Micorriza comercial (A)	887282,67	2	443641,33	74,57	<0,0001
Porcentaje de fósforo (B)	52417,56	2	26208,78	4,41	0,0299
Interacción A*B	85715,11	4	21428,78	3,60	0,0282
Error	95188,44	16	5949,28		
Total	1160508,67	26			

Tukey – Micorriza comercial (A)

Tratamiento	Media	n	E.E.	Grupo
C1	979,56	9	25,71	A
C2	752,22	9	25,71	B
SM	535,56	9	25,71	C

Tukey – Porcentaje de fósforo (B)

Concentración (%)	Media	n	E.E.	Grupo
50	810,56	9	25,71	A
100	754,11	9	25,71	A B
0	702,67	9	25,71	B

Tukey – Tratamientos generales

Tratamiento	Peso de tubérculos (g)	n	E.E.	Grupo
5	1135,00	3	44,53	A
6	939,00	3	44,53	A B
4	864,67	3	44,53	B C
9	806,67	3	44,53	B C D
8	693,33	3	44,53	C D E
7	550,00	3	44,53	D E
2	516,67	3	44,53	E

REFERENCIAS

Ahmad, J., Grunden, A., & Kuzma, J. (2024). Biotechnology executive order opens door for regulatory reform and social acceptance of genetically engineered microbes in agriculture. *GM Crops & Food*, *15*(1), 248–261. https://doi.org/10.1080/21645698.2024.2381294

Alba, V. (2026). *Evaluación del rendimiento del cultivo de papa (Solanum tuberosum) variedad Superchola con la aplicación de Glomus iranicum var. tenuihypharum a diferentes dosis de fertilización edáfica en el Centro Experimental San Francisco – UPEC*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DELCARCHI.

Alcalá de Jesús, M. (2009). Mineralogy and Phosphate Retention in Andisols. *Terra Latinoamericana*, *27*, 275–286.

Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Microbial Phosphorus Solubilization and Its Potential for Use in Sustainable Agriculture. *Frontiers in Microbiology*, *8*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971

Araujo, A. (2021). *Manual del cultivo de papa para pequeños productores*.

Arifin, M., Devnita, R., Anda, M., Goenadi, D. H., & Nugraha, A. (2022). Characteristics of Andisols Developed from Andesitic and Basaltic Volcanic Ash in Different Agro-Climatic Zones. *Soil Systems*, *6*(4), 78. https://doi.org/10.3390/soilsystems6040078

Augé, R. M., Toler, H. D., & Saxton, A. M. (2015). Arbuscular mycorrhizal symbiosis alters stomatal conductance of host plants more under drought than under amply watered conditions: a meta-analysis. *Mycorrhiza*, *25*(1), 13–24. https://doi.org/10.1007/s00572-014-0585-4

Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. (2019). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Growth Regulation:

.

Implications in Abiotic Stress Tolerance. *Frontiers in Plant Science*, *10*. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068

Berruti, A., Lumini, E., Balestrini, R., & Bianciotto, V. (2016). Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Natural Biofertilizers: Let's Benefit from Past Successes. *Frontiers in Microbiology*, *6*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01559

Black, R. L. B., & Tinker, P. B. (1977). Interaction between effects of vesicular–arbuscular mycorrhiza and fertiliser phosphorus on yields of potatoes in the field. *Nature*, *267*(5611), 510–511. https://doi.org/10.1038/267510b0

Bonfante, P., & Genre, A. (2010). Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature Communications*, *1*(1), 48. https://doi.org/10.1038/ncomms1046

Bonilla Vichot, M. (2021). *Efecto del sustrato y la micorriza arbuscular en el sistema radical y estado nutricional de Swietenia mahagoni L. Jacq.* (Vol. 9). http://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/705

Brundrett, M. C., & Tedersoo, L. (2018). Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*, *220*(4), 1108–1115. https://doi.org/10.1111/nph.14976

Bucher, M. (2007). Functional biology of plant phosphate uptake at root and mycorrhiza interfaces. *New Phytologist*, *173*(1), 11–26. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01935.x

Carrara, J. E., Reddivari, L., Lehotay, S. J., Zinati, G., & Heller, W. P. (2023). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Increase the Yield and Nutritional Quality of Yellow and Purple

Fleshed Potatoes (Solanum tuberosum). *American Journal of Potato Research*, *100*(3), 210–220. https://doi.org/10.1007/s12230-023-09910-w

Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S., & Cruz-Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta Botanica Mexicana*, (129). https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932

Dahlgren, R. A., Saigusa, M., & Ugolini, F. C. (2004). *The Nature, Properties and Management of Volcanic Soils* (pp. 113–182). https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)82003-5

