



UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA

FRUCTUOSO RODRÍGUEZ PÉREZ

INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE VIANDAS
TROPICALES**

**Factibilidad y beneficios de la inoculación micorrízica arbuscular en la
producción de boniato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.)**

**TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL GRADO CIENTÍFICO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

AUTOR: Ing. Alberto Espinosa Cuéllar, MSc.

Mayabeque, Cuba

-2021-



UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA
FRUCTUOSO RODRÍGUEZ PÉREZ

INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE VIANDAS
TROPICALES

**Factibilidad y beneficios de la inoculación micorrízica arbuscular en la
producción de boniato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.)**

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL GRADO CIENTÍFICO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

AUTOR: Ing. Alberto Espinosa Cuéllar, MSc.

TUTORES: Dr.C. Ramón Antonio Rivera Espinosa

Dr.C. Luís Alberto Ruíz Martínez

Mayabeque, Cuba

"Después de todo, ¿qué es un científico entonces? Es un hombre curioso que mira a través del ojo de una cerradura, la cerradura de la naturaleza, tratando de saber qué es lo que sucede".

Jacques Yves Cousteau

DEDICATORIA

*A mi mamá, por todas sus enseñanzas y por estar segura que llegaría
a esta meta. A toda mi familia*

AGRADECIMIENTOS

Pudiera escribir cientos de nombres a los cuales estaré eternamente agradecido a la hora de culminar esta tesis, pues han sido muchos los que me han impulsado a su realización y han aportado a mi formación personal y profesional.

Un agradecimiento muy grande a mi familia. No mencionare nombres con cuidado a que se quede alguno y todos son importantes. Ustedes siempre estuvieron conmigo apoyándome en mi formación, acompañándome en las horas de trabajo. Los quiero mucho y considero que no los defraude y llegamos a la meta que nos propusimos un día.

A mis tutores, Dr.C. Ramón Antonio Rivera Espinosa y al Dr.C. Luís Alberto Ruíz Martínez, por sus orientaciones, dedicación para lograr esta final tarea y permitirme ser parte de aquellos que estudian el inmenso mundo de las micorrizas.

Al INIVIT y a su colectivo, a mis técnicos que montaron cada uno de los experimentos en cada jornada de trabajo arduo y de evaluaciones.

Al INCA, por acogerme y brindarme las facilidades para mi formación. A mis compañeros de cuarto, a los doctores Jaime E. Simó y Michel Ruíz Sánchez, por todos los consejos en cada momento.

Al colectivo de profesores del INCA por el apoyo brindado.

A los colegas del Departamento de Biofertilizantes y Nutrición de las Plantas por acogerme como uno de ellos.

A todos, muchas gracias

LISTADO DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
CIP	Centro Internacional de la Papa
Col	Frecuencia de colonización micorrízica
ddcp	días después de la cosecha del precedente
DOF	Dosis Óptima de Fertilizantes
EA	Eficiencia agronómica
EP	Efecto de permanencia
Esp	Esporas contadas en 50 gramos de suelo
ES \bar{x}	Error Estándar de la media
FAOSTAT	Food and Agriculture Organization of the United Nations
HMA	Hongos Micorrízicos Arbusculares
IC	Intervalo de Confianza
INCA	Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas
INIFAT	Instituto Nacional de Investigaciones Fundamentales de Agricultura Tropical
INSMET.	Instituto de Meteorología
I-p	Inoculación vía efecto de permanencia del cultivo precedente inoculado
m s.n.m.	metros sobre el nivel del mar
MF	Masa Fresca
MINAG	Ministerio de la Agricultura
NC	Normas Cubanas
ONEI	Oficina Nacional de Estadística e Información
<i>R. irregulare</i>	<i>Rhizoglosum irregulare</i>
Rdto	Rendimiento
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
UEB	Unidades Empresariales de Base
vs	Contra
WRB	<i>World Referente Base</i>

SÍNTESIS

El boniato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] es un cultivo micótrofo, sin embargo no existe una tecnología económica que aproveche los beneficios de la simbiosis micorrízica efectiva. Para tal objetivo se realizaron con dos cultivares comerciales y en las dos épocas de plantación, 18 experimentos en condiciones de campo y dos extensiones sobre suelo Pardo mullido carbonatado. Los cultivares respondieron significativamente en ambas épocas, a la inoculación de la cepa eficiente *Rhizoglyphus irregularis*/INCAM-11. La inoculación garantizó rendimientos altos con menores dosis aplicadas de cada macronutriente, superiores concentraciones de estos en la biomasa y mayores eficiencias de la fertilización. Los efectos de la inoculación se vincularon con el funcionamiento micorrízico del cultivo. La inoculación del boniato vía cultivos precedentes inoculados fue efectiva en las dos épocas, prescindiendo de la “prohibitiva” inoculación al boniato; con el frijol y la vigna fue efectiva hasta un intervalo de 45 días entre cosecha y plantación del boniato y con el maíz de 30 días. Se establecieron índices de exportación y extracción de macronutrientes y los balances de aportes y exportaciones. La validación en extensiones fue satisfactoria. Se propone una tecnología novedosa y eficiente con mejores índices económicos y monitoreando su sostenibilidad con los balances de aportes y exportaciones.

INDICE

Contenido	Pags.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. EL CULTIVO DEL BONIATO.....	5
2.1.1. Origen y distribución.....	5
2.1.2. Ubicación taxonómica.....	6
2.1.3. Importancia y usos del cultivo.....	7
2.1.4. Producción y rendimientos	8
2.2. FERTILIZACIÓN	9
2.3. LOS MACRONUTRIENTES PRIMARIOS EN EL SUELO	10
2.4. LOS HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES (HMA)	11
2.4.1. Caracterización y clasificación de los HMA.....	11
2.4.2. Funcionamiento de las micorrizas	12
2.4.3. Los HMA y los inoculantes micorrízicos en la agricultura.....	13
2.4.4. Los HMA y el suelo	16
2.5. EFECTO DE LOS HMA EN LA NUTRICIÓN VEGETAL	17
2.5.1. Efecto de los HMA en la nutrición nitrogenada.....	18
2.5.2. Efecto de los HMA en la nutrición fosfórica	20
2.5.3. Efecto de los HMA en la nutrición potásica	20
2.6. PERMANENCIA EN EL SISTEMA SUELO-PLANTA, LA EFECTIVIDAD DE LAS ESPECIES DE HMA INOCULADAS...	22
3. MATERIALES Y METODOS	23
3.1. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS	23
3.1.1. Temperatura media y precipitaciones mensuales y anuales	23
3.1.2. Características químicas y físico-químicas del suelo del área experimental.....	23
3.2. GRUPO DE EXPERIMENTOS I. EFECTO DE LA INOCULACIÓN CON LA CEPA <i>RHIZOGLOMUS</i> <i>IRREGULARE</i> /INCAM-11, EN LOS REQUERIMIENTOS DE FERTILIZANTES N, P ₂ O ₅ Y K ₂ O, EN EL CULTIVO DEL BONIATO (<i>IPOMOEA BATATAS</i> (L.)LAM.), EN SUELO PARDO MULLIDO CARBONATADO EN ÉPOCA LLUVIOSA Y POCO LLUVIOSA	24
3.2.1. Experimentos 1 y 2. Efecto de la inoculación con la cepa <i>R. irregular</i> /INCAM-11 en la respuesta y los requerimientos de fertilizante nitrogenado de dos cultivares comerciales de boniato, plantado en suelo Pardo mullido carbonatado tanto en época lluviosa como poco lluviosa	24
3.2.2. Experimentos 3 y 4. Efecto de la inoculación con la cepa <i>R. irregular</i> /INCAM-11 en la respuesta y los requerimientos de fertilizante fosfórico, de dos cultivares de comerciales de boniato, plantado en suelo Pardo mullido carbonatado tanto en época lluviosa como poco lluviosa	25

3.2.3. Experimentos 5 y 6. Efecto de la inoculación con la cepa <i>R. irregular</i> /INCAM-11 en la respuesta y los requerimientos de fertilizante potásico, de dos cultivares comerciales de boniato, plantado en suelo Pardo mullido carbonatado tanto en época lluviosa como poco lluviosa	25
3.3. GRUPO DE EXPERIMENTOS II: UTILIZACIÓN DE CULTIVOS PRECEDENTES INOCULADOS COMO VÍA PARA LOGRAR UNA MICORRIZACIÓN EFICIENTE EN EL CULTIVO DEL BONIATO.....	27
3.3.1. Experimentos del 7 al 18. Manejo de los cultivos precedentes inoculados con la cepa <i>R. irregular</i> /INCAM-11 en la secuencia cultivo precedente–boniato, iniciada tanto en la época lluviosa (experimentos del 7 al 12), como en la época poco lluviosa (experimentos del 13 al 18).....	27
3.4. EVALUACIONES Y METODOLOGÍAS EMPLEADAS.....	30
3.4.1. Toma de muestras de suelo	30
3.4.3. Frecuencia de colonización.....	31
3.4.4. Esporas micorrízicas en 50 gramos de suelo	31
3.4.6. Rendimiento comercial ($t\ ha^{-1}$).....	32
3.4.7. Efecto de permanencia (EP) (%).....	33
3.4.8. Eficiencia agronómica (EA) ($kg\ kg^{-1}$).....	33
3.5. MÉTODOS ESTADÍSTICOS EMPLEADOS.....	33
3.6. EXTENSIONES REALIZADAS	34
3.7. ANÁLISIS ECONÓMICO	36
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1. GRUPO DE EXPERIMENTOS I. EFECTO DE LA INOCULACIÓN CON LA CEPA <i>R. irregular</i> /INCAM-11 EN LOS REQUERIMIENTOS DE FERTILIZANTES N, P_2O_5 Y K_2O EN EL CULTIVO DEL BONIATO (<i>IPOMOEAE BATATAS</i> (L.) LAM.) EN SUELO PARDO MULLIDO CARBONATADO, EN ÉPOCA LLUVIOSA Y POCO LLUVIOSA	37
4.1.1. Experimentos 1 y 2. Efecto de la inoculación con la cepa <i>R. irregular</i> /INCAM-11 en la respuesta y los requerimientos de fertilizante nitrogenado de dos cultivares comerciales de boniato, en época lluviosa (experimento 1) y poco lluviosa (experimento 2).....	37
Experimento 1. Resultados en la época lluviosa.....	37
Experimento 2. Resultados en la época poco lluviosa	41
4.1.2. Experimentos 3 y 4. Efecto de la inoculación con <i>R. irregular</i> /INCAM-11 en la respuesta y los requerimientos de fertilizante fosfórico de dos cultivares comerciales de boniato, en época lluviosa (experimento 3) y poco lluviosa (experimento 4).....	52
Experimento 3. Resultados en la época lluviosa	52
Experimento 4. Resultados en la época poco lluviosa	55
4.1.3. Experimentos 5 y 6. Efecto de la inoculación con <i>R. irregular</i> /INCAM-11 en la respuesta y los requerimientos de fertilizante potásico de dos cultivares comerciales de boniato, en época lluviosa (experimento 5) y poco lluviosa (experimento 6).....	64
Experimento 5. Resultados en la época lluviosa	64
Experimento 6. Resultados en la época poco lluviosa	67

4.2. GRUPO DE EXPERIMENTOS II: UTILIZACIÓN DE CULTIVOS PRECEDENTES INOCULADOS COMO VÍA PARA LOGRAR UNA MICORRIZACIÓN EFICIENTE EN EL CULTIVO DEL BONIATO	76
4.2.1. <i>Experimentos del 7 al 12. Cultivos precedentes en época lluviosa y cultivo principal en época poco lluviosa</i>	76
4.2.2 <i>Experimentos del 13 al 18. Cultivos precedentes en la época poco lluviosa y cultivo principal en la época lluviosa</i>	78
4.3 <i>Extracciones y exportaciones</i>	87
4.4. RESULTADO DE LAS EXTENSIONES	92
4.5. VALORACIÓN ECONÓMICA.....	94
4.6. CONSIDERACIONES GENERALES	94
5. CONCLUSIONES	99
6. RECOMENDACIONES.....	100
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

1. INTRODUCCIÓN

El boniato es el sexto cultivo alimenticio de mayor importancia en el mundo, con una producción global de 112,8 Mt y un área cosechada de 9,2 Mha. Se considera un cultivo necesario en los países en vías de desarrollo, donde ocupa el quinto lugar en lo referente a cultivos económicamente viables. Aproximadamente el 80 % del boniato del mundo se cultiva en Asia, un 15 % en África y sólo un 5 % en el resto del mundo (FAOSTAT, 2017).

Es un cultivo idóneo para los esquemas de seguridad alimentaria, ya que puede cosecharse en un ciclo corto y proporciona cantidades importantes de carbohidratos, minerales y β -carotenos (precursores de la vitamina A). Además, su capacidad de adaptación climática y respuesta eficaz ante fenómenos meteorológicos, su versatilidad y propagación, lo sitúan por encima de otros cultivos de mayor producción (Morales, 2014).

En Cuba se plantaron un poco más de 110 000 ha en el año 2017, aunque alcanzando rendimientos bajos de $9,93 \text{ t ha}^{-1}$ (ONEI, 2018), en relación a los de 30 a 40 t ha^{-1} que se reportan en condiciones experimentales (Ruíz *et al.*, 2012). Este cultivo requiere de altas cantidades nutrientes en dependencia del rendimiento, tipo de suelo y su nivel de fertilidad. En Cuba éstas cantidades de nutrientes comúnmente se garantizaban a partir de aplicar fertilizantes minerales en dosis de 90, 75 y 150 kg ha^{-1} de N, P_2O_5 y K_2O , respectivamente (MINAG, 2012a). Debido a la difícil situación económica del país, en estos últimos años, no ha sido posible que se fertilicen más del 30 % de las áreas plantadas, lo cual en unión a la baja calidad de la "semilla", han influido en los bajos rendimientos; sin embargo, se requiere incrementar éstos como vía para satisfacer la producción de alimentos y lograr un uso más eficiente de los recursos disponibles.

Así se hace necesario diseñar tecnologías de producción más eficientes y con un mayor aprovechamiento de los nutrientes en el sistema suelo-planta. En los últimos años se

reconoce el potencial de diferentes microorganismos para incrementar la accesibilidad a los nutrientes a través de aportes, aumentos en disponibilidad o acrecentar la capacidad para su absorción (Arora *et al.*, 2016; Le Mire *et al.*, 2016). Entre estos se destacan los Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA), los que establecen una simbiosis mutuamente beneficiosa con la casi totalidad de los cultivos económicos (van der Heidjen *et al.*, 2015), originando beneficios asociados con la nutrición de las plantas, con la toma de agua, disminución del daño por fitopatógenos, mejoras en la estructura del suelo, participación en el ciclo del N, entre otros ecoservicios (Rillig *et al.*, 2018).

A partir de la última década del pasado siglo, se iniciaron en Cuba un número amplio de investigaciones que han permitido establecer las bases para la integración de los inoculantes micorrízicos, en los sistemas de suministro de nutrientes y en las tecnologías de diversos cultivos (Rivera y Fernández, 2003, Rivera *et al.*, 2020), alcanzando rendimientos altos y una disminución de los requerimientos de fertilizantes minerales y orgánicos, en función de los cultivos y la disponibilidad de los nutrientes en el suelo.

Ruíz (2001), informó resultados específicos en el cultivo del boniato, utilizando un esquema de evaluación de porcentajes de la fórmula completa que, si bien fue útil, no garantizó el manejo diferenciado de los macronutrientes. Además, el método de inoculación utilizado de 20 g planta⁻¹ (Sieverding, 1991), por las altas cantidades de inoculante utilizadas, no permitió la recomendación de los resultados.

Si bien el boniato es un cultivo con alta dependencia micorrízica (Sieverding, 1991), las características del material de propagación hacen que aún utilizando el recubrimiento del tercio inferior de los esquejes (Ruíz *et al.*, 2012), se utilicen cantidades muy altas de inoculante (35 kg ha⁻¹). Si se tiene en cuenta que la inoculación del maíz y el frijol solo requieren de 2 y 4 kg ha⁻¹ de inoculante, respectivamente, y que la producción del

inoculante no satisface la alta demanda potencial que existente en el país (Gómez, 2019), entonces, será imprescindible desarrollar nuevas y eficaces vías de aplicación, si se pretenden utilizar los beneficios de la micorrización efectiva en este cultivo.

La utilización en los inoculantes micorrízicos de cepas generalistas y su aplicación en las condiciones edáficas en que resultan eficientes (Rivera *et al.*, 2020), fundamenta la existencia del positivo efecto de permanencia del inoculante aplicado sobre el primer cultivo en sucesión (Ruíz, 2001; Riera, 2003; Marrero *et al.*, 2008); no obstante los resultados alcanzados, en dichos trabajos, indicaron que el efecto varió con los cultivos precedentes, así como desaparece paulatinamente durante el desarrollo de la secuencia.

Por tanto, el trabajo de tesis se enfrenta al siguiente **Problema:** ¿Cómo lograr aprovechar los beneficios de un funcionamiento micorrízico efectivo en la tecnología de producción del boniato, que garantice altos rendimientos con un uso más eficiente de los fertilizantes e inoculantes?

A partir de esta situación se propone la siguiente **Hipótesis:**

La micorrización del boniato vía precedentes inoculados con una cepa eficiente de HMA, logra un funcionamiento micorrízico efectivo en este cultivo, con efectos directos en la nutrición de los tres macronutrientes primarios, garantizando altos rendimientos y esquemas de fertilización más eficientes para cada macronutriente.

Para dar respuesta a esta hipótesis, se trazaron los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Establecer las bases para una tecnología de producción de *Ipomoea batatas* (L.) Lam. basada en el manejo efectivo de la simbiosis micorrízica arbuscular, utilizando cultivos precedentes inoculados con cepas eficientes de HMA.

Objetivos específicos:

1. Determinar los esquemas de suministro de nutrientes (N, P, K) para plantaciones de boniato inoculadas con una cepa eficiente de HMA, que garanticen un funcionamiento micorrízico satisfactorio y permitan rendimientos altos, un estado nutricional adecuado y un mejor aprovechamiento de cada uno de los macronutrientes aplicados.
2. Establecer el manejo de cultivos precedentes inoculados con la cepa eficiente de HMA, como vía para garantizar una micorrización efectiva y factible en el boniato.
3. Validar a escala productiva una tecnología de producción para el cultivo del boniato, basada en el funcionamiento efectivo de la simbiosis micorrízica arbuscular, que permita rendimientos altos, mayor eficiencia y aprovechamiento de los insumos e indicadores económicos satisfactorios.

Novedad científica

Se establecen las bases para la utilización efectiva de los inoculantes micorrízicos en la tecnología de producción de *Ipomoea batatas* (L.) Lam., a través de cultivos precedentes inoculados y un manejo diferenciado de los macronutrientes aplicados.

Se demuestra para *Ipomoea batatas* (L.) Lam. que el funcionamiento micorrízico es resultante de la aplicación de la cepa eficiente, de la disponibilidad de los macronutrientes primarios en el sistema suelo-planta y de las necesidades del cultivo.

Aporte práctico

Se establece una tecnología de producción de boniato basada en el funcionamiento micorrízico efectivo que se alcanza a través de utilizar cultivos precedentes inoculados y menores cantidades de fertilizantes, garantizando rendimientos altos, un uso más eficiente de los fertilizantes, mejores indicadores económicos y que no requiere de las aplicaciones de inoculantes micorrizicos al boniato. Esta tecnología permite aprovechar los beneficios de la micorrización eficiente a escala productiva en este cultivo.

REVISIÓN
BIBLIOGRÁFICA

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. El cultivo del boniato

2.1.1. Origen y distribución

El boniato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.), también conocido como camote, batata, *sweet potato* o papa dulce; es originario del continente americano, algunos lo sitúan en América del Sur y otros en América Central y Las Antillas (Rodríguez *et al.*, 2003).

Los restos más antiguos de boniato (raíz tuberosa) corresponden a la época Neolítica. Descubiertos en cuevas (Tres Ventanas) del cañón de Chilca, en la zona sur-central de Perú (Engel, 1970). En aquel entonces no estaba claro si este espécimen pertenecía a una especie silvestre o domesticada de la planta, hasta que Perry (2002) por un análisis de los gránulos de almidón demostró que eran definitivamente de la especie *Ipomoea batatas*.

Vavilov (1928) estimó que el boniato se originó en la región comprendida entre el sur de México, Guatemala, Honduras, hasta Costa Rica. Bronson (1966) señaló a las tierras bajas de Mesoamérica como el posible centro de origen y de su diversidad genética, debido a la variabilidad reportada allí. Nishiyama (1971) teniendo en cuenta las colectas realizadas de especies del género *Ipomoea*, postuló que la zona desde el Océano Pacífico, hasta el Golfo de México, a unos 17-20° latitud Norte, parecía ser uno de los lugares más probables de origen de *Ipomoea trifida* (Kunth) G. Don e *Ipomoea batatas*. O'Brien (1972) refirió que el boniato se originó en algún lugar de América Central o el noroeste de América del Sur, alrededor de 3000 a.n.e. Austin (1988) teniendo en cuenta la taxonomía, ecología, citología, híbridos, diversidad genética y especies silvestres de *Ipomoea spp*, señaló que *Ipomoea trifida* e *Ipomoea triloba* L. son las dos especies más cercanas al boniato y sus ancestros comunes provienen juntos de un área desconocida entre la península de Yucatán, en México y la desembocadura del Río Orinoco, en Venezuela, siendo esta la región que señaló en su hipótesis sobre el origen del

boniato (Morales *et al.*, 2017).

Los navegantes españoles lo llevaron a Filipinas. En 1594 los marineros de Fujian llevaron las raíces tuberosas de la isla de Luzón, en Filipinas, a Fujian en el Sur de China, también a Taiwán y a la isla japonesa Okinawa en 1674 (Zhang *et al.*, 2009; Jia, 2013). El boniato es una de las raíces tuberosas de más antigua domesticación, se cultiva ampliamente en muchos países, especialmente en China y en otros del Sudeste Asiático (An *et al.*, 2003).

2.1.2. Ubicación taxonómica

Linnaeus (1737) describe la especie batata y le asigna su nomenclatura binomial, designándola como: *Convolvulus batatas* L. En 1791 Lamark teniendo en cuenta la morfología del estigma y granos de polen (genero *Ipomoea*: estigmas capitados y granos de polen generalmente espinosos) cambia el género de *Convolvulus* a *Ipomoea* y designa definitivamente a esta especie como *Ipomoea batatas* (L.) Lam (Montaldo, 1991; Huamán, 1999). La clasificación sistemática de la batata según Austin y Huamán, (1996) es la siguiente:

Familia: Convolvulaceae

Tribu: *Ipomoea* L.

Género: *Ipomoea* L.

Subgénero: *Eriospermum* (Hallier f.)

Sección: *Eriospermum* (Hallier f.)

Serie: *Batatas* (Choisy)

Especie: *Ipomoea batatas* (L.) Lam.

Convolvulaceae es una familia que abarca unas 2 000 especies y 58 géneros distribuidos por todo el mundo, principalmente en el trópico, y subtrópico (Staples y Yang, 1998; Staples, 2011). Más de un tercio de las especies, se incluyen en dos géneros principales, *Ipomea* y *Convolvulus* (Carlquist, 1988). El género *Ipomoea* Linnaeus representa 600-700 especies

distribuidas en el mundo, aunque más de la mitad de ellas están concentradas en las Américas (Austin y Huamán, 1996; Mabberley, 1997). Dentro de la Serie *Batatas* hay 13 especies silvestres que se consideran estrechamente relacionadas con *Ipomoea batata* (Austin, 1978; 1979).

2.1.3. Importancia y usos del cultivo

El boniato se utiliza ampliamente en la alimentación humana y del ganado, y como materia prima en la industria de la pastelería y repostería, incluso para la obtención de bebidas alcohólicas, dada su riqueza en sustancias amiláceas y azucaradas. Es un cultivo interesante por sus escasas exigencias al tipo de suelo, y por la posibilidad de alcanzar buenos rendimientos, en terrenos de mediana calidad o poco preparados (Rosset y Bourque, 2001).

La parte de interés para la alimentación humana son las raíces tuberosas, las cuales presentan la masa interna de color blanco, amarillo, anaranjado y morado según el cultivar, pero en común todas aportan un alto valor nutricional (antocianinas, proteína hasta 10%, vitamina A, E, C y ácido fólico, sales minerales como el calcio, el hierro y el fósforo) y energético (carbohidratos solubles e insolubles: 30-70 %). Las propiedades nutricionales resultan comparables a los tubérculos de la papa (*Solanum tuberosum* L.) y otras raíces tuberosas (Sangronis *et al.*, 2006; Montes *et al.*, 2010; Martí *et al.*, 2011).

Según Rodríguez (2001) es uno de los cultivos alimenticios más importantes, versátiles y subexplotados del mundo y la importancia como alimento viene dada por su valor energético, ya que los carbohidratos, en la raíz tuberosa, representan generalmente entre el 80 % y 90 % de su peso seco, en lo fundamental en forma de almidón. Tiene un enorme potencial como proveedor de energía, vitaminas, fibra y minerales, pero también por sus propiedades funcionales en la prevención de enfermedades.

Con el creciente interés del público por consumir productos naturales beneficiosos para la

salud, resulta un alimento atractivo (Martí *et al.*, 2011). Combina características de los cereales, en cuanto a su aporte de energía, y de otras frutas y hortalizas, por su contenido en fibra, vitaminas, minerales y otros compuestos benéficos para la salud como los antioxidantes (Martí, 2012).

En Cuba, el boniato se encuentra entre los dos cultivos alimenticios más importantes de las raíces y los tubérculos de la dieta tradicional, junto con la yuca (*Manihot esculenta* Crantz), con la cual comparte además, magnitudes similares de superficie plantada y volúmenes de producción (Morales, 2014).

2.1.4. Producción y rendimientos

Los únicos países que procesan de forma industrial cantidades apreciables de boniato son Japón (1,15 millones t) y Estados Unidos de América (604 000 t). América Latina produce 1,85 millones de toneladas (CIP, 2017). A nivel mundial los niveles de producción están en retroceso, salvo casos excepcionales como China y Nueva Zelanda, en donde la producción ha se incrementado, mientras que la población mundial se ha casi duplicado en los últimos 40 años (Kays, 2006).

El boniato se cultiva en todas las regiones de Cuba y ocupa un área de 110 079 ha anuales, de las cuales alrededor del 70 % se plantan en la época lluviosa (mayo-octubre) y el resto en la época poco lluviosa (noviembre-abril), en esta última, debe disponerse de riego para su plantación y desarrollo en las diferentes etapas del cultivo. La media nacional para el rendimiento registrados oficialmente son bajos con 9,93 t ha⁻¹ (ONEI, 2018), en comparación con otros países como China, con un rendimiento promedio de 21,3 t ha⁻¹ (FAOSTAT, 2017). Esta respuesta productiva inferior se atribuye a diversas razones que incluyen la escasa disponibilidad de riego y fertilizantes, las indisciplinas tecnológicas, los daños causados por el tétan del boniato (*Cylas formicarius* Fabricius) y a la mala calidad de la “semilla” empleada

en las áreas de producción destinadas al cultivo (Rodríguez, 2010).

2.2. Fertilización

Para favorecer un incremento en los rendimientos se requiere un volumen de nutrientes, de acuerdo con el cultivar y el tipo de suelo (Ekanayake *et al.*, 2004). La dosis de fertilizante depende de la fertilidad del suelo, se hace necesario un análisis previo del mismo y de una estimación del rendimiento esperado, según el volumen a producir por unidad de superficie (Villa, 2007).

La aplicación de fertilizantes debe realizarse antes del cierre de campo para incrementar el aprovechamiento de los nutrientes, pues en esa etapa la planta cuenta con un sistema radical que le permite asimilarlo, con lo cual se reducen las pérdidas por volatilización y lixiviación. Otro factor práctico, es que la fertilización trae consigo mayor competencia con las plantas arvenses y por tanto mayor número de labores para su control. Este aspecto desfavorable puede incidir sobre el porcentaje de población por unidad de superficie y por tanto en los rendimientos, por lo cual se plantea, aplicarlo en bandas a ambos lados de la planta y tapado, entre los 20 y 30 días después de la plantación (MINAG, 2012a).

Las cantidades de nutrimentos extraídos por el cultivo del boniato, considerando una producción de 25 t ha^{-1} son muy variables para la parte aérea y las raíces tuberosas. Los valores promedios se ubican entre $62,8 \text{ kg ha}^{-1}$; $39,3 \text{ kg ha}^{-1}$ y $128,8 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, P_2O_5 y K_2O respectivamente. Los requerimientos de fósforo son menores cuantitativamente a las dosis de potasio y nitrógeno, primero, incide aumentando el peso promedio y el número de raíces tuberosas (López, 1980; Ruíz *et al.*, 1987; Ruíz *et al.*, 2012).

Berstch (2003) reportó específicamente para el boniato y para rendimientos de 33 t ha^{-1} , extracciones totales entre 157 a 175 kg ha^{-1} de N; $9,6$ a $13,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de P 187 a 243 kg ha^{-1} de K. En relación con la exportación de los macronutrientes primarios este autor refiere valores de

82 a 90, de 7,4 a 7,9 y de 131 a 149 kg ha⁻¹ de N, P y K, respectivamente con índices de exportación por cada tonelada de raíces tuberosas producidas de 2,5 a 2,7, de 0,22 a 0,24 y de 4 a 4,5 kg para el N, P y K, respectivamente.

Ruíz (2001) en una recopilación sobre estos índices para el boniato en condiciones de Cuba, reportó índices de exportación de 1,74; 0,42 y 2,66 kg t⁻¹ de N, P y K, respectivamente, para alcanzar rendimientos de 35 t ha⁻¹.

2.3. Los macronutrientes primarios en el suelo

La mayor cantidad de nitrógeno en los suelos se encuentra en forma orgánica, aproximadamente el 98 %. El N de la materia orgánica (MO) proviene de la atmósfera, vía plantas y microorganismos que al ser descompuestos han dejado compuestos orgánicos resistentes y semirresistentes en el suelo durante su desarrollo. La mineralización del N orgánico en el suelo, es el proceso microbiano por el cual las formas orgánicas de N presentes en los suelos son convertidas a formas inorgánicas (NH₄⁺, NO₃⁻ y NO). En suelos bien drenados, alrededor del 2 % del N orgánico es anualmente mineralizado. A modo de ejemplo, en suelos que contienen de 0,05 a 0,10 % de N y considerando la capa superficial de 20 cm de espesor, la mineralización libera en formas inorgánicas una cantidad de 25 a 50 kg ha⁻¹ de nitrógeno (Barber, 1995).

A su vez la fuente original de fósforo es el material originario, constituido por rocas fosfatadas como: (apatita, fluorapatita, vivianita, etc). Constituyendo aproximadamente el 0,12 % de la corteza terrestre. El P liberado de los suelos a través de la descomposición de minerales primarios y de residuos vegetales, se combina primariamente con la fracción arcilla. Como resultado esta fracción se ve enriquecida en P, en relación a suelos de textura más gruesa (Syers *et al.*, 2008).

El P se presenta en el suelo casi exclusivamente como ortofosfato y todos los compuestos son

derivados del ácido fosfórico (H_3PO_4). Los fosfatos del suelo provienen de compuestos orgánicos e inorgánicos. En los compuestos inorgánicos los iones hidrógeno del ácido fosfórico, se reemplazan por cationes formando sales (García *et al.*, 2005).

Otro macronutriente primario es el K, el que está presente en los suelos en cantidades de aproximadamente 1,9 %. En general, el K no causa problemas de tipo ambiental cuando sale del sistema suelo, no siendo tóxico y no causa eutrofización en sistemas acuáticos (Barber, 1995).

Los minerales primarios más importantes que contienen K son: feldespatos potásicos (ortoclasa y microclina), con más del 14 %; moscovita y biotita, las cuales tienen en su composición alrededor de un 10 % del elemento. En cuanto a su presencia en los minerales secundarios se lo encuentra en illitas, vermiculitas y cloritas (Kafkafi *et al.*, 2001).

2.4. Los Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA)

2.4.1. Caracterización y clasificación de los HMA

Los hongos micorrizógenos son hongos edáficos, simbioses universales al establecer una asociación mutuamente beneficiosa con el 95 % de las especies vegetales (van der Heidjen *et al.*, 2015). Esta asociación se denomina micorrizas y entre sus beneficios se encuentran entre otros, incrementar la absorción de nutrientes y agua por las plantas y a la vez las plantas le suministran fuentes de C. Las micorrizas surgieron como una solución de la naturaleza y permitieron el desarrollo de las plantas tal y como las conocemos hoy (Hamel y Plenchette, 2017). Según informaron Aguilera *et al.* (2007) y Santos (2014), en la naturaleza existen tres tipos fundamentales de micorrizas, las cuales se dividen según su estructura en: Ectomicorrizas o formadoras de manto; Ectendomicorrizas, que incluye Arbutoides y Monotropoides, y las Endomicorrizas o micorrizas arbusculares, estas últimas vinculadas a los hongos micorrízicos arbusculares (HMA).

Estos hongos son componentes de la comunidad microbiana del suelo, pertenecientes a la división *Glomeromycota* (Schüßler y Walker, 2011; Redecker *et al.*, 2013; Sieverding *et al.*, 2014), los cuales según (Guerra, 2008), se encuentran distribuidos en la mayoría de los ecosistemas terrestres, desde forestales hasta los desérticos, representando la más amplia asociación entre plantas y hongos encontrada en la naturaleza, la cual incluye aproximadamente el 85 % de las especies vegetales, entre las que se encuentran la casi totalidad de las especies de interés económico (Parniske, 2008 ; Fernández, 2012).

Se les considera los componentes más activos de los órganos de absorción de los nutrientes de la planta, la que a su vez provee al hongo simbiote de fuentes de Carbono orgánicos y de un nicho protector (Corredor, 2008). En la simbiosis, los hongos se benefician con un suministro externo de fuentes carbonadas y la planta, gracias a las hifas o micelio extrarradical asociados a sus raíces, incrementa su capacidad de absorción de agua y nutrientes. Una mayor exploración del suelo, promueve un mayor crecimiento y desarrollo de la planta (Sánchez *et al.*, 2009; Willys *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2014).

2.4.2. Funcionamiento de las micorrizas

El proceso de colonización por el hongo comienza por la germinación de las esporas. A continuación y gracias a un proceso de señalización e identificación de los simbioses, se forman apresorios en el tubo germinativo y la hifa penetra la superficie radical, colonizando inicialmente el espacio intercelular del córtex de la raíz. Posteriormente la hifa penetra las paredes celulares sin invadir el citoplasma y desarrollan dentro de las células estructuras denominadas arbuscúlos y formadas mediante repetidas ramificaciones dicótomicas de estas hifas (Bago *et al.*, 2000). Los arbuscúlos, son invaginados por la membrana plasmática de las células corticales, presentando periodos de vida cortos y son la estructura clave de la micorriza arbuscular (Baker *et al.*, 1998; Barker y Tagu 2000). En algunos casos, se forman vesículas

ricas en lípidos, que son órganos de almacenamiento intercelulares. Asimismo, se forma el micelio externo compuesto por hifas que colonizan la rizosfera y finalmente se forman esporas extraradicales que junto con las hifas infectivas pueden comenzar otro proceso de colonización. Las hifas externas pueden ser de tres tipos según su morfología y las funciones que llevan a cabo. Las hifas infectivas, son las que inician los puntos de colonización en una o varias raíces; las hifas absorbentes son las que se encargan de explorar el suelo para la absorción de nutrientes y las hifas fértiles son las que llevan las esporas (Baker *et al.*, 1998; Cavagnaro *et al.*, 2004; Peterson *et al.*, 2004).