Das, D., Paries, M., Hobecker, K., Gigl, M., Dawid, C., Lam, H.-M., Zhang, J., Chen, M., & Gutjahr, C. (2022). PHOSPHATE STARVATION RESPONSE transcription factors enable arbuscular mycorrhiza symbiosis. *Nature Communications*, *13*(1), 477. https://doi.org/10.1038/s41467-022-27976-8

Douds, D. D., Nagahashi, G., Reider, C., & Hepperly, P. R. (2007). Inoculation with Arbuscular Mycorrhizal Fungi Increases the Yield of Potatoes in a High P Soil. *Biological Agriculture & Horticulture*, *25*(1), 67–78. https://doi.org/10.1080/01448765.2007.10823209

Espinosa, J., Moreno Izquierdo, V., & Bernal, G. (2018). *The Soils of Ecuador* (J. Espinosa, J. Moreno, & G. Bernal, Eds.). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25319-0

Ettlili, S., Labidi, S., Khiari, B., Jerbi, M., Ben Alaya, A., & Djébali, N. (2022). Reduced nitrogen and phosphorus fertilization combined with mycorrhizal inoculation enhance potato yield and soil mineral fertility. *JOURNAL OF OASIS AGRICULTURE AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT*, *4*(4), 20–29. https://doi.org/10.56027/JOASD.212022

European Parlament. (2019). *EU_Fertilising Productts Regulation 1009_2019_EN*.

.

Giovannetti, M., & Mosse, B. (1980). AN EVALUATION OF TECHNIQUES FOR MEASURING VESICULAR ARBUSCULAR MYCORRHIZAL INFECTION IN ROOTS. *New Phytologist*, *84*(3), 489–500. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04556.x

Gopal, J., & Khurana, S. M. (2006). *Handbook of Potato Production, Improvement, and Postharvest Management*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780429246623

Hawkes, J. G. . (1992). *The potato : evolution, biodiversity and genetic resources*. CBS Publishers & Distributors.

Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I. S., & White, P. (2012). Functions of Macronutrients. In *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (pp. 135–189). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6

Hijmans, R. J. (2001). Global distribution of the potato crop. *American Journal of Potato Research*, *78*(6), 403–412. https://doi.org/10.1007/BF02896371

Hijri, M. (2016). Analysis of a large dataset of mycorrhiza inoculation field trials on potato shows highly significant increases in yield. *Mycorrhiza*, *26*(3), 209–214. https://doi.org/10.1007/s00572-015-0661-4

Hršelová, H., Chvátalová, I., Vosátka, M., Klír, J., & Gryndler, M. (1999). Correlation of abundance of arbuscular mycorrhizal fungi, bacteria and saprophytic microfungi with soil carbon, nitrogen and phsophorus. *Folia Microbiologica*, *44*(6), 683–687. https://doi.org/10.1007/BF02825662

Huo, W., Crants, J. E., Miao, Y., & Rosen, C. J. (2024). Impact of phosphorus rate, soil fumigation, and cultivar on potato yield, quality, phosphorus use efficiency and economic

returns in a high phosphorus soil. *European Journal of Agronomy*, *153*, 127069. https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127069

IJdo, M., Cranenbrouck, S., & Declerck, S. (2011). Methods for large-scale production of AM fungi: past, present, and future. *Mycorrhiza*, *21*(1), 1–16. https://doi.org/10.1007/s00572-010-0337-z

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), & Dirección Producción de Estadística Agropecuarias y Ambientales (INEC). (2025). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) 2025*.

Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), E. E. S. C. P. N. de R. y T. rubro P. (2026). *Informe Anual 2025 – Programa Nacional de Raíces y Tubérculos, rubro Papa*.

Lazar, T. (2003). Taiz, L. and Zeiger, E. Plant physiology. 3rd edn. *Annals of Botany*, *91*(6), 750–751. https://doi.org/10.1093/aob/mcg079

Liu, L., Zheng, X., Wei, X., Kai, Z., & Xu, Y. (2021). Excessive application of chemical fertilizer and organophosphorus pesticides induced total phosphorus loss from planting causing surface water eutrophication. *Scientific Reports*, *11*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-021-02521-7

Liu, W., Zhang, Y., Jiang, S., Deng, Y., Christie, P., Murray, P. J., Li, X., & Zhang, J. (2016a). Arbuscular mycorrhizal fungi in soil and roots respond differently to phosphorus inputs in an intensively managed calcareous agricultural soil. *Scientific Reports*, *6*(1), 24902. https://doi.org/10.1038/srep24902