Una de las principales funciones de los HMA, es extender la superficie de absorción de las raíces en el suelo a través de sus hifas externas, lo cual estimula que las plantas micorrizadas incrementen la captación de nutrientes minerales (Smith y Read, 2008), y elementos poco móviles en el suelo como cobre, zinc, así como la absorción de agua (Camargo-Ricalde *et al.*, 2012). Los HMA son parte integral de numerosos ecosistemas y si bien se consideran particularmente ventajosos para las plantas (Guerra, 2008) al incrementar capacidad de absorción de nutrientes y agua, disminuir el daño de patógenos y de metales contaminantes presentes en el suelo y establecer relaciones de cooperación con microorganismos rizosféricos, también influyen en el suelo al incrementar número de agregados y participar en los ciclos del C y N (Gianinazzi *et al.*, 2010; van der Heidjen *et al.*, 2015; Lehman *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018).

2.4.3. Los HMA y los inoculantes micorrízicos en la agricultura

La simbiosis que se establece entre hongos micorrízicos arbusculares y las plantas ha sido esencial para el desarrollo de las plantas, ya que ha permitido la adaptación y evolución de estas (Hamel y Plenchette, 2017). Un funcionamiento micorrízico efectivo se asocia con mayor capacidad de absorción de nutrientes que se encuentran en el suelo (Sanchez de Prager, 2007),

mayor toma de agua y tolerancia al estrés hídrico (Ruíz-Lozano *et al.*, 2012), reducción del daño provocado por patógenos y nemátodos (Berbara *et al.*, 2006; Pozo y Azcón, 2007), mayor vigor y sanidad en general (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 1999), mayor tasa de sobrevivencia y crecimiento pos-trasplante (Saggin-Junior y Siqueira, 1996), además de la contribución a la restauración ecológica, preservación y manutención de especies vegetales en extinción (Matos *et al.*, 1999), así como a la formación de agregados estables en el suelo (Torres *et al.*, 2013; Lehman *et al.*, 2017).

Dentro de los HMA, las especies de la familia *Glomeraceae* tienen un amplio rango de distribución, con predominio en ecosistemas de baja y media fertilidad, donde resultan extremadamente eficientes y competitivas. No obstante, los resultados obtenidos en Cuba han permitido recomendar la inoculación de cepas eficientes pertenecientes a esta familia y de carácter generalistas con las especies vegetales, para un grupo muy amplio de cultivos en diferentes tipos de suelos, en rangos entre baja a alta fertilidad (Rivera *et al.*, 2015a).

La potencialidad del uso de los HMA en los sistemas de producción agrícola es un hecho planteado por numerosos científicos a escala internacional; no obstante, todavía se está muy lejos de aprovechar este potencial en la agricultura (Hamel y Plenchette, 2017; Rillig *et al.*, 2018).

Estos hongos también protegen a las plantas y las hacen más resistentes al ataque de algunos patógenos, así como a los cambios de temperatura y la acidificación del suelo, derivada de la presencia de azufre y aluminio. Por otro lado, las reacciones fisiológicas del hongo inducen a la raíz a mantenerse activa durante más tiempo que si no estuviese micorrizada y se reportan además incrementos en los agregados de los suelos (Rillig y Mummey, 2006; Miller y Jastrow, 2000; Pozo y Azcón, 2007; Marschner, 2012).

Como normalmente el aprovechamiento de las cantidades de fertilizantes minerales aplicados no es mayor del 50 %, en presencia de una micorrización efectiva la planta puede recuperar un porcentaje mayor. Mientras que un pelo radical puede poner a disposición de las raíces los nutrientes y el agua que se encuentra hasta 2 mm de la epidermis, de un cm de pelo absorbente se pueden lograr hasta 100 cm de hifas del micelio extramático de los HMA lo que representa para la misma raicilla la posibilidad de explorar un volumen de suelo hasta 40 -50 veces mayor (Ruíz, 2001).

Uno de los aspectos que ha limitado la utilización de los productos micorrízicos en los sistemas de producción agrícola está relacionado con las grandes cantidades de inóculos a aplicar en una hectárea (Sieverding 1991; Verbruggen *et al.*, 2012), aunque esta situación ha mejorado con el uso de productos que se aplican vía recubrimiento de las semillas (Fernández *et al.*, 2000), aunque aún no son ampliamente reconocidos ni utilizados.

A partir de los años 90 en Cuba, se comenzaron a ejecutar varios grupos de experimentos que permitieron establecer las bases para el manejo de las asociaciones micorrízicas partiendo de tres presupuestos principales: la inoculación de cepas eficientes de HMA, la importancia del ambiente edáfico en su eficiencia y la influencia del suministro de nutrientes sobre la efectividad de la simbiosis (Rivera y Fernández, 2003).

El sistema de inoculación y manejo cultural de los HMA constituyen tecnologías ecológicamente racionales y aparecen como prácticas de base biológica promisorias para la producción agraria (Rivera y Fernández, 2003; Aguirre *et al.*, 2009; Barrer, 2009; Ruíz *et al.*, 2010; González *et al.*, 2011; Pérez *et al.*, 2011; Ruíz *et al.*, 2012; Rivera *et al.*, 2017).

Se puede decir que a nivel del agroecosistema existen diferentes factores que determinan la efectividad de la inoculación, con una especie eficiente de HMA, de un cultivo dependiente de la micorrización. Entre ellos se encuentran: el suministro y/o disponibilidad de nutrientes

(Siqueira y Franco, 1988; Ruíz, 2001; Rivera y Fernández, 2003; Smith y Smith, 2011), la cantidad y tipo de propágulos residentes y la competitividad de la especie eficiente de HMA aplicada (Martín *et al.*, 2009; González *et al.*, 2011; Rivera *et al.*, 2018).

En Cuba se dispone tanto de productos que se aplican en bajas dosis (Rivera y Fernández, 2006), como de una amplia información experimental para el manejo efectivo de las cepas inoculadas de HMA en muchos cultivos, ambientes edáficos e integrados con las prácticas culturales (Rivera *et al.*, 2007; González *et al.*, 2008; Martín *et al.*, 2012) y validados a escala productiva en cultivos como frijol, yuca, especies de pastos, entre otros (Rivera *et al.*, 2007; Rivera *et al.*, 2012; Rivera *et al.*, 2020).

Los estudios realizados con un amplio grupo de cultivos dependientes de la micorrización, permitieron definir que existió para cada suelo, al menos, una cepa altamente eficiente, con la cual se obtuvieron las mejores respuestas en todos los cultivos. Se observó una alta especificidad suelo-cepa eficiente, de modo que su comportamiento estuvo estrechamente relacionado con el tipo de suelo y presumiblemente, con su fertilidad asociada (Rivera *et al.*, 2015a). A su vez las cepas estudiadas resultaron generalistas con las especies vegetales a lo cual inicialmente se le denominó baja especificidad cepa eficiente-cultivo (Rivera y Fernández, 2003). En algunos cultivos se presentó además una compatibilidad cepa-cultivo pero que no impide el criterio de recomendación de cepas eficientes para cada condición edáfica. Con posterioridad, se precisó que más importante que el tipo de suelo, es el ambiente edáfico en que se desarrolla el cultivo micorrizado. Y entre las propiedades del suelo, parece ser que el pH desempeña un rol determinante en variar la efectividad de las cepas inoculadas y con ello la recomendación de estas (Rivera *et al.*, 2015b).

2.4.4. Los HMA y el suelo

Los HMA influyen en la estabilización del suelo, la productividad, diversidad y sustentabilidad

en diferentes ecosistemas (van der Heijden *et al.*, 1998). El efecto positivo de los HMA se puede observar en la planta hospedera, al incrementarse su adecuación (reproducción y supervivencia) y producción de biomasa (Fisher y Jayachandran, 2002), lo cual conlleva a mayor crecimiento radical y C exudado en la rizosfera (van de Heijden *et al.*, 2015) incrementando la actividad microbiológica en la rizosfera o hifosfera.

Los HMA proporcionan diversos beneficios al ecosistema mejorando la calidad física, química y biológica del suelo (Berbara *et al.*, 2006), que pueden influenciar directa o indirectamente a las plantas. Los HMA se consideran los mayores agentes biológicos de la estructura del suelo (Morell *et al.*, 2009; Caruso y Rillig, 2011; Vasconcellos *et al.*, 2013), y promotores de la formación y estabilidad de los agregados del suelo (Wilson *et al.*, 2009; Peng *et al.*, 2011; Siddiky *et al.*, 2012) entre otros por la producción de una glicoproteína llamada glomalina, la cual por sus características químicas favorece la agregación de las partículas de suelo (Rillig, 2004).

La estructura del suelo determina su calidad y fertilidad, a su vez favorece el establecimiento de las plantas cuando se utilizan los HMA (Caravaca *et al.*, 2006). Los HMA producen aumentos en la estabilidad de los agregados (Rillig, 2004; O'Dea, 2007) y son más eficaces al combinarse con abonos verdes (Bearden y Petersen, 2000; Caravaca *et al.*, 2006). También los HMA son indicadores de la actividad microbiana del suelo y el reactivamiento de las poblaciones microbianas, depende de la inoculación micorrízica de cada área (Caravaca *et al.*, 2006).

2.5. Efecto de los HMA en la nutrición vegetal

El beneficio reportado por el uso de las asociaciones micorrízicas arbusculares en el crecimiento de las plantas resulta interesante, de manera particular en suelos tropicales, deficientes en fósforo (P) asimilable y en donde el potencial de explotación de los HMA es mucho mayor que en regiones de clima templado (Sieverding, 1991).

La inoculación de las plantas con hongos micorrizógenos provoca de manera general un

marcado incremento en los procesos de absorción y translocación de nutrientes tales como: P, N, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Mo, B (Sieverding (1991); Marschner (1994); Cavagnaro, 2008; Prado, 2008; Cardoso *et al.*, 2010; Marschner, 2012; Stürmer y Siqueira, 2013; Lehmann *et al.*, 2014); Yang *et al.*, 2014). Se ha demostrado el efecto directo de la micorrización en la toma de hierro, manganeso, cloro, magnesio y microelementos como zinc, azufre, boro y molibdeno (Duchicela, 2003). Si bien los elementos sodio, cobalto y el silicio, no son esenciales en el crecimiento de todas las especies de plantas, su aumento en algunos casos se relaciona con la actividad de las micorrizas.

Se ha de tener en cuenta que estas asociaciones son un factor importante para el incremento de las posibilidades de las plantas en países tropicales, en conformidad con lo citado por Black (1980):

- Los bajos niveles de P asimilable o la alta capacidad de fijación de este elemento en suelo.
- La creciente dificultad de producir fertilizantes fosfóricos solubles, debido a la escasez de los yacimientos, así como su alto costo de producción y precio público.
- El hábito micotrófico vesículo-arbuscular de la mayoría de las especies de interés económico en los trópicos.

Los beneficios por la inoculación micorrízica son diversos y puede ser resultado de varios mecanismos como: aumento de la superficie de exploración del suelo, elevación de la capacidad absorbente de las raíces, toma de nutrientes no accesibles a las raíces no micorrizadas, beneficio de otros microorganismos en la rizosfera, amortiguación de los efectos adversos del pH del suelo, metales pesados, salinidad, estrés hídrico y ataque de patógenos (Entry *et al.*, 2002; Bucher, 2007; Netto, 2008).

2.5.1. Efecto de los HMA en la nutrición nitrogenada

El nitrógeno (N) es un macronutriente que influye en el crecimiento vegetal, en la producción

de biomasa y su desarrollo, tiene un alto impacto en el rendimiento de la planta y su fisiología vegetal (Kraiser *et al.*, 2011; Álvarez *et al.*, 2012). El uso agrícola mundial de fertilizantes nitrogenados en 2016 fue de más de 109 millones de toneladas y ya se preveía un incremento para los próximos años (FAOSTAT, 2017). La gestión inadecuada y la aplicación excesiva de fertilizantes con N, ha llevado a una limitación de la eficiencia en su uso y en el rendimiento de los cultivos (Zhang *et al.*, 2015).

Las plantas micorrizadas absorben los iones amonio (NH_4^+) en forma de glutamina, a partir del complejo enzimático de la glutamina-sintetasa (GS), transformados en trehalosa y translocado de esta manera, además se ha señalado también la toma de nitrato a partir de la actividad de la enzima nitrato reductasa fúngica, que al parecer asegura la toma de nitratos de manera complementaria con la nutrición amoniacal (Strullu, 1991).

Según reportes de Baath y Spokes (1989), los HMA poseen la capacidad de emplear tanto NH_4^+ como NO_3^- , sin embargo, sus efectos tienen mayor repercusión fisiológica producto de la absorción del amonio, ión que a diferencia del nitrato, se difunde lentamente en la rizosfera, y por lo tanto es menos asequible a las raicillas de las plantas. Por otra parte, los HMA son capaces de absorber el amonio a concentraciones más bajas que las raíces. Govindarajulu *et al.* (2005) y Piao *et al.* (2012) han esclarecido en sus trabajos como ocurre la absorción de los nitratos por los HMA. La mayoría de las investigaciones asociaron preferentemente la toma de nitrógeno con la forma amónica, con la cual se presentan menos costos de energía. Esto dependerá en última instancia de si el N es un elemento limitante para el cultivo y además si existe o no limitación en el C (Hodge y Storer, 2015).

La mayoría de los estudios sobre el efecto interactivo de los HMA y el ciclo del N, se centran en aspectos agrícolamente importantes, como la capacidad de las plantas micorrizadas para asimilar N y su responsabilidad en el proceso (Smith y Smith, 2011), a la vez en Cuba se

dispone de resultados sobre la disminución de fertilizantes para obtener rendimientos altos en diferentes cultivos (González *et al.*, 2015; Ruíz *et al.*, 2016 a y b).

2.5.2. Efecto de los HMA en la nutrición fosfórica

Uno de los beneficios más reconocidos a la simbiosis micorrízica arbuscular es la mejora de la nutrición fosfórica de las plantas (Karandashov y Bucher, 2005; Smith *et al.*, 2000; Smith y Smith, 2011; Bagyaraj *et al.*, 2015; Chu *et al.*, 2020), explicable tanto con la distribución espacial de las hifas extraradicales de HMA en el suelo como con la capacidad de absorción de P por unidad de longitud de las hifas (Smith y Read, 1997). Las hifas de las micorrízicas de los géneros *Glomus* sp. y *Acaulospora* sp. pueden transportar P desde varios centímetros de distancia entre las raíces de las plantas hospedantes (Li *et al.*, 1981, Jakobsen *et al.*, 1982). Aspectos estos muy importantes para este elemento de baja solubilidad y que se desplaza en el suelo por difusión. Asimismo algunos autores han reportado incrementos “directos” en la solubilización de fuentes orgánicas de P en el suelo, además de que en la propia micorrizosfera se incrementa la actividad biológica, incluyendo a los microorganismos solubilizadores de fósforo (Javot *et al.*, 2007; Smith y Smith, 2011; Bagyaraj *et al.*, 2015). Consecuentemente en experimentos de respuesta a la fertilización P en diferentes cultivos inoculados, siempre se ha encontrado una reducción en las cantidades de fertilizantes requeridas (González *et al.*, 2015; Ruíz *et al.*, 2016 a y b).

2.5.3. Efecto de los HMA en la nutrición potásica

El K⁺ es el catión más abundante en las plantas. Participa en la conformación activa de muchas enzimas que intervienen en los procesos de fotosíntesis y respiración, y en el transporte de los azúcares solubles. Su presencia en altas concentraciones se refleja en los aumentos del contenido de carbohidratos solubles y de proteína bruta en el tejido vegetal en condiciones de

suficiencia de nitrógeno (Boschini y Vargas, 2009). Es un componente obligado en las células vivientes, dependiendo de su absorción y ocasionalmente de su liberación para asegurar su crecimiento y mantenerse vivas (Rodríguez-Navarro y Rubio, 2006; Dupré de Boulois, 2007). Según Sparks y Huang (1985), la liberación de K intercambiable en los suelos es más baja que las tasas de adquisición de K^+ por las plantas, por lo que el contenido de K^+ disponible en los suelos es generalmente bajo. Además, como la difusión es el mecanismo dominante de liberación de K^+ a la superficie de la raíz, puede observarse frecuentemente disminución del elemento alrededor del sistema radicular. Fernández (2006) señaló que el potasio no intercambiable puede estar disponible para las plantas en cantidades significativas a corto, mediano o largo plazo, y que la mayor parte del potasio absorbido por los cultivos extractores proviene de la forma no intercambiable a través de su equilibrio con las formas cambiables.

El potasio se encuentra comúnmente en altas concentraciones tanto en las plantas micorrizadas como en las que no lo están. Este elemento se mueve con mayor facilidad en la solución del suelo que el P. En algunos casos los incrementos en absorción por las plantas micorrizadas se explica por un efecto indirecto producto de eliminar deficiencias de P; no obstante, estudios realizados por Fernández (2012) demostraron la funcionalidad de la simbiosis micorrízica arbuscular en la adquisición y translocación de K a las plantas, en un sistema autotrófico de cultivo totalmente *in vitro* de plántulas de *Medicago truncatula* Gaertn. inoculadas con dos especies de *Glomus*, a través del transporte de ^{86}Rb por parte de las hifas extrarradicales de estas cepas. En experimentos de campo se ha encontrado un efecto directo de las cepas eficientes de HMA sobre las concentraciones de K en diferentes cultivos y disminución de las cantidades de fertilizantes para obtener rendimientos altos y una nutrición adecuada (González *et al.*, 2015; Ruíz *et al.*, 2016 a y b; Simó *et al.*, 2020).

2.6. Permanencia en el sistema suelo-planta, la efectividad de las especies de HMA inoculadas

La permanencia de los HMA inoculados en el suelo, dentro de un sistema de rotación de cultivos determinado, ha sido abordado en Cuba en diferentes trabajos experimentales con resultados positivos (Ruíz, 2001; Riera, 2003; Marrero *et al.*, 2008) y se informa la existencia de un efecto positivo de permanencia sobre el primer cultivo en sucesión al cultivo inoculado, aunque dependiente del cultivo inoculado y posiblemente de la comunidad micorrízica residente y la competitividad de la cepa eficiente inoculada, pero en ninguno de los casos se ha estudiado cual es el periodo máximo entre la cosecha del precedente inoculado y la plantación del cultivo en sucesión, ni su dependencia con el cultivo inoculado ni la posible influencia de la época de plantación del cultivo en sucesión.

Los HMA pueden desempeñar un papel clave en los sistemas de rotación de cultivos, al disminuir no solo la dependencia de los fertilizantes, sino disminuir las cantidades de inoculantes utilizados (Ruíz, 2001). Si bien diversos autores han reportado efectos de permanencia asociados con la micorrización residente como Espíndola *et al.* (1998), Hodge y Fitter (2010) los que encontraron que las rotaciones de garbanzos promovieron la colonización de HMA en el trigo como cultivo siguiente y como esta inoculación puede ayudar a mejorar la absorción eficiente de N y P del suelo; sin embargo en Cuba autores como Riera, (2003), Martín, (2009), Sánchez *et al.* (2009) y Rivera *et al.* (2010), han dejado claro que este incremento de la micorrización del cultivo en sucesión por reproducción de las comunidades micorrízicas residentes no alcanza una micorrización efectiva y no impide la respuesta a la inoculación del cultivo en sucesión., por tanto se recomienda inocular directamente el cultivo en sucesión o aprovechar el efecto de permanencia del cultivo inoculado sobre el primer cultivo en la sucesión.

MATERIALES Y MÉTODOS

3. MATERIALES Y METODOS

Para cumplimentar los objetivos, de establecer las bases para la inclusión de los inoculantes micorrízicos, en la tecnología del cultivo del boniato, se ejecutó un programa de experimentos de campo, en áreas del Instituto de Investigaciones de Viandas Tropicales (INIVIT), ubicado a 22 35' N, 80 18' W y 40 m s.n.m. en el municipio Santo Domingo, provincia Villa Clara. Las investigaciones se desarrollaron durante el período 2012-2016, así como de extensiones en entidades productivas de la propia provincia en los años 2016-2018.

3.1. Principales características edafoclimáticas

3.1.1. Temperatura media y precipitaciones mensuales y anuales

Según la clasificación de Köppen, el clima puede catalogarse como Aw, tropical subhúmedo (Inzunza, 2005) con precipitaciones y temperaturas medias anuales del orden de 1350 mm y 24,3 °C, respectivamente. Las temperaturas medias anuales, presentaron un promedio similar a la media histórica (1978-2016) con ligeras oscilaciones entre los años que solo fueron mayores en el año 2013, en que la media fue superior en 0,4 °C. La época lluviosa se enmarcó entre mayo y octubre, en los cuales ocurrió entre el 75 y 88 % de las precipitaciones, con un promedio del 80 % y similar al 78 % presentado en el promedio histórico. De forma general, los valores de estas variables indicaron que los experimentos se desarrollaron bajo condiciones representativas del clima de la región (Tablas 1 A y 1 B).

3.1.2. Características químicas y físico-químicas del suelo del área experimental

Todos los experimentos se desarrollaron en un suelo Pardo mullido carbonatado, según Hernández *et al.* (2015), catalogado como *Phaeozems haplic calcaric*, en correspondencia con la *World Referente Base* (WRB, 2014). La caracterización de la fertilidad química (Tabla 2) se realizó a partir de las Normas Cubanas (NC-10 390, 1999; NC-51, 1999; NC-52, 1999;

Tabla 1-A. Temperatura media mensual y anual (°C), en el período experimental 2012-2016 y el promedio histórico mensual (época 1978-2016)

Año	2012	2013	2014	2015	2016	Promedio	
						2012-2016	Histórico
Mes							
Enero	20,7	22,7	21,7	21,1	20,9	21,03	20,9
Febrero	22,7	22,6	23,8	20,4	20,1	21,60	21,6
Marzo	23,2	20,6	23,8	23,9	23,5	22,49	22,6
Abril	24,0	25,1	25,2	25,7	24,0	24,76	24,3
Mayo	25,4	25,1	25,6	25,2	25,5	25,79	25,5
Junio	26,4	26,8	25,6	26,3	26,5	26,57	26,6
Julio	26,5	26,5	26,7	27,0	27,2	26,84	26,9
Agosto	26,7	26,9	26,7	26,3	26,9	26,81	26,9
Septiembre	26,4	26,1	25,9	26,3	26,5	26,27	26,3
Octubre	24,8	25,9	24,5	25,0	24,8	24,93	25,2
Noviembre	20,8	24,3	22,4	24,2	21,7	22,57	23,3
Diciembre	21,9	23,7	20,5	24,1	23,3	21,80	21,8
Promedio	24,1	24,7	24,4	24,6	24,3	24,29	24,3

Fuente: Los datos de las variables climatológicas correspondientes a la etapa experimental y los datos históricos de 38 años se tomaron de la Estación Agrometeorológica No. 326, adjunta al Instituto de Meteorología (INSMET, 2016) y ubicada a 22° 35' N, 80° 18' W y a 40 m s.n.m. en el INIVIT en el municipio Santo Domingo, Villa Clara, Cuba.

Tabla 1-B. Precipitaciones mensuales y anuales (mm), en el período experimental 2012-2016 y el promedio histórico mensual (época 1978-2016)

Año	2012	2013	2014	2015	2016	Promedio	
						2012-2016	Histórico
Mes							
Enero	0,1	61,6	17,6	29,0	82,1	40,0	37,8
Febrero	41,2	6,7	31,1	14,3	7,1	28,2	42,7
Marzo	22,4	85,3	4,8	18,1	82,9	39,4	51,9
Abril	87,7	75,7	57,0	94,1	113,1	82,0	64,7
Mayo	277,5	269,6	177,6	84,4	131,1	143,9	179,4
Junio	226,0	149,3	298,7	124,6	271,7	239,3	216,8
Julio	170,0	172,1	81,8	94,5	131,8	133,6	160,0
Agosto	306,2	203,3	91,3	288,9	126,4	193,2	166,0
Septiembre	163,4	288,0	109,3	136,7	245,8	175,8	191,8
Octubre	290,4	98,6	237,5	203,6	157,3	189,3	131,9
Noviembre	17,4	90,9	74,5	71,4	12,9	47,3	63,4
Diciembre	24,1	18,0	1,8	56,7	2,8	20,2	34,8
Acumulado	1627,3	1519,1	1191,0	1216,6	1374,0	1332,2	1347,9

Fuente: Los datos de las variables climatológicas correspondientes a la etapa experimental y los datos históricos de 38 años, se tomaron de la Estación Agrometeorológica No. 326, adjunta al Instituto de Meteorología (INSMET, 2016) y ubicada a 22° 35' N, 80° 18' W y a 40 m s.n.m. en el INIVIT, municipio Santo Domingo, Villa Clara, Cuba.

Tabla 2. Caracterización del suelo Pardo mullido carbonatado donde se desarrollaron los experimentos (0-20 cm profundidad)

Grupo de Experimento		pH		Nt	MO	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
		KCl	H ₂ O	(g kg ⁻¹)		(mg kg ⁻¹)		(cmol _c kg ⁻¹)			
Grupo I	Época lluviosa										
	Año 1	6,20	7,00	1,40	17,30	17,50	212,20	27,20	4,10	0,37	0,53
	Z _{1-α} * S _{\bar{x}}	±0,18	±0,06	±0,07	±0,12	±0,02	±0,70	±0,07	±0,12	±0,02	±0,006
	Año 2	6,50	7,20	1,60	19,00	25,50	223,10	35,62	4,66	0,40	0,54
	Z _{1-α} * S _{\bar{x}}	±0,06	±0,09	±0,06	±0,63	±0,02	±0,10	±0,04	±0,004	±0,006	±0,01
	Época poco lluviosa										
	Año 1	6,20	7,30	1,40	18,70	25,00	223,10	31,14	4,89	0,38	0,57
	Z _{1-α} * S _{\bar{x}}	±0,04	±0,07	±0,06	±0,16	±0,61	±0,10	±0,01	±0,01	±0,006	±3,91
	Año 2	6,00	7,10	1,50	18,80	17,70	213,00	27,21	4,11	0,39	0,53
Z _{1-α} * S _{\bar{x}}	±0,06	±0,09	±0,06	±0,12	±0,11	±0,10	±0,01	±0,006	±0,02	±4,07	
Época lluviosa y poco lluviosa											
Grupo II	Año 1	6,20	7,12	1,60	20,02	20,20	214,40	30,20	4,29	0,37	0,55
	Z _{1-α} * S _{\bar{x}}	±0,06	±0,09	±0,07	±0,14	±0,14	±0,70	±0,07	±0,06	±0,02	±0,02
	Año 2	6,10	7,12	1,70	20,10	20,02	214,50	27,85	4,35	0,38	0,56
	Z _{1-α} * S _{\bar{x}}	±0,04	±0,10	±0,06	±0,16	±0,14	±0,60	±0,08	±0,06	±0,02	±0,02

Z_{1-α}*S _{\bar{x}} = ± Intervalo de Confianza (1-α=0,05), siendo Z₁ =1,96. Metodologías utilizadas: pH en H₂O y KCl (KCl solución 1 M) en relación suelo: solución (1:2,5) por el método potenciométrico (NC ISO-10390, 1999). Determinación de la materia orgánica por el método de Walkley-Black (oxidación del C con K₂Cr₂O₇ 0,5 M en H₂SO₄ (18 M al 98 %) y valoración con NH₄FeSO₄ (0,25 M) (NC-51, 1999). Extracción del P por el método de Machiguín (solución extractiva de (NH₄)₂CO₃ con concentración de 10 g L⁻¹, pH 9,0) y valoración con HCl 0,05 M e indicador anaranjado de metilo (NC-52, 1999). Extracción de cationes intercambiables con NH₄Ac 1 M y pH 7 en relación suelo: solución de 1:5 y agitando durante 5 minutos (NC-209, 2002).

NC-209, 2002) y se tuvo en cuenta el Manual de interpretación de los índices físico-químicos y morfológicos de los suelos cubanos (MINAG, 1984).

A partir de los criterios de interpretación nacionales (MINAG, 1984) utilizados para los diferentes métodos, el suelo se caracteriza de la siguiente forma:

En relación con el pH, los suelos presentaron una reacción entre neutra y ligeramente alcalina, asociado en este último caso con la presencia de carbonatos libres y se corresponden con valores típicos para este tipo de suelo. Con respecto a los contenidos de materia orgánica los valores fueron bajos, indicativos de procesos de degradación del suelo. Los contenidos de fósforo (P_2O_5) y potasio (K_2O) disponibles presentaron valores bajos. En relación con los cationes intercambiables, el calcio (Ca^{2+}) mostró valores altos, mientras que, el magnesio (Mg^{2+}) exhibió contenidos bajos, y su disponibilidad relativa puede ser aún menor por la alta relación Ca/Mg (7,5) (Carvajal, 1984). El Na^+ a su vez mostró valores de muy bajo (Paneque y Calaña, 2001). De forma general, los valores fueron similares en cada uno de los experimentos ejecutados y similares a los reportados por otros investigadores en este tipo de suelo, con años de explotación agrícola (Ruíz *et al.*, 2016b, Simó *et al.*, 2020).

3.2. Grupo de Experimentos I. Efecto de la inoculación con la cepa *Rhizoglo mus irregulare*/INCAM-11, en los requerimientos de fertilizantes N, P_2O_5 y K_2O , en el cultivo del boniato (*Ipomoea batatas* (L.)Lam.), en suelo Pardo mullido carbonatado en época lluviosa y poco lluviosa

Para dar respuesta a este objetivo se trabajó en seis experimentos en condiciones de campo.

3.2.1. Experimentos 1 y 2. Efecto de la inoculación con la cepa *R. irregulare*/INCAM-11 en la respuesta y los requerimientos de fertilizante nitrogenado de dos cultivares comerciales de boniato, plantado en suelo Pardo mullido carbonatado tanto en época

l luviosa como poco lluviosa

En ambas épocas se utilizaron los cultivares 'INIVIT B-2-2005' y 'CEMSA 78-354' y se estudiaron cinco niveles de fertilizante nitrogenado (0; 30; 60; 90 y 120 kg ha⁻¹ de N) con un fondo fijo de 75 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 150 kg ha⁻¹ de K₂O, en presencia o no de la inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11, los experimentos se repitieron durante dos años. El diseño utilizado fue de Bloques al Azar con arreglo factorial 2 x 5 x 2 x 2. Los factores y sus respectivos niveles en este caso fueron: cultivares (2), dosis de N (5), inoculación micorrízica (2) y años (2).

3.2.2. Experimentos 3 y 4. Efecto de la inoculación con la cepa *R. irregulare*/INCAM-11 en la respuesta y los requerimientos de fertilizante fosfórico, de dos cultivares de comerciales de boniato, plantado en suelo Pardo mullido carbonatado tanto en época lluviosa como poco lluviosa

En ambas épocas se evaluaron los mismos cultivares (3.2.1.) y se estudiaron cinco niveles de fertilizante fosfórico (0; 25; 50; 75 y 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅) con un fondo fijo de 90 kg ha⁻¹ de N y 150 kg ha⁻¹ de K₂O, en presencia o no de la inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11 y repetido durante dos años. El diseño utilizado fue de Bloques al Azar con arreglo factorial de 2 x 5 x 2 x 2. Los factores y sus respectivos niveles en este caso fueron: cultivares (2), dosis de P₂O₅ (5), inoculación micorrízica (2) y años (2).

3.2.3. Experimentos 5 y 6. Efecto de la inoculación con la cepa *R. irregulare*/INCAM-11 en la respuesta y los requerimientos de fertilizante potásico, de dos cultivares comerciales de boniato, plantado en suelo Pardo mullido carbonatado tanto en época lluviosa como poco lluviosa

En ambas épocas se evaluaron los mismos cultivares (3.2.1.) y se estudiaron cinco niveles de fertilizante potásico (0; 75; 150; 225 y 300 kg ha⁻¹ de K₂O) con un fondo fijo de 90 kg

ha⁻¹ de N y 75 kg ha⁻¹ de P₂O₅, en presencia o no de la inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11, y repetido durante dos años. El diseño utilizado fue de Bloques al Azar con arreglo factorial de 2 x 5 x 2 x 2. Los factores y sus respectivos niveles en este caso fueron: cultivares (2), dosis de K₂O (5), inoculación micorrízica (2) y años (2).

Este grupo de experimentos se plantó entre el 12-14 de abril de los años 2012 y 2013 para el período lluvioso y entre el 14-15 de noviembre de los años 2012 y 2013 para el período poco lluvioso. Los materiales de plantación empleados fueron los cultivares de boniato 'INIVIT B-2-2005' y 'CEMSA 78-354', utilizando siempre para la plantación el primer y el segundo tercio del propágulo vegetativo (esqueje) con una longitud de 30 cm. El marco de plantación fue de 0,90 x 0,25 m para la época lluviosa y 0,90 x 0,23 m para la época poco lluviosa (MINAG, 2012a). Las parcelas experimentales estuvieron compuestas por cinco surcos de seis metros de largo y un área de 27 m². En la cosecha se seleccionaron las raíces tuberosas presentes en cinco metros de cada uno de los tres surcos centrales, eliminando las plantas iniciales por ambos extremos de cada surco, con un área de cálculo de 13,5 m² en cada parcela.

El inoculante se preparó a partir de la cepa *Rhizoglosum irregulare* {(Sieverding, *et al.*, 2014) /INCAM-11, DAOM711363}, la cual ha sido recomendada como cepa eficiente de HMA para estas condiciones edáficas (Rivera *et al.*, 2015b, Simó *et al.*, 2018) y utilizada por diferentes investigadores con resultados satisfactorios en diversos cultivos (Simó *et al.*, 2015; Ruíz *et al.*, 2016 a, b). El inoculante se produjo en el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), Mayabeque, Cuba. Se utilizó *Urochloa decumbens* (Stapf) R. D. Webster, como planta hospedera y se siguió el protocolo descrito por Fernández *et al.* (2000). El mismo poseía diferentes propágulos como esporas, raicillas infectivas y micelios, aunque solo se contabilizaron las primeras con un título entre 25 y 30 esporas g⁻¹.

La inoculación se realizó a partir de una mezcla de 0,125 kg de inoculante por cada 600 ml de H₂O ($\approx 35 \text{ kg ha}^{-1}$), recubriendo el tercio inferior de la semilla y se dejó secar ligeramente a la sombra dos horas previo a la plantación (Ruíz *et al.*, 2012).

Las labores culturales se realizaron según el instructivo técnico del cultivo del boniato (MINAG, 2012a). El fertilizante se aplicó a los 30 días después de la plantación, en bandas al lado de los surcos; utilizando como portadores, la urea (46-0-0), el superfosfato simple (0-20-0) y el cloruro de potasio (0-0-60).