Liu, W., Zhang, Y., Jiang, S., Deng, Y., Christie, P., Murray, P. J., Li, X., & Zhang, J. (2016b). Arbuscular mycorrhizal fungi in soil and roots respond differently to phosphorus inputs

in an intensively managed calcareous agricultural soil. *Scientific Reports*, *6*(1), 24902. https://doi.org/10.1038/srep24902

Liu, X., Yu, J., Wei, J., Qin, Y., Shi, X., Liu, K., Jia, L., & Fan, M. (2025). Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi at the seedling stage of potatoes improves phosphorus use efficiency. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *9*. https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1546032

Loit, K., Soonvald, L., Adamson, K., Runno-Paurson, E., Tedersoo, L., & Astover, A. (2023). Assessing the effect of commercial arbuscular mycorrhizal fungal inoculum on potato plant disease incidence, yield and the indigenous root fungal community composition. *BioControl*, *68*(5), 537–547. https://doi.org/10.1007/s10526-023-10209-2

López-Ráez, J. A. (2016). How drought and salinity affect arbuscular mycorrhizal symbiosis and strigolactone biosynthesis? *Planta*, *243*(6), 1375–1385. https://doi.org/10.1007/s00425-015-2435-9

Luginbuehl, L. H., & Oldroyd, G. E. D. (2017). Understanding the Arbuscule at the Heart of Endomycorrhizal Symbioses in Plants. *Current Biology*, *27*(17), R952–R963. https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.06.042

Marro, N., Lidoy, J., Chico, M. Á., Rial, C., García, J., Varela, R. M., Macías, F. A., Pozo, M. J., Janoušková, M., & López-Ráez, J. A. (2022). Strigolactones: New players in the nitrogen–phosphorus signalling interplay. *Plant, Cell & Environment*, *45*(2), 512–527. https://doi.org/10.1111/pce.14212

Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9

McArthur, DAJ., & Knowles, N. R. (1993). Influence of Species of Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Phosphorus Nutrition on Growth, Development, and Mineral Nutrition of Potato (Solanum tuberosum L.). *Plant Physiology*, *102*(3), 771–782. https://doi.org/10.1104/pp.102.3.771

Mixquititla-Casbis, G., & Villegas-Torres, Ó. G. (n.d.). *ACTA AGRÍCOLA Y PECUARIA, 2 (3): 55-61 SEPTIEMBRE-DICIEMBRE DE 2016 ARTÍCULO DE REVISIÓN*.

Mora-Quilismal, S. R., Cuaical-Galárraga, E. T., García-Bolívar, J., Revelo-Ruales, V. W., Puetate-Mejía, L. M., Aguila-Alcantara, E., & Ruiz-Sánchez, M. (2021). Biofertilización con bacterias solubilizadoras de fósforo y hongos micorrízicos arbusculares en el cultivo de la papa. *Cultivos Tropicales*, 42.

Nasr Esfahani, M., Koch, L., Hofmann, J., Sonnewald, S., & Sonnewald, U. (2025). Organ-specific transcriptional and metabolic adaptations of potato plants to limited phosphate availability prior and after tuberization. *The Plant Journal*, *123*(5). https://doi.org/10.1111/tpj.70445

Nguyen, T. D., Cavagnaro, T. R., & Watts-Williams, S. J. (2019). The effects of soil phosphorus and zinc availability on plant responses to mycorrhizal fungi: a physiological and molecular assessment. *Scientific Reports*, *9*(1), 14880. https://doi.org/10.1038/s41598-019-51369-5

Nouri, E., Breuillin-Sessoms, F., Feller, U., & Reinhardt, D. (2014). Phosphorus and Nitrogen Regulate Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis in Petunia hybrida. *PLoS ONE*, *9*(3), e90841. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090841

Oladele, S., Gould, I., & Varga, S. (2025). Is arbuscular mycorrhizal fungal addition beneficial to potato systems? A meta-analysis. *Mycorrhiza*, *35*(1), 5. https://doi.org/10.1007/s00572-024-01178-0

.