3.3. Grupo de Experimentos II: Utilización de cultivos precedentes inoculados como vía para lograr una micorrización eficiente en el cultivo del boniato

3.3.1. Experimentos del 7 al 18. Manejo de los cultivos precedentes inoculados con la cepa *R. irregulare*/INCAM-11 en la secuencia cultivo precedente–boniato, iniciada tanto en la época lluviosa (experimentos del 7 al 12), como en la época poco lluviosa (experimentos del 13 al 18)

Se utilizaron como precedentes cultivos muy utilizados en la producción agrícola en Cuba. Los cultivos precedentes evaluados fueron maíz y dos especies de frijol, dependientes estas últimas de la época de siembra. En la época lluviosa los (cultivos) precedentes fueron (*Zea mays* L./var. 'MC-4') y frijol vigna (*Vigna unguiculata* (L.) Walp./var. 'Guariba'); cuando se sembraron en la época poco lluviosa, se utilizaron el propio maíz (*Zea mays* L./var. 'MC-4') y el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L./var. 'BAT-306'). El hecho de utilizar frijol vigna en verano y frijol común en invierno, se debió a que el frijol común no se siembra como cultivo económico en la época lluviosa o de verano.

En sucesión de los cultivos precedentes y en las mismas parcelas, se plantó el cultivar de boniato 'CEMSA 78-354', uno de los más generalizados en condiciones de producción, en el país y que se utilizó en el grupo de experimentos I.

Para cada sucesión (definida por el cultivo precedente y la época) se ejecutaron tres experimentos y en cada uno de estos casos se utilizó un intervalo diferente en la sucesión de los cultivos (30, 45 y 60 días). Los cuatro tratamientos, en cada experimento, fueron similares (Tabla 3) y se repitieron durante dos años. El diseño experimental fue de Bloques al Azar con cuatro réplicas, con arreglo factorial de 4 x 2 (4 tratamientos x 2 años).

Tabla 3. Tratamientos utilizados en los experimentos del grupo II

Tratamiento	Etapas	
	Cultivos precedentes	Cultivo del boniato
1	50 % N P K + HMA	DOF + HMA
2	50 % N P K + HMA	DOF (I-p)
3	50 % N P K	DOF
4	100 % N P K	100 % N P K

DOF: Dosis óptima de fertilizantes para el boniato inoculado, obtenida en el grupo de experimento I; 50 % N P K dosis óptima de fertilizantes para maíz y frijol inoculados (Rivera *et al.*, 2017); 100 % N P K dosis recomendada por Instructivo para cada uno de los cultivos; I-p: Inoculación vía efecto de permanencia del cultivo precedente inoculado. HMA: *R. irregularis*.

En total se ejecutaron seis experimentos en los cuales los cultivos precedentes se sembraron en época lluviosa y el boniato se plantó en época poco lluviosa (experimentos del 7 al 12) y otros seis en los cuales los precedentes, se sembraron en época poco lluviosa y el boniato en época lluviosa (experimentos del 13 al 18). Las fechas específicas de siembra de los cultivos precedentes y de plantación del boniato, en las sucesiones, se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Fechas de siembra y cosecha de los cultivos precedentes y de plantación del boniato, en las épocas lluviosa y poco lluviosa

Época	Cultivo precedente	Fecha		Plantación del boniato (ddcp)*		
		Siembra	Cosecha	30	45	60
Lluviosa	Maíz año 1	11/05/15	12/09/15	15/10/15	30/10/15	16/11/15
	Vigna año 1	10/06/15	12/09/15	15/10/15	30/10/15	16/11/15
	Maíz año 2	11/04/16	12/08/16	15/09/16	30/09/16	15/10/16
	Vigna año 2	10/05/16	12/08/16	15/09/16	30/09/16	15/10/16
Poco lluviosa	Maíz año 1	15/01/15	16/05/15	18/06/15	3/07/15	18/07/15
	Frijol año 1	9/02/15	16/05/15	18/06/15	3/07/15	18/07/15
	Maíz año 2	16/01/16	18/05/16	18/06/16	4/07/16	19/07/16
	Frijol año 2	10/02/16	18/05/16	18/06/16	4/07/16	19/07/16

*días después de la cosecha de los cultivos precedentes

La siembra del maíz se realizó siempre con un mes de antelación al del frijol (ambos cultivares), para que las fechas de plantación del boniato, con uno u otro precedente fueran similares en cada época y por tanto pudieran ser comparables los efectos del manejo.

Los marcos de siembra utilizados, en los diferentes cultivos, fueron de 0,90 x 0,20 m para el maíz, de 0,70 x 0,20 m, en el caso del frijol común y en la vigna de 0,90 x 0,10 m (INIFAT, 1993; MINAG, 2010). En el cultivo del boniato el marco de plantación fue de 0,90 x 0,23 m, en la época poco lluviosa y de 0,90 x 0,25 m, en la época lluviosa (MINAG, 2012a). Las parcelas se conformaron con cinco surcos de seis metros de largo, excepto para el frijol (ambos cultivares) que tenían seis surcos. En cada experimento, los cultivos precedentes y el boniato, de cada tratamiento se ubicaron siempre en las mismas parcelas, con un área de 27 m². Para evaluar rendimiento se utilizó, en todos los cultivos, un área de cálculo similar a la utilizada en el grupo de experimentos I.

Inoculante e inoculación micorrízica. Se utilizó un inoculante con características similares al del grupo I. La inoculación de los precedentes, se ejecutó vía recubrimiento de las semillas, con una cantidad de inoculante equivalente al 10 % del peso de la semilla (Fernández *et al.*, 2005); en el caso del boniato según lo descrito por Ruíz *et al.* (2012).

Fertilización y atenciones culturales. Las dosis de N, P₂O₅ y K₂O recomendadas para obtener altos rendimientos (100 % N P K), fueron para el maíz 90 kg ha⁻¹ de N, 130 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 170 kg ha⁻¹ de K₂O (MINAG, 2010), en la vigna y el frijol común de 80 kg ha⁻¹ de N, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 90 kg ha⁻¹ de K₂O (INIFAT, 1993) y en el boniato de 90 kg ha⁻¹ de N, 75 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 150 kg ha⁻¹ de K₂O respectivamente (MINAG, 2012a). Las dosis para obtener un funcionamiento micorrízico óptimo, en los cultivos precedentes inoculados fueron del 50 % N P K (Rivera *et al.*, 2017); en el caso del boniato inoculado, se empleó el sistema de fertilización que se obtuvo del grupo de experimento I.

Las labores culturales en los cultivos precedentes y en el boniato, se realizaron según los respectivos instructivos técnicos de estos cultivos (INIFAT, 1993; MINAG, 2010; MINAG, 2012a). En la época poco lluviosa para el cultivo del maíz, se aplicó una norma de riego de $350 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ cada siete días hasta la formación de la mazorca, después se incrementó a $400 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y entre los 80 y 100 días se suspendió para la maduración del grano (MINAG, 2010). En el cultivo del frijol se aplicó una norma de riego de $350 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ cada 10 días (INIFAT, 1993) y en el cultivo del boniato, se realizó una aplicación de $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ cada siete días hasta los 45 días y después cada 10 días hasta suspenderlo 15 días antes de la cosecha (MINAG, 2012a). En la época lluviosa el riego se aplicó con similares criterios, cuando las precipitaciones no igualaron las normas de aplicación de cada época.

3.4. Evaluaciones y metodologías empleadas

3.4.1. Toma de muestras de suelo

Para los análisis de suelo se utilizaron muestras compuestas por 10 submuestras tomadas con una barrena inoxidable, en forma de zig-zag en cada parcela experimental y a una profundidad de 0-0,2 m al inicio de cada experimento.

Se determinaron: el pH en KCl y H_2O por el método potenciométrico (NC-10 390-1999), con una relación suelo-solución de 1:2,5; el nitrógeno total (Nt) por el método de Micro-Kjeldahl; la materia orgánica (MO) por el método colorimétrico de Walkley-Black (NC-51 1999); el P_2O_5 y K_2O disponibles por el método de Machiguin (NC-52 1999). Los cationes intercambiables Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ se extrajeron con una solución de AcNH_4 1 Mol l^{-1} a pH 7,0 (NC-209 2002); el Ca^{2+} y el Mg^{2+} se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica y el Na^+ y K^+ por fotometría de llama.

3.4.2. Determinaciones de macronutrientes en biomasa aérea y la raíz tuberosa del boniato

Se realizaron en el momento de la cosecha en ambos grupos de experimentos. Para ello

setomaron seis plantas contiguas en los dos surcos centrales de cada parcela. A estas plantas se les determinó la masa fresca en g (MF), pesando en balanza técnica (0,01 g) los diferentes órganos de la planta de boniato (hoja, tallo y raíz tuberosa). La biomasa o masa seca (MS) correspondiente se determinó a partir del porcentaje de masa seca, del tejido fresco secado en estufa con ventilación forzada a 65 °C hasta peso constante. En cada una de las muestras se determinaron las concentraciones de N, P y K (g kg^{-1}), realizando una digestión húmeda con H_2SO_4^+ Se (Método Kjeldahl) y utilizando el método de Nessler para determinar el N, el aminonaftol sulfónico para el P y fotometría de llama para el K (NRAG-564, 1982).

3.4.3. Frecuencia de colonización

La frecuencia de colonización se determinó en los cultivos de todos los experimentos. Se realizó a los 45 días después de la siembra para el maíz, la vigna y el frijol común y en el caso del boniato se realizó los 90 días después de la plantación. Se tomaron muestras de raíces finas de seis plantas por parcela, ubicadas en los surcos centrales, las cuales se secaron a 70 °C en estufa, con ventilación forzada, hasta peso constante. Se tomaron 200 mg de raíces, se tiñeron según la metodología descrita por Phillips y Hayman (1970). Las observaciones se realizaron en un microscopio estéreo (Stemi 2000-C/50x) y se utilizó el método de los interceptos, desarrollado por Giovanetti y Mosse (1980).

3.4.4. Esporas micorrízicas en 50 gramos de suelo

El conteo de esporas se realizó al inicio de los experimentos y en el momento de la cosecha para el maíz, la vigna y el frijol común y en el caso del boniato se realizó los 90 días después de la plantación; se tomó una muestra compuesta de 10 submuestras (0-20 cm) por parcela. Las esporas se colectaron sobre una malla de 40 μm de apertura, se separaron por centrifugación con sacarosa y Tween 80 y se observaron posteriormente en un estereo

microscopio (Stemi 2000-C/50x). Se procedió según el protocolo descrito por Gerdemann y Nicholson (1963).

3.4.5. Extracción de nutrientes

En los experimentos del grupo I y II se determinaron las extracciones de nutrientes (kg ha^{-1}) en el momento de la cosecha.

La extracción de N, P y K (kg ha^{-1}) se calculó a partir de las concentraciones de cada uno de los macronutrientes (g kg^{-1}) en el tejido seco de hojas, tallo y raíces tuberosas y la masa seca (t ha^{-1}) correspondiente según la siguiente fórmula:

$$\text{Extracción (kg ha}^{-1}\text{)} = MS (\text{t ha}^{-1}) \times \text{Concentración elemento (g kg}^{-1}\text{)}$$

Con posterioridad se sumaron las extracciones de a cada órgano para calcular la extracción total en cada tratamiento. La exportación correspondió a la extracción realizada por las raíces tuberosas.

3.4.6. Rendimiento comercial (t ha^{-1})

En los experimentos del Grupo I, el boniato se cosechó a los 150 días, según el rango de cosecha del cultivar 'INIVIT B-2-2005' (MINAG, 2012a). En el caso de los experimentos del Grupo II, fue necesario realizarla a los 120 días, cumpliendo con el rango de cosecha que se plantea para el cultivar 'CEMSA 78-354' (MINAG, 2012a). La cosecha del frijol común y la vigna se realizó a los 90 días y el maíz a los 120 días. En todos los cultivos para el cálculo del rendimiento se cosecharon los surcos centrales, no utilizando las plantas presentes en ambos extremos. En todos los casos se estimó el rendimiento en t ha^{-1} , a partir del marco de siembra o plantación utilizado; en el caso del maíz, el frijol común y la vigna se expresó, en base a un 14 % en el contenido de humedad en el grano para el boniato a partir del pesaje de raíces con un peso igual o superior a 115 g.

3.4.7. Efecto de permanencia (EP) (%)

El efecto de permanencia del inoculante o la capacidad de micorrización de los propágulos reproducidos por el cultivo precedente inoculado sobre el boniato en sucesión, se evaluó en los experimentos del 7 al 18 para cada intervalo estudiado entre ambos cultivos. Se estimó a partir de las respuestas en el rendimiento del boniato (t ha^{-1}) de los tratamientos precedente inoculado-boniato sin inocular (R1) y precedente inoculado-boniato inoculado (R2), siempre en relación al rendimiento del boniato en la sucesión homóloga no inoculada y se calculó como sigue $\text{EP (\%)} = \text{R1/R2} \times 100$.

3.4.8. Eficiencia agronómica (EA) (kg kg^{-1})

Se realizó en los experimentos de 1 al 6. En los experimentos 1 y 2 se calculó la EA del fertilizante nitrogenado, en los experimentos 3 y 4 la EA del fertilizante fosfórico y en los experimentos 5 y 6 la EA del fertilizante potásico. Para cada macronutriente se compararon las EA de los mejores tratamientos inoculado y no inoculado (con mayores rendimientos y menores dosis de fertilizantes) en las diferentes combinaciones épocas-cultivares-años. La EA se estimó por la fórmula descrita por Stewart (2007):

$$\text{EA (kg kg}^{-1}\text{)} = [\text{R (t ha}^{-1}\text{)} - \text{R}_0 \text{(t ha}^{-1}\text{)}] * 1000 / \text{F (kg ha}^{-1}\text{)}$$

R: Rendimiento con fertilizantes (tanto para los inoculados como no inoculados)

R₀: Rendimiento sin fertilizantes (siempre se refiere al no inoculado y sin el macronutriente)

F: Dosis del fertilizante (macronutriente estudiado)

3.5. Métodos estadísticos empleados

Se verificaron en cada caso los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza por las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Levene. Se utilizó el paquete estadístico IBM SPSS versión 11.5 (SPSS, 2012). Los valores iniciales de análisis de suelo se compararon mediante los Intervalos de Confianza de las medias ($1-\alpha=0,05$).

En los diferentes experimentos se realizaron los ANOVA de acuerdo con el diseño utilizado y siempre que las interacciones fueron significativas los datos se presentaron en base a estas. Siempre que los ANOVA fueron significativos, la comparación entre las medias se realizó por la Prueba de Tukey a $P \leq 0,05$.

En los experimentos del grupo I y cuando la interacción significativa de mayor orden fuera de cuarto o tercer orden, se procedió al desdoblamiento de la misma.

En el grupo de experimentos II como se disponía de resultados de tres experimentos para cada combinación cultivo precedente x época, se procedió a evaluar primeramente si existió interacción tratamientos x repetición de experimentos x años y la información se presenta a partir de ese análisis. Para la etapa del boniato los resultados se expresan de acuerdo a si la interacción tratamientos x años, en cada experimento, fue o no significativa. La comparación entre los experimentos se realizó con los Intervalos de Confianza ($1-\alpha = 0,05$) calculados a partir de los $ES\bar{x}$ obtenidos para cada variable, en cada experimento.

En los dos grupos de experimentos y para el cultivo del boniato se realizaron Análisis de Correlación entre la frecuencia de colonización vs rendimientos ($t\ ha^{-1}$) y vs las cantidades de esporas en 50 g de suelo, así como entre los rendimientos vs extracciones de N, P y K, vs exportaciones de N, P y K y vs los porcentajes de macronutrientes exportados. Asimismo, en cada uno de los experimentos del grupo I se establecieron análisis de correlación, entre las EA obtenidas para los mejores tratamientos con y sin inoculación y los rendimientos del tratamiento testigo en cada combinación cultivar-época-año.

3.6. Extensiones realizadas

Las extensiones se realizaron en dos Unidades Empresariales de Base (UEB) de la Empresa Integral Agropecuaria Santa Clara (UEB “Manicaragua” y “10 de Octubre”). El esquema

experimental utilizado se presenta en la tabla 5.

Tabla 5. Tratamientos utilizados en las extensiones

Etapas	
Precedente	Boniato
50 % N P K + HMA	DOF + HMA
50 % N P K + HMA	DOF (I-p)
100 % N P K	DOF
	100 % N P K

DOF: Dosis óptima de fertilizantes obtenida para el boniato inoculado en el grupo de experimento I. 50 % NPK dosis óptima de fertilizantes para maíz y frijol inoculados (Rivera *et al.*, 2017). 100 % NPK dosis recomendada por Instructivo para cada uno de los cultivos. I-p: Inoculación vía efecto de permanencia del cultivo precedente inoculado. HMA: inoculación con *R. irregulare*.

El objetivo de las extensiones fue comprobar a escala productiva y de forma integrada los resultados alcanzados en los dos grupos de experimentos en un suelo Pardo mullido carbonatado.

La cepa aplicada en cada localidad fue *R. irregulare* {(Sieverding, *et al.*, 2014) /INCAM-11, DAOM711363}, cepa eficiente para las condiciones edáficas en que se ejecutaron las extensiones. La fertilización utilizada para el boniato correspondió a los resultados del grupo de experimentos I y la de los precedentes de acuerdo con Rivera *et al.* (2017). El intervalo entre la cosecha del cultivo precedente inoculado y el boniato se empleó el mejor de los intervalos según los resultados obtenidos en el grupo de experimento II. En ambas extensiones el área fue de 1,0 hectárea.

En la UEB Integral Agropecuaria “10 de octubre” se utilizó como precedente la variedad de frijol 'CUL-156', la cual se sembró el día 17 noviembre de 2016 y se cosechó el día 27 febrero de 2017. El intervalo empleado entre la cosecha del cultivo precedente inoculado y el boniato resultó ser el mejor según el grupo de experimento II. Se utilizó el cultivar de boniato 'TNIVIT B-2-2005' y se cosechó a los 150 días (MINAG, 2012a).

En la UEB Integral Agropecuaria “Manicaragua”, se utilizó como precedente la variedad de maíz 'P-7928', sembrada el día 10 de noviembre de 2017 y se cosechó el día 12 de marzo de 2018. El intervalo empleado entre la cosecha del cultivo precedente inoculado y el boniato resultó ser el

mejor según el grupo de experimento II. Se plantó el cultivar de boniato 'INIVIT B- 50' y se cosechó a los 120 días (MINAG, 2012a).

En las dos extensiones, los rendimientos de cada cultivo, se obtuvieron por la cosecha total del área de cada tratamiento y expresado en $t\ ha^{-1}$ de granos, al 14 % de humedad y en el caso del boniato utilizando las raíces comerciales ($\geq 115\ g$).

3.7. Análisis económico

La valoración económica se realizó a través de los efectos encontrados en las extensiones, las cuales integran los resultados de ambos grupos de experimentos:

Valor de la producción (pesos ha^{-1}): Rendimiento del cultivo multiplicado por el precio de venta de una tonelada de producto 1 320 pesos la tonelada (MINAG, 2012b).

Costos de fertilización (pesos ha^{-1}): Gastos incurridos por la adquisición y aplicación de los fertilizantes minerales, se tomaron del Manual de fichas de costo tecnológicos (MINAG, 2012b).

Costo de inoculantes (pesos ha^{-1}): A partir del precio del EcoMic[®] de 8 pesos kg^{-1} según la Ficha de costo (INCA, 2016) y utilizando cantidades de EcoMic[®] de 2 $kg\ ha^{-1}$ para inocular maíz, 4 $kg\ ha^{-1}$ para inocular frijol y 35 $kg\ ha^{-1}$ para la inoculación por recubrimiento del boniato.

Costo estimado de aplicación del EcoMic[®] en el cultivo del boniato y otros cultivos (pesos ha^{-1}). A partir de la experiencia desarrollada en el INIVIT (Ruíz, 2001).

Costos por atenciones culturales: Manual de fichas de costo tecnológicos (MINAG, 2012b).

Costo por recolección: Manual de fichas de costo tecnológicos (MINAG, 2012b).

Beneficio (\$ ha^{-1}): Ganancia neta fue obtenida por diferencia entre el valor de la producción y los costos totales para cada tratamiento.

Relación B/C: Coeficiente obtenido de dividir el beneficio entre el costo total incurrido en las diferentes actividades en cada tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Grupo de Experimentos I. Efecto de la inoculación con la cepa *R. irregular*/INCAM-11 en los requerimientos de fertilizantes N, P₂O₅ y K₂O en el cultivo del boniato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) en suelo Pardo mullido carbonatado, en época lluviosa y poco lluviosa

4.1.1. Experimentos 1 y 2. Efecto de la inoculación con la cepa *R. irregular*/INCAM-11 en la respuesta y los requerimientos de fertilizante nitrogenado de dos cultivares comerciales de boniato, en época lluviosa (experimento 1) y poco lluviosa (experimento 2)

Experimento 1. Resultados en la época lluviosa

Los análisis estadísticos de las variables rendimiento, frecuencia de colonización micorrízica total y esporas totales, en 50 g de suelo, mostraron un efecto significativo de todos los factores, excepto el factor cultivar (Tabla 6).

Tabla 6. Experimento 1. Valor P de los diferentes factores y términos de interacción en los ANOVA realizados para las variables rendimiento, frecuencia de colonización micorrízica y esporas contadas en la época lluviosa

Origen	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Colonización (%)	Esporas (50 g de suelo)
Modelo corregido	0,000	0,000	0,000
Intersección	0,000	0,000	0,000
A	0,000	0,000	0,000
B	0,000	0,000	0,000
C	0,136 N.S	0,000	0,000
D	0,000	0,000	0,000
A x B	0,000	0,000	0,000
A x C	0,216 N.S	0,000	0,000
A x D	0,000	0,000	0,000
B x D	0,000	0,000	0,000
B x C	0,492 N.S	0,295 N.S	0,000
C x D	0,061 N.S	0,000	0,000
A x B x C	0,412 N.S	0,336 N.S	0,000
B x C x D	0,496 N.S	0,096 N.S	0,000
A x B x C x D	0,004	0,000	0,000

Leyenda: Factor A: Inoculación micorrízica con dos niveles (con y sin inoculación); Factor B: Dosis de fertilización mineral nitrogenada con cinco niveles (0, 30, 60, 90 y 120 kg ha⁻¹ respectivamente); Factor C: Cultivar de boniato con dos niveles ('INIVIT B-2-2005' y 'CEMSA 78-354') y Factor D: Años evaluados con dos niveles (Año 1 y 2).

En la variable rendimiento y todos los términos de interacción de mayor orden A x B x C x D fueron significativos entre $P \leq 0,05$ y $P \leq 0,001$ dependiente de la variable (Tabla 6).

Para simplificar la interpretación de estos resultados y en función de los objetivos planteados se realizó en todos los casos el desdoblamiento de la interacción (Tablas 7 y 8 I y II), en estos casos comparando las combinaciones A x B para cada combinación C x D.

En los tratamientos no inoculados ambos cultivares respondieron de forma similar a la fertilización mineral nitrogenada, con incrementos significativos en el rendimiento, hasta estabilizarse con la dosis de nitrógeno de 90 kg ha^{-1} , menos con el año 1 en el cultivar 'INIVIT B-2-2005' caso en que el rendimiento decrece con la dosis 120 kg ha^{-1} . Con la dosis 90 kg ha^{-1} se obtuvieron rendimientos altos, entre 28 y 35 t ha^{-1} (Tabla 7) dependientes del año, pero no de los cultivares y con los mayores rendimientos en el segundo año.

En presencia de la inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11 también se encontró en ambos cultivares y años, un incremento de los rendimientos por la fertilización, pero hasta la dosis de 60 kg ha^{-1} , en la cual además se obtuvieron las mayores respuestas a la inoculación, con incrementos entre $5,4$ y $11,3 \text{ t ha}^{-1}$, siendo mayores en los años con menores rendimientos y menores valores del tratamiento homólogo no inoculado. Los rendimientos alcanzados, con esta dosis, fueron altos y similares ($P \leq 0,05$) a los obtenidos con 90 kg ha^{-1} , en ausencia de la inoculación, con excepción de los obtenidos con el cultivar 'INIVIT B-2-2005' en que en el primer año incluso fueron superiores. Asimismo, los rendimientos fueron mayores ($P \leq 0,05$) en el segundo año y sin diferencias significativas entre los cultivares.

Tabla 7. Efecto de la fertilización nitrogenada y la inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11, en el rendimiento de raíces tuberosas comerciales, de dos clones de boniato cultivados en época lluviosa. Desdoblamiento de la interacción A x B x C x D

Cultivar Año	Rendimiento (t ha ⁻¹)									
	con HMA					sin HMA				
	N-0	N-30	N-60	N-90	N-120	N-0	N-30	N-60	N-90	N-120
'INIVIT B-2-2005' Año 1	15,01 e	21,84 d	32,83 a	30,25 ab	30,14 ab	8,57 f	16,08 e	21,49 d	29,03 b	25,95 c
'CEMSA 78-354' Año 1	16,15 e	21,10 d	31,75 a	29,84 a	28,59 ab	9,16 f	16,78 e	22,58 cd	28,55 ab	25,92 bc
'INIVIT B-2-2005' Año 2	25,21 c	32,29 b	36,79 a	35,38 a	35,17 a	23,59 c	27,08 c	31,44 b	34,58 ab	33,44 ab
'CEMSA 78-354' Año 2	26,70 c	32,92 b	36,58 a	36,13 a	35,71 ab	24,02 d	28,59 bc	31,13 b	35,21 ab	34,79 ab
Es $\bar{x} \pm A \times B \times C \times D$	0,90**									

*La comparación entre medias de tratamientos de diferentes filas, se realizó a partir intervalo de confianza (IC) para $P \leq 0,05$, utilizando el percentil de la prueba de Tukey. Las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > 2 \times$ (intervalo de confianza) (I.C).

Leyenda: Factor A (HMA); Factor B (dosis de N); Factor C (cultivares); Factor D (años). N-0: sin fertilizante N, N-30:30 kg ha⁻¹ de N, N-60:60 kg ha⁻¹ de N, N-90: 90 kg ha⁻¹ de N, N-120: 120 kg ha⁻¹ de N. HMA: inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11. Todos los tratamientos recibieron un fondo fijo de 75 y 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y K₂O, respectivamente.

Tabla 8. Efecto de la fertilización nitrogenada y la inoculación con *R. irregular*/INCAM-11, en la frecuencia de colonización (A) y esporas totales (B), de dos clones de boniato cultivados en época lluviosa. Desdoblamiento de la interacción A x B x C x D

I. Cultivar Año	Colonización total (%)									
	HMA					sin HMA				
	N-0	N-30	N-60	N-90	N-120	N-0	N-30	N-60	N-90	N-120
'INIVIT B-2-2005' Año 1	56,50 d	62,50 b	71,25 a	59,25 c	40,25 e	9,00 g	9,75 fg	10,50 f	11,75 f	10,25 f
'CEMSA 78-354' Año 1	53,00 c	60,25 b	68,75 a	55,25 c	38,75 d	8,50 f	9,25 ef	10,75 ef	11,75 e	11,00 ef
'INIVIT B-2-2005' Año 2	58,75 c	65,00 b	76,75 a	61,25 c	46,00 d	8,50 f	9,25 ef	10,50 ef	12,25 e	11,25 ef
'CEMSA 78-354' Año 2	57,25 c	64,25 b	75,25 a	62,00 b	43,75 d	8,75 f	9,50 ef	10,75 ef	12,25 e	11,25 ef
Es $\bar{x} \pm A \times B \times C \times D$	0,66**									

II. Cultivar Año	Esporas totales en 50 g de suelo									
	HMA					Sin HMA				
	N-0	N-30	N-60	N-90	N-120	N-0	N-30	N-60	N-90	N-120
'INIVIT B-2-2005' Año 1	420,75 d	521,54 c	628,36 a	535,35 b	394,75 e	61,58 i	73,25 h	93,38 fg	96,17 f	83,50 gh
'CEMSA 78-354' Año 1	394,75 e	483,30 c	558,13 a	514,63 b	420,83 d	66,85 h	77,15 h	97,70 g	101,38 f	96,45 g
'INIVIT B-2-2005' Año 2	425,68 d	532,65 c	659,20 a	552,50 b	406,55 e	63,70 i	73,91 hi	88,33 fg	96,48 f	83,60 gh
'CEMSA 78-354' Año 2	433,15 d	455,38 c	587,25 a	491,00 b	426,48 d	65,88 f	76,68 f	94,78 e	98,48 e	92,95 e
Es $\bar{x} \pm A \times B \times C \times D$	2,75**									

*La comparación entre medias de tratamientos de diferentes filas, se realizó a partir del intervalo de confianza (IC) para $P \leq 0,05$, utilizando el percentil de la prueba de Tukey. Las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > 2$ (IC).

Leyenda: Factor A (HMA); Factor B (dosis de N); Factor C (cultivares); Factor D (años). N-0: sin fertilizante N, N-30:30 kg ha⁻¹ de N, N-60:60 kg ha⁻¹ de N, N-90: 90 kg ha⁻¹ de N, N-120: 120 kg ha⁻¹ de N. HMA: inoculación con *R. irregular*/INCAM-11. Todos los tratamientos recibieron un fondo fijo de 75 y 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y K₂O, respectivamente.

La respuesta positiva a la inoculación también se encontró en la frecuencia de colonización micorrízica y en el conteo de esporas (Tabla 8 I y II), presentando ambos indicadores incrementos significativos, con la aplicación del fertilizante nitrogenado hasta la dosis de 60 kg ha⁻¹; dosis inferiores o superiores presentaron siempre valores significativamente menores ($P \leq 0,05$).

En el caso de la frecuencia de colonización los menores valores se obtuvieron siempre con la aplicación de la dosis superior de fertilizante, mientras que en las esporas los menores valores fueron encontrados tanto en los tratamientos sin aplicación de fertilizantes como con la mayor dosis de estos, con ligeras diferencias entre los mismos, pero sin seguir un patrón definido.

En el segundo año y coincidente con los mayores rendimientos, se encontraron en cada cultivar los valores superiores ($P \leq 0,05$) de ambos indicadores, mientras que las esporas contadas presentó además valores siempre superiores asociados al cultivar 'TNIVIT B-2-2005'.

En los tratamientos inoculados y en el rango de fertilización (0 a 60 kg ha⁻¹ de N), con respuesta creciente del rendimiento a la fertilización y a los indicadores del funcionamiento micorrízico, se obtuvieron altos coeficientes de correlación e índices de determinación entre la frecuencia de colonización y el rendimiento (Figura 1 A), así como entre la frecuencia de colonización y las esporas contadas (Figura 1 B); de forma tal que los mayores rendimientos se asociaron con las mayores frecuencias de colonización, una asociación similar se encontró entre la frecuencia de colonización y las esporas. Para cada dosis de fertilizante nitrogenado los valores de los indicadores de funcionamiento y de rendimiento se agruparon diferenciadamente y manteniendo las relaciones entre porcentajes de colonización y rendimientos y con las esporas anteriormente descritas.

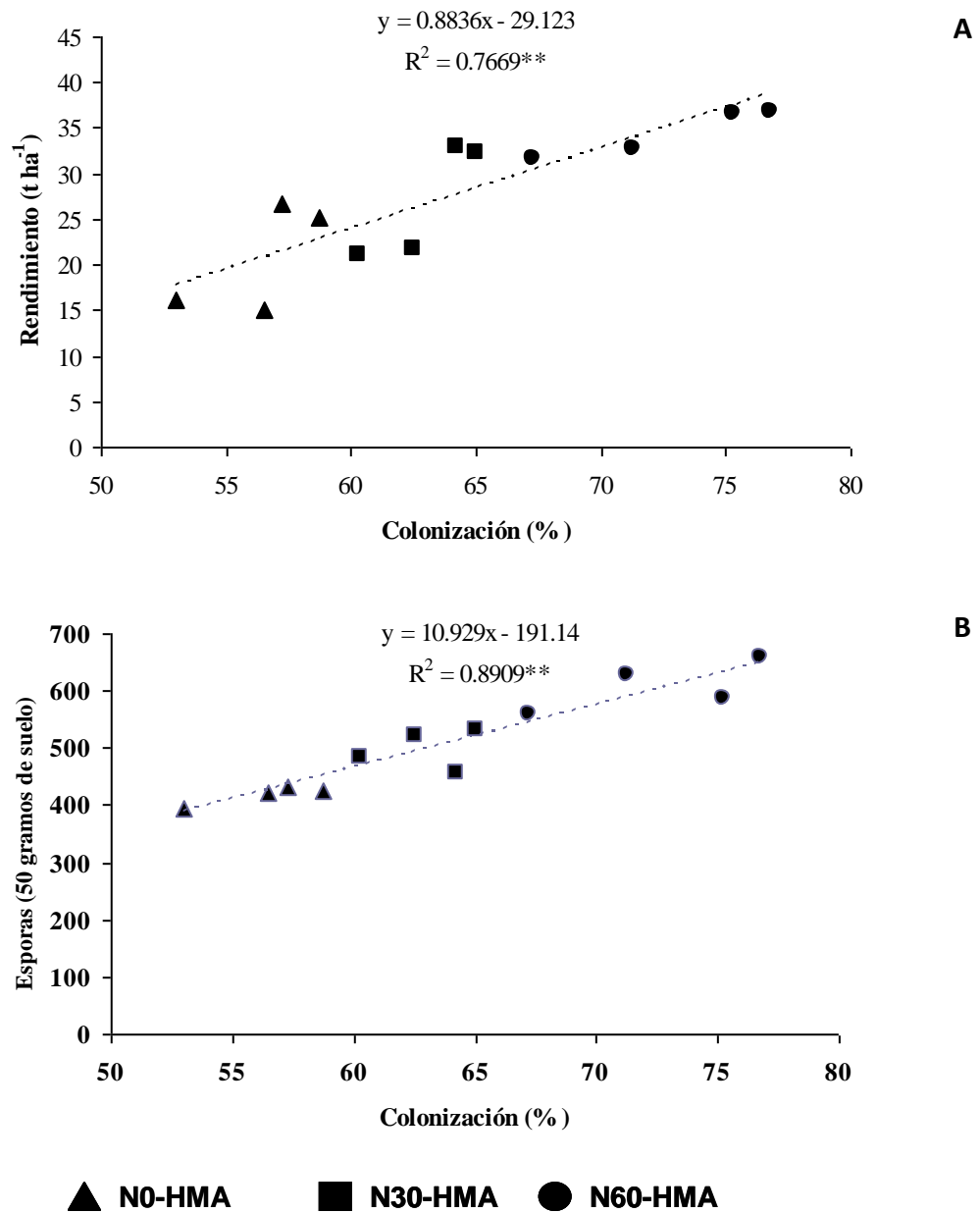


Figura 1. Relaciones entre la frecuencia de colonización y rendimientos (A) y entre la frecuencia de colonización y conteo de esporas en 50 g (B) para ambos cultivares, en los tratamientos inoculados con las dosis de 0, 30 y 60 $kg\ ha^{-1}$ de N, durante la época lluviosa

En la tabla 9 se presentan los resultados de los ANOVA realizados a las concentraciones de N (g kg^{-1}) en hojas, tallos y raíces tuberosas en el momento de cosecha y correspondientes al mejor tratamiento cuando solo se aplicó fertilizante N (90 N), al mejor tratamiento en presencia de la inoculación micorrízica (60 N + HMA), así como el homólogo no inoculado de este último (60 N). En las hojas y tallos además de presentar efecto de los factores A (tratamientos seleccionados) y B (cultivares), las interacciones entre ambos fueron significativas. En las raíces tuberosas solo se encontró efecto significativo en el factor A (tratamientos seleccionados). En ninguno de los órganos el factor años fue significativo, ni la interacción tratamientos seleccionados x cultivares x años.