Parniske, M. (2008a). Arbuscular mycorrhiza: The mother of plant root endosymbioses. In *Nature Reviews Microbiology* (Vol. 6, Number 10, pp. 763–775). https://doi.org/10.1038/nrmicro1987

Parniske, M. (2008b). Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology*, *6*(10), 763–775. https://doi.org/10.1038/nrmicro1987

Pellegrino, E., Bedini, S., Avio, L., Bonari, E., & Giovannetti, M. (2011). Field inoculation effectiveness of native and exotic arbuscular mycorrhizal fungi in a Mediterranean agricultural soil. *Soil Biology and Biochemistry*, *43*(2), 367–376. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.11.002

Pham, Y., Reardon-Smith, K., Mushtaq, S., & Cockfield, G. (2019). The impact of climate change and variability on coffee production: a systematic review. *Climatic Change*, *156*(4), 609–630. https://doi.org/10.1007/s10584-019-02538-y

Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, *55*(1), 158-IN18. https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3

Porter, W. (1979). The “most probable number” method for enumerating infective propagules of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi in soil. *Australian Journal of Soil Research*, *17*(3), 515–519. https://doi.org/10.1071/SR9790515

Pozo, M. J., & Azcón-Aguilar, C. (2007). Unraveling mycorrhiza-induced resistance. *Current Opinion in Plant Biology*, *10*(4), 393–398. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.05.004

Pumplin, N., & Harrison, M. J. (2009). Live-Cell Imaging Reveals Periarbuscular Membrane Domains and Organelle Location in *Medicago truncatula* Roots during Arbuscular

Mycorrhizal Symbiosis . *Plant Physiology*, *151*(2), 809–819. https://doi.org/10.1104/pp.109.141879

Racines, M., Cuesta, X., Montero, B., Cuasapaz, P., Panchi, N., & Benavidez, H. (Eds.). (2023). *Libro de Memorias del X Congreso Ecuatoriano de la Papa*.

Redecker, D., Schüßler, A., Stockinger, H., Stürmer, S. L., Morton, J. B., & Walker, C. (2013). An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza*, *23*(7), 515–531. https://doi.org/10.1007/s00572-013-0486-y

Rutan, J., & Steinke, K. (2026). Potato growth, yield, and quality in response to phosphorus application rates across a range of soil test P concentrations. *European Journal of Agronomy*, *173*, 127917. https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127917

Santander, C. , & A. M. (2022). *Alternativas de biofertilización para el cultivo de la papa (Solanum tuberosum L.) cv. Superchola, con el empleo de microorganismos en el cantón Huaca provincia del Carchi.* UPEC.

Silva-Yumi, J., Cazorla Martínez, R., Medina Serrano, C., & Chango Lescano, G. (2022). Allophane, a natural nanoparticle present in andisols of equatorial Ecuador, properties and applications. *Characterization and Application of Nanomaterials*, *5*(1), 89. https://doi.org/10.24294/can.v5i1.1689

Smith, F. A., & Smith, S. E. (2011). What is the significance of the arbuscular mycorrhizal colonisation of many economically important crop plants? *Plant and Soil*, *348*(1–2), 63–79. https://doi.org/10.1007/s11104-011-0865-0

Smith, S. E. ., & Read, D. J. . (2008). *Mycorrhizal symbiosis*. Academic Press.

.

Smith, S. E., Jakobsen, I., Grønlund, M., & Smith, F. A. (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 Acquisition. *Plant Physiology*, *156*(3), 1050–1057. https://doi.org/10.1104/pp.111.174581

Spooner, D. M., Ghislain, M., Simon, R., Jansky, S. H., & Gavrilenko, T. (2014). Systematics, Diversity, Genetics, and Evolution of Wild and Cultivated Potatoes. *The Botanical Review*, *80*(4), 283–383. https://doi.org/10.1007/s12229-014-9146-y

Struik, P. C. (2007). Above-Ground and Below-Ground Plant Development. In *Potato Biology and Biotechnology* (pp. 219–236). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-044451018-1/50053-1

Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, *157*(3), 423–447. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x

Wang, M., Wang, Z., Guo, M., Qu, L., & Biere, A. (2023). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and herbivore infestation depend on availability of soil water and nutrients. *Frontiers in Plant Science*, *14*. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1101932

Wu, Y., Chen, C., & Wang, G. (2024). Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi improves plant biomass and nitrogen and phosphorus nutrients: a meta-analysis. *BMC Plant Biology*, *24*(1), 960. https://doi.org/10.1186/s12870-024-05638-9

Yaselga Alvarado, E., & Bunce, A. (1978). La relación entre el precio de los fertilizantes y la inflación en el Ecuador. *Revista Cuestiones Económicas*, *33*(2), 37–66. https://doi.org/10.47550/RCE/33.2.2

Yoneyama, K., Xie, X., Kim, H. Il, Kisugi, T., Nomura, T., Sekimoto, H., Yokota, T., & Yoneyama, K. (2012). How do nitrogen and phosphorus deficiencies affect strigolactone production and exudation? *Planta*, *235*(6), 1197–1207. https://doi.org/10.1007/s00425-011-1568-8