Tabla 9. Efecto de la fertilización nitrogenada y la inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11 en las concentraciones de nitrógeno de diferentes órganos de dos cultivares de boniato, plantados en época lluviosa (muestreo en cosecha)

Tratamientos seleccionados	'INIVIT B-2-2005'	'CEMSA 78-354'	'INIVIT B-2-2005'	'CEMSA 78-354'	Raíces tuberosas
	Hoja		Tallo		
	Concentración de N (g kg ⁻¹)				
60 N	30,80 d ± 0,27	30,89 d ± 0,27	12,64 c ± 0,22	12,52 c ± 0,22	18,47 c ± 0,18
60 N + HMA	35,06 a ± 0,27	33,85 b ± 0,27	15,00 b ± 0,22	16,57 a ± 0,22	21,39 a ± 0,18
90 N	32,33 c ± 0,27	32,21 c ± 0,27	13,34 d ± 0,22	13,98 c ± 0,22	20,97 b ± 0,18
Es \bar{x} A x B	0,14**		0,11**		0,09**

*Letras diferentes en los valores correspondientes a cada órgano conllevan a diferencias significativas, a partir de la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$). Factor A (tratamientos seleccionados), Factor B (cultivares). El intervalo de confianza a ($P \leq 0,05$) se calculo utilizando el percentil de Tukey. La comparación entre medias de los diferentes órganos utilizando los intervalos de confianza, las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > IC_1 + IC_2$.

La respuesta positiva a la inoculación se expresó en que las concentraciones de nitrógeno, en los diferentes órganos del mejor tratamiento inoculado (60 N + HMA), fueron siempre superiores ($P \leq 0,05$) a los obtenidos con los otros tratamientos. En ausencia de la inoculación, en consonancia con las diferencias obtenidas en los rendimientos, las concentraciones con la dosis de 90 kg ha^{-1} de nitrógeno fueron siempre superiores, a las alcanzadas con la dosis de 60 kg ha^{-1} de N (Tabla 7). Las mayores concentraciones de nitrógeno se presentaron en las hojas, seguidas de las raíces tuberosas y de los tallos, con

diferencias significativas para cada órgano. El tratamiento inoculado (60 N + HMA) presentó concentraciones superiores en las hojas para el cultivar 'INIVIT B-2-2005' y a su vez menores en los tallos, al compararlo con los resultados del cultivar 'CEMSA 78-354', aunque no se encontraron diferencias entre los cultivares en los tratamientos que solo recibieron fertilizantes. En las raíces tuberosas no se encontró efecto de los cultivares en ningún tratamiento.

Los incrementos en las concentraciones de nitrógeno obtenidos por la inoculación en el mejor tratamiento (60 N + HMA), al compararlos con las respectivas concentraciones del homólogo no inoculado, oscilaron entre 10 y 32 % dependiente del órgano y cultivar.

Experimento 2. Resultados en la época poco lluviosa

Los análisis estadísticos de las variables rendimiento, frecuencia de colonización micorrízica total y esporas contadas totales, en 50 g de suelo (Tabla 10), mostraron un efecto significativo de los factores inoculación HMA y dosis en todas las variables, mientras que los factores cultivares y años fueron significativos en dependencia de la variable evaluada. Los términos de interacción de máximo orden no fueron significativos y se presentan los resultados de la mayor interacción significativa encontrada para cada variable y en que se encuentren presentes los factores A (inoculación HMA) y B (dosis de fertilizante N). Para simplificar la interpretación de estos resultados en las variables frecuencia de colonización y conteo de esporas en que la interacción A x B x C fue significativa, se procedió al desdoblamiento de dicha interacción, en estos casos comparando las combinaciones A x B para cada nivel del factor C.

Los principales resultados obtenidos en las diferentes variables evaluadas fueron similares a los ya presentados en la época lluviosa. En los tratamientos no inoculados se encontró una

Tabla 10. Experimento 2. Valor P de los diferentes factores y términos de interacción, en los ANOVA realizados para las variables rendimiento, frecuencia de colonización micorrízica total y esporas contadas, en la época poco lluviosa

Origen	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Colonización (%)	Esporas (50 g de suelo)
Modelo corregido	0,000	0,000	0,000
Intersección	0,000	0,000	0,000
A	0,000	0,000	0,000
B	0,000	0,000	0,000
C	0,568 N.S	0,000	0,000
D	0,000	0,220 N.S	0,228 N.S
A x B	0,000	0,000	0,000
A x C	0,484 N.S	0,000	0,000
A x D	0,965 N.S	0,232 N.S	0,147 N.S
B x D	0,000	0,710 N.S	0,001
B x C	0,039 N.S	0,000	0,000
C x D	0,735 N.S	0,787 N.S	0,286 N.S
A x B x C	0,897 N.S	0,000	0,000
B x C x D	0,361 N.S	0,997 N.S	0,675 N.S
A x B x C x D	0,192 N.S	0,733 N.S	0,055 N.S

Leyenda: Factor A: Inoculación micorrízica con dos niveles (con y sin inoculación); Factor B: Dosis de fertilización mineral nitrogenada con cinco niveles (0, 30, 60, 90 y 120 kg ha⁻¹ respectivamente); Factor C: Cultivar de boniato con dos niveles ('INIVIT B-2-2005' y 'CEMSA 78-354') y Factor D: Años evaluados con dos niveles (Año 1 y 2).

respuesta creciente del rendimiento a la fertilización y la dosis óptima de fertilización nitrogenada fue de 90 kg ha⁻¹ de N, alcanzando rendimientos entre 28 y 29,75 t ha⁻¹, sin diferencias entre cultivares y años (Figura 2).

Dosis superiores a 90 kg ha⁻¹ de N provocaron un ligero decrecimiento en el rendimiento. En los tratamientos inoculados se encontró una respuesta creciente ($P \leq 0,05$) a la fertilización nitrogenada hasta la dosis de 60 kg ha⁻¹ de N, con un ligero decrecimiento de los rendimientos a dosis superiores, pero alcanzando rendimientos superiores que los obtenidos al aplicar dosis inferiores a 60 kg ha⁻¹ de N.

Los rendimientos obtenidos en el tratamiento (60 N + HMA) oscilaron entre 30 y 32 t ha⁻¹ y fueron significativamente superiores ($P \leq 0,05$) a los mayores obtenidos en los tratamientos no inoculados. Los incrementos por efecto de la inoculación y la aplicación de la dosis 60

kg ha⁻¹ de N oscilaron entre 3,6 y 5,1 t ha⁻¹. En presencia de la inoculación no se encontraron diferencias entre los cultivares, ni entre los años.

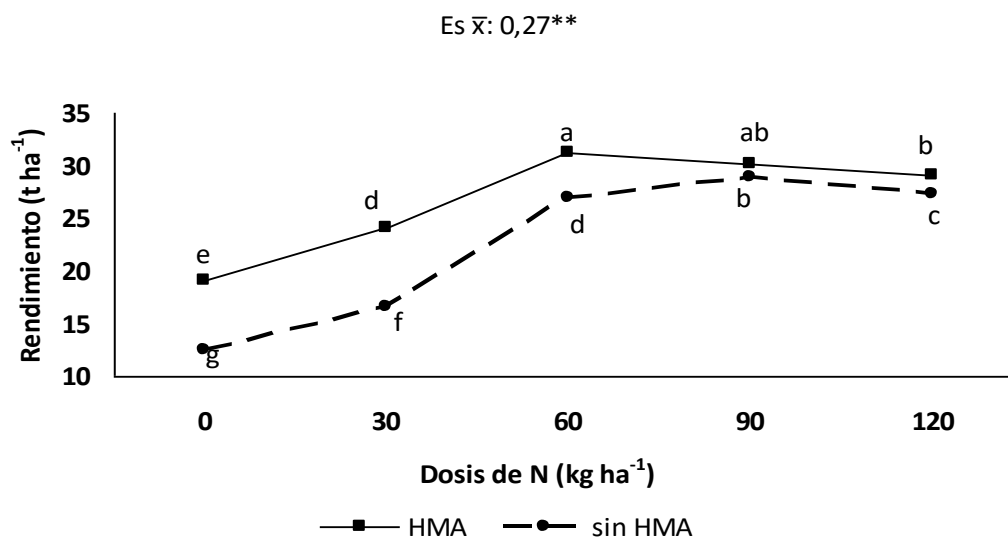


Figura 2. Efectos de la inoculación con *R. irregularis*/INCAM-11 y dosis de fertilizante nitrogenado en el rendimiento de dos cultivares de boniato, en la época poco lluviosa.

Tratamientos con letras desiguales difieren por Tukey para $P \leq 0,05$

La inoculación de *R. irregularis*/INCAM-11 incrementó la frecuencia de colonización y las esporas en los tratamientos inoculados con respecto a los no inoculados (Tabla 11 I y II), con una respuesta creciente y significativa a la fertilización nitrogenada hasta la dosis de 60 kg ha⁻¹, en la cual se alcanzaron valores alrededor de 70 % y entre 550 y 570 esporas en 50 g de suelo. Dosis superiores redujeron significativamente estos indicadores del funcionamiento micorrízico. Tanto la frecuencia de colonización como las esporas en el tratamiento de 120 kg ha⁻¹ fueron inferiores a los alcanzados en ausencia de fertilización nitrogenada, aunque la disminución fue más marcada para la frecuencia de colonización.

En los tratamientos inoculados no se encontraron diferencias en la frecuencia de colonización por efecto de los cultivares y años. En las esporas si bien los años no causaron variación, los conteos obtenidos en el tratamiento de 60 kg ha⁻¹ de N fueron superiores ($P \leq 0,05$) en el cultivar 'TNIVIT B-2-2005'. Es de señalar que en este tratamiento se

Tabla 11. Efecto de la fertilización nitrogenada y la inoculación con *R. irregular*/INCAM-11, en la frecuencia de colonización (A) y esporas totales (B) de dos clones de boniato (C), cultivados en época poco lluviosa. Desdoblamiento de la interacción A x B x C, combinaciones de A x B para cada nivel del factor C

I.	Colonización total (%)									
	HMA					sin HMA				
Cultivar	N-0	N-30	N-60	N-90	N-120	N-0	N-30	N-60	N-90	N-120
'INIVIT B-2-2005'	52,75 c	62,00 b	71,38 a	60,13 b	41,75 d	8,38 f	9,63 f	10,38 ef	12,10 e	10,38 ef
'CEMSA 78-354'	51,38 c	61,63 b	69,38 a	53,13 c	39,75 d	8,13 f	9,13 f	10,13 ef	11,63 e	10,38 ef
Es $\bar{x} \pm A \times B \times C$	0,57**									

II.	Esporas totales (50 g de suelo)									
	HMA					sin HMA				
Cultivar	N-0	N-30	N-60	N-90	N-120	N-0	N-30	N-60	N-90	N-120
'INIVIT B-2-2005'	419 d	473 c	573 a	508 b	404 e	64 j	71 i	87 g	95 f	83 h
'CEMSA 78-354'	415 d	474 c	548 a	503 b	399 e	63 j	70 i	87 g	95 f	83 h
Es $\bar{x} \pm A \times B \times C$	1,58**									

*La comparación entre medias de tratamientos, de diferentes filas, se realizó a partir intervalo de confianza (I.C) para $P \leq 0,05$, utilizando el percentil de la prueba de Tukey. Las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > 2 \times (IC)$.

Leyenda: Factor A (HMA); Factor B (dosis de N); Factor C (cultivares); Factor D (años). N-0: sin fertilizante N, N-30: 30 kg ha⁻¹ de N, N-60: 60 kg ha⁻¹ de N, N-90: 90 kg de N ha⁻¹, N-120: 120 kg ha⁻¹ de N. HMA: inoculación con *R. irregular*/INCAM-11. Todos los tratamientos recibieron un fondo fijo de 75 y 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y K₂O, respectivamente.

presentaron los mayores indicadores de funcionamiento y de rendimiento.

En estos tratamientos y en el rango de fertilización (0 a 60 kg de N ha⁻¹), con respuesta creciente del rendimiento y de los indicadores del funcionamiento micorrízico a la fertilización, se obtuvieron altos coeficientes de determinación ($R^2 = 0,7633^{***}$) entre la frecuencia de colonización y el rendimiento (Figura 3 A), así como entre la frecuencia de colonización y el número de esporas contadas con $R^2 = 0,96^{***}$, (Figura 3 B). Cada dosis de fertilizante N se asoció con un rango de funcionamiento y rendimiento, de forma tal que con el incremento de las dosis, mayores fueron los valores de funcionamiento micorrízico, con diferencias significativas entre las dosis (Figura 2, Tablas 11 I y II). Asimismo, para cada dosis de fertilización los mayores porcentajes de colonización se asociaron con los mayores rendimientos y de forma similar con las esporas.

En los tratamientos no inoculados la frecuencia de colonización y las esporas fueron muy inferiores y del orden del 17 % de los mayores encontrados en los tratamientos inoculados, los valores superiores se encontraron en presencia de la dosis de 90 kg ha⁻¹ de fertilizante nitrogenado, con la cual también se obtuvieron los mayores rendimientos (Figura 2).

Las concentraciones de nitrógeno en los diferentes órganos muestreados en la cosecha (Tabla 12) presentaron varias características: 1) fueron mayores en las hojas, seguido después en raíces tuberosas y por último en los tallos y con diferencias significativas entre cada una de estas; 2) en todos los órganos los mayores valores se asociaron al tratamiento (60 N + HMA) con diferencias significativas tanto con el homólogo no inoculado, como con el tratamiento no inoculado que recibió la dosis óptima de fertilizante nitrogenado.

Los años no fueron causa de variación y solo en la hojas y en el tratamiento (60 N + HMA) se encontró un ligero efecto a favor del cultivar 'TNIVIT B-2-2005', lo cual también fue observado en este órgano en la época lluviosa.

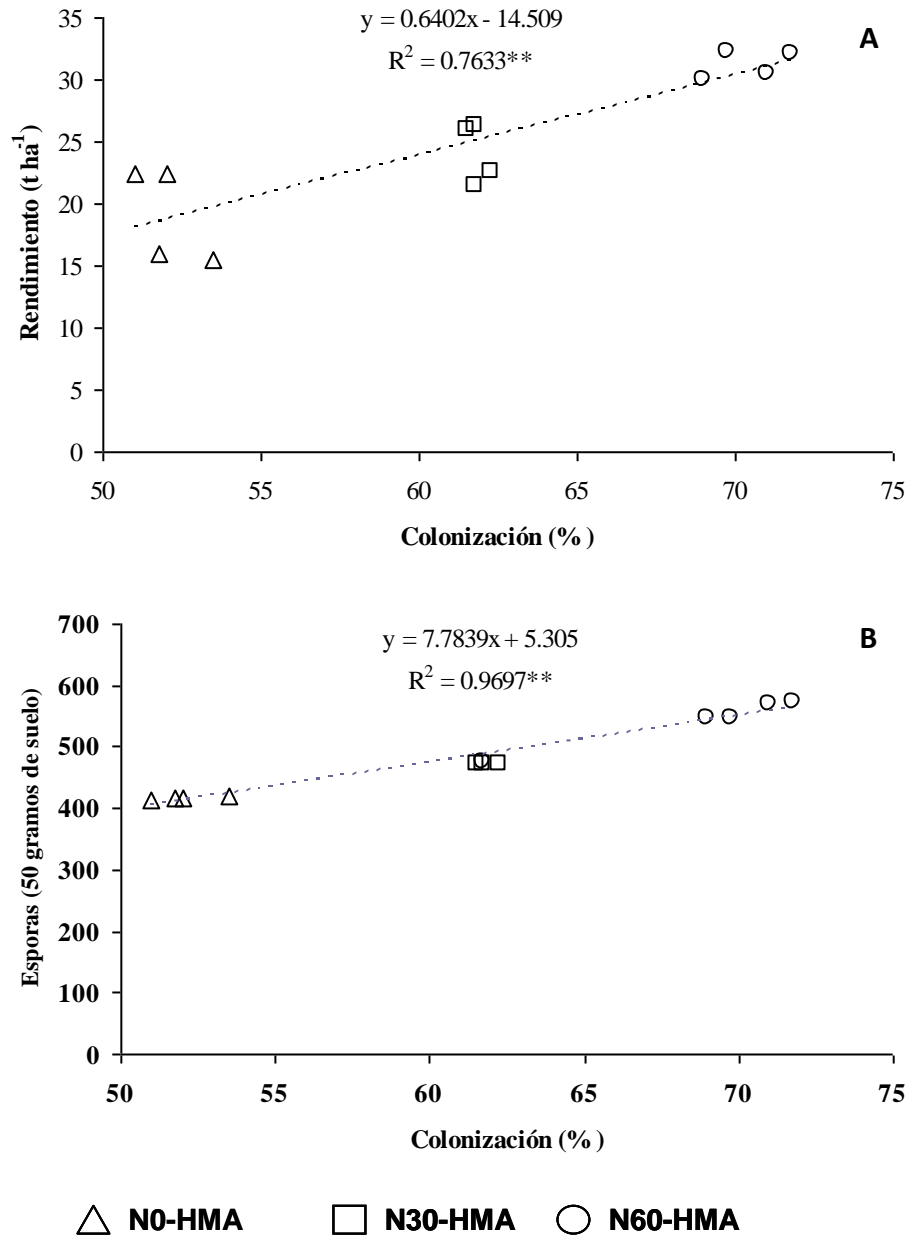


Figura 3. Relaciones entre la frecuencia de colonización y rendimientos (A) y entre la frecuencia de colonización y conteo de esporas en 50 g de suelo (B) para ambos cultivares, en los tratamientos inoculados con las dosis de 0, 30 y 60 kg ha⁻¹ de N, durante la época poco lluviosa

Tabla 12. Efecto de la fertilización nitrogenada y la inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11 (tratamientos seleccionados) en las concentraciones de nitrógeno de diferentes órganos de dos cultivares de boniato, plantados en época poco lluviosa (muestreo en cosecha)

Tratamientos seleccionados	'INIVIT B-2- 2005'	'CEMSA 78- 354'	Tallos	Raíces tuberosas
	Hojas			
	Contenido de N (g kg ⁻¹)			
60 N	29,73 e ± 0,20	30,20 d ± 0,20	12,46 c ± 0,12	18,47 c ± 0,10
60 N + HMA	32,68 a ± 0,20	32,08 b ± 0,20	15,78 a ± 0,12	21,39 a ± 0,10
90 N	31,73 c ± 0,20	31,84 c ± 0,20	13,57 b ± 0,12	20,97 b ± 0,10
Es $\bar{x} \pm$	0,10**		0,06**	0,05**

*Letras diferentes en los valores correspondientes a cada órgano conllevan a diferencias significativas a partir de la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$). Factor A (tratamientos seleccionados), Factor B (cultivares). El intervalo de confianza a ($P \leq 0,05$) se calculó utilizando el percentil de Tukey. La comparación entre medias de los diferentes órganos utilizando los intervalos de confianza, las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > IC_1 + IC_2$.

A manera de resumen, los incrementos obtenidos en las concentraciones de nitrógeno en el mejor tratamiento inoculado (60 N + HMA), al compararlos con las concentraciones del homólogo no inoculado, oscilaron entre 6 y 32 % dependiente del órgano y el cultivar.

Efecto de la época sobre el rendimiento, las concentraciones de nitrógeno e indicadores del funcionamiento micorrízico

En la tabla 13 se presentan los efectos de la época en los experimentos 1 y 2 evaluado a través del tratamiento 60 N + HMA, que se corresponde con el tratamiento que presentó los mayores rendimientos y los mayores valores en los indicadores de funcionamiento micorrízico en ambas épocas (Tablas 7, 8, 11 y Figura 2). En cualquiera de las tres variables se encontraron los mayores valores ($P \leq 0,05$), en el segundo año de la época lluviosa. En el rendimiento y la frecuencia de colonización, no se encontraron diferencias entre el resto de las combinaciones época x año; sin embargo, el conteo de esporas en el primer año de la época lluviosa, aunque menor que en el segundo año, fue mayor que los obtenidos en la época poco lluviosa.

En relación con el efecto de las épocas sobre las concentraciones de nitrógeno en los diferentes órganos del cultivo y evaluado en el mismo tratamiento 60 N+ HMA (Tabla

14), se encontró que los años ni los cultivares ejercieron efectos significativos y a su vez solo las concentraciones en las hojas fueron significativamente mayores en la época lluviosa, en el resto de los órganos las concentraciones en ambas épocas resultaron similares.

Tabla 13. Efecto de las épocas sobre el rendimiento, frecuencia de colonización y conteo de esporas, en el tratamiento 60 N + HMA.

Años	Rendimiento t ha ⁻¹		Colonización %		Esporas 50 g de suelo	
	Lluviosa	Poco lluviosa	Lluviosa	Poco lluviosa	Lluviosa	Poco lluviosa
Año 1	32,29 ± 1,80	31,40 ± 1,54	70,0 ± 1,32	70,8 ± 1,14	593 ± 5,50	561 ± 3,16
Año 2	36,70 ± 1,80	30,52 ± 1,54	76,0 ± 1,32	70,0 ± 1,14	623 ± 5,50	560 ± 3,16

Medias e intervalos de confianza ($P \leq 0,05$) tomados de las tablas 7, 8, 11 y Figura 2. En el ANOVA específico realizado para la información presentada no fue significativo el factor cultivar.

Tabla 14. Efecto de las épocas, en las concentraciones de nitrógeno (g kg⁻¹), en el boniato inoculado con *R. irregulare*/INCAM-11 en el tratamiento 60 N + HMA.

Hojas		Tallo		Raíces tuberosas	
Lluviosa	Poco lluviosa	Lluviosa	Poco lluviosa	Lluviosa	Poco lluviosa
34,5 ± 0,27	32,4 ± 0,20	15,8 ± 0,22	15,8 ± 0,12	21,4 ± 0,18	21,4 ± 0,10

Tabla elaborada a partir de la información de las tablas 9 y 12. En el ANOVA específico realizado para la información presentada no fueron significativos los factores cultivar y años.

Influencia de la inoculación con HMA, en la Eficiencia Agronómica (EA) del fertilizante nitrogenado

En la figura 4 se presenta la EA obtenida para los mejores tratamientos de los experimentos 1 y 2 en presencia o no de la inoculación y que se corresponden con la aplicación de 60 kg ha⁻¹ de N en presencia de la inoculación (60 N + HMA) y de 90 kg ha⁻¹ en ausencia de esta (90 N), para las diferentes combinaciones de épocas x cultivar x año.

Se puede observar como la EA está inversamente relacionada con el rendimiento del tratamiento testigo, es decir mientras mayor sea el rendimiento obtenido en el tratamiento testigo menor será la EA; no obstante, en cualquiera de las combinaciones época-cultivares-años, la EA obtenida en el tratamiento inoculado (60N+HMA), fue superior a la encontrada en el tratamiento no inoculado que recibió la dosis óptima de fertilizante nitrogenado

(90N), con incrementos entre 68 y 80 %.

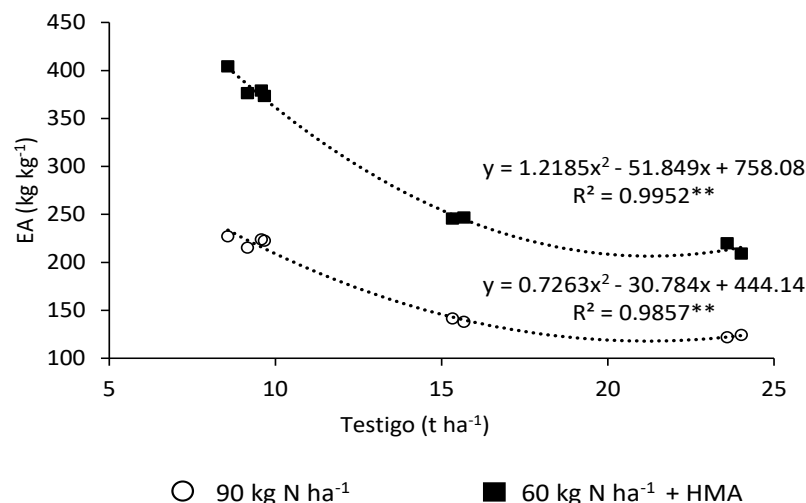


Figura 4. Experimentos 1 y 2. Eficiencia agronómica (EA) del fertilizante nitrogenado para los tratamientos más productivos en presencia y ausencia de la inoculación vs el rendimiento del tratamiento testigo, en cada una de las combinaciones época-cultivares-años.

Discusión: No hay dudas de la participación de los HMA en la nutrición de las plantas y si bien siempre se ha reconocido la importancia sobre los elementos que se mueven en el suelo por difusión, ya a partir de la última década del pasado siglo se comenzó a dejar establecidos los efectos directos en la nutrición nitrogenada (Clarke y Zeto, 1996; Govindarajulu *et al.*, 2005; Walter *et al.*, 2012; Pellegrino *et al.*, 2015). Si bien la mayoría de las informaciones asociaron la absorción preferentemente con la forma amónica, con la cual se presentan menos costos de energéticos, también existen trabajos que dejan claro la absorción de los nitratos (Govindarajulu *et al.*, 2005; Piao *et al.*, 2012) y en última instancia dependerá de si el nitrógeno es un elemento limitante para el cultivo y si existe o no limitación en el carbono (Hodge y Storer, 2015).

Todo lo anterior es importante, ya que en las condiciones de Cuba con altas temperaturas y en cultivos bajo riego o época lluviosa, la nitrificación es alta y en siete días prácticamente el 100 % de las aplicaciones localizadas de 60 kg ha⁻¹ de N como (NH₄)₂SO₄, pasan a forma

de nitratos (Rivera y Treto, 1989), predominando por tanto la forma nitratos en los agrosistemas fertilizados. Si bien los nitratos son más propensos al lavado, los beneficios de las micorrizas también se expresan disminuyendo el lavado de los nutrientes y en específico de los nitratos (Asghari y Cavagnaro, 2011; Parihar *et al.*, 2019).

Por tanto, no es de extrañar la respuesta alta del boniato a la inoculación de la cepa eficiente y que con su aplicación se garanticen los mayores rendimientos con solo el 66 % de la fertilización nitrogenada. Es de señalar que los rendimientos obtenidos fueron comparables con los mayores obtenidos en Cuba (Ruíz *et al.*, 2012).

Internacionalmente parecen escasos los trabajos publicados en que se estudió la respuesta a la inoculación micorrízica, mediante el uso de curvas de respuesta a la fertilización de un macronutriente en presencia de fondos fijos de los otros dos restantes; sin embargo, en Cuba varios autores utilizando este esquema de trabajo y en diferentes cultivos como braquiarias, yuca , banano y maíz, han reportado disminuciones entre 30 y 50 % de las necesidades de fertilizante nitrogenado para obtener rendimientos altos y similares a los obtenidos con el 100 % de la fertilización (González, 2014; Ruíz *et al.*, 2016 a y b; Rivera *et al.*, 2017) y con este resultado se incorpora el cultivo del boniato. Incluso en el caso de dos especies de *Urochloa* (braquiarias) esta respuesta positiva a la inoculación, se ha obtenido en condiciones de no respuesta a la fertilización fosfórica, sugiriendo el efecto directo de la micorrización en la toma de nitrógeno.

En ninguno de los reportes anteriores se estudió estrictamente el efecto de la época, no obstante resultó interesante como en la época de plantación lluviosa con mayores temperaturas si bien el cultivo alcanzó mayores rendimientos y mayor funcionamiento micorrízico; sin embargo, las dosis óptimas encontradas en ambas épocas, tanto en presencia de la inoculación como en ausencia de esta, fueron respectivamente, similares. Lo anterior puede ser consecuencia de

varios factores: 1) la separación entre las dosis estudiadas no permitió que las diferencias en el rendimiento entre las épocas conllevaran a requerimientos de fertilizantes diferentes y 2) en la época lluviosa si bien el cultivo creció más y extrajo más nitrógeno, también pudo explorar un mayor volumen de suelo, debió existir mayor mineralización del N orgánico y probablemente mayores cantidades de N del suelo fueron absorbidas que en la época poco lluviosa y los efectos ocasionados por estos factores pudieron compensarse.

El efecto de la aplicación de fertilizante nitrogenado para los tratamientos inoculados y en el rango de dosis con respuesta positiva, desde 0 a 60 kg ha⁻¹ de N, vinculó los mayores rendimientos obtenidos por los cultivares, con los mayores valores en la frecuencia de colonización y esporas, así como una relación unívoca entre la frecuencia de colonización y los rendimientos e indicando como la dosis de 60 kg ha⁻¹ de N, fue necesaria para alcanzar los mayores valores de funcionamiento micorrízico y permitió al cultivo alcanzar los mayores valores de rendimiento.

De forma general una relación positiva entre el porcentaje de colonización micorrízica y los rendimientos ha sido obtenida trabajando con diferentes meta-análisis (Lekberg y Koide, 2005; Lehmann *et al.*, 2012; Pellegrino *et al.*, 2015) estableciendo la importancia del funcionamiento micorrízico en la respuesta agroproductiva de las plantas; aunque diferentes especies (Tawarayama, 2003) e incluso cultivares de la misma especie (Turrini *et al.*, 2016; Martín-Robles *et al.*, 2017) pueden presentar diferentes grados de colonización y de respuesta micorrízica, no resultó este el caso aquí presente, en que se utilizaron dos cultivares, con respuestas positivas y similares a la inoculación de la cepa eficiente.

Si bien dosis superiores de fertilizantes a los 60 kg ha⁻¹ de N limitaron el funcionamiento micorrízico, no disminuyeron significativamente los rendimientos, posiblemente asociado a que el cultivo en esas condiciones, se nutrió por vía del sistema radicular a expensas de las

mayores dosis de fertilizante y con menor eficiencia. Resultados similares han sido planteados por (Rivera y Fernández, 2003).

El positivo efecto de la inoculación sobre la disminución del suplemento de nutrientes ha sido descrito por diversos autores y es consecuencia de que el funcionamiento micorrízico, se asocia con condiciones subóptimas de suministro de nutrientes e inherente al rol de las micorrizas como solución de adaptación en los ecosistemas (Hamel y Plenchete, 2017) y a la vez ha sido encontrado en los trabajos de manejo de la fertilización, en cultivos inoculados, con cepas eficientes en diferentes condiciones edáficas en el país (Rivera y Fernández, 2003; González, 2014; Ruíz *et al.*, 2016 a y b) y en este trabajo se agregaron las evaluaciones de EA que cuantificaron los incrementos en eficiencia alcanzados por la inoculación, en los tratamientos con un funcionamiento micorrízico óptimo.

En este tipo de experimento de curvas de respuesta a la fertilización de un macronutriente, utilizando cultivares dependientes de la micorrización e inoculados con la cepa eficiente HMA, las dosis de fertilizante condicionaron la efectividad de la inoculación de la cepa eficiente, en coincidencia con los criterios planteados por Rivera y Fernández, (2003).

Las Figuras 3 A y 3 B reflejaron como se vincularon algunos de los factores que participan en el funcionamiento micorrízico: la cepa eficiente se seleccionó en base al ambiente edáfico, las dosis regularon la efectividad de la cepa eficiente y en presencia de la dosis adecuada, las diferencias en rendimiento entre los genotipos en función de las condiciones edafoclimáticas u otras que lo regulan, establecieron una relación directa con el funcionamiento micorrízico, un resultado explicable de acuerdo con los criterios de Kiers *et al.* (2011) de “recompensas mutuas” como base del funcionamiento micorrízico.

Correa *et al.* (2015) plantearon que los efectos directos de la micorrización sobre la nutrición del nitrógeno se comprueban, no solo por los efectos positivos en el rendimiento e

indicadores del funcionamiento, que pueden ser consecuencia de mejoras en la nutrición de otro elemento, sino por la respuesta o incrementos en las concentraciones de nitrógeno, en los tratamientos inoculados con relación a los homólogos no inoculados.

Thirkell *et al.* (2019) establecieron en cebada, la absorción del nitrógeno por las hifas micorrízicas y su relación con las dosis de fertilizante nitrogenado, utilizando ^{15}N en experimentos de campo; el esquema experimental utilizado por estos autores no permitió evaluar la participación de la vía simbiótica en la absorción total de nitrógeno, declarando la necesidad de realizar experimentos en condiciones de campo para evaluar la contribución del funcionamiento micorrízico en la nutrición nitrogenada de los cultivos.

La información obtenida en este trabajo, permitió establecer la participación directa del funcionamiento micorrízico vía inoculación de cepas eficientes, en la nutrición nitrogenada del boniato, en cualquiera de las dos épocas y para dos clones comerciales que se utilizan ampliamente en el país (MINAG, 2012a). Resultados similares han sido descritos en Cuba, con estos esquemas de curva de respuesta a la fertilización nitrogenada, en cultivos tales como pastos, yuca y banano (González, 2014; Ruíz *et al.*, 2016 a y b).

Si bien la respuesta en rendimiento, de los mejores tratamientos inoculados y no inoculados y consecuentemente su EA, disminuyeron en la medida que fueron mayores los rendimientos del tratamiento testigo (sin fertilización nitrogenada), se encontró siempre que la EA del tratamiento inoculado fue entre 60 a 80 % superior a la del tratamiento fertilizado no inoculado. Es de señalar que la EA en el tratamiento fertilizado y no inoculado fue alta de acuerdo con Stewart (2007) por lo que el efecto de la inoculación sobre la EA, no debe interpretarse de que se logró con relación a un esquema poco eficiente de fertilización nitrogenada (90 N). Los efectos sobre la EA corroboran los resultados alcanzados con las otras variables en ambas épocas y también puede considerarse como otro indicador de la

participación de las micorrizas en la productividad y nutrición nitrogenada del boniato.

4.1.2. Experimentos 3 y 4. Efecto de la inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11 en la respuesta y los requerimientos de fertilizante fosfórico de dos cultivares comerciales de boniato, en época lluviosa (experimento 3) y poco lluviosa (experimento 4)

Experimento 3. Resultados en la época lluviosa

Los análisis estadísticos de las variables rendimiento, frecuencia de colonización micorrízica y esporas en 50 g de suelo, mostraron un efecto significativo de todos los factores, así como todos los términos de interacción de mayor orden A x B x C x D fueron significativos a $P \leq 0,05$ (Tabla 15). Para simplificar la interpretación de los resultados se realizó en todos los casos, el desdoblamiento de la interacción de máximo orden comparando las combinaciones A x B para cada combinación C x D.

Tabla 15. Valor P de los diferentes factores y términos de interacción de los ANOVA de las variables rendimiento, frecuencia de colonización micorrízica y esporas contadas en 50 g de suelo en la época lluviosa (Experimento 3)

Origen	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Colonización (%)	Esporas en (50 g de suelo)
Modelo corregido	0,000	0,000	0,000
Intersección	0,000	0,000	0,000
A	0,000	0,000	0,000
B	0,000	0,000	0,000
C	0,000	0,000	0,000
D	0,000	0,002	0,000
A x B	0,020	0,000	0,000
A x C	0,000	0,000	0,000
A x D	0,000	0,000	0,000
B x D	0,000	0,000	0,000
B x C	0,925 N.S	0,000	0,000
C x D	0,000	0,146 N.S	0,266 N.S
A x B x C	0,945 N.S	0,000	0,000
B x C x D	0,025	0,583 N.S	0,363 N.S
A x B x C x D	0,013	0,024	0,005

Leyenda: Factor A: Inoculación micorrízica con dos niveles (con y sin inoculación); Factor B: Dosis de fertilización fosfórica con cinco niveles (0, 25, 50, 75 y 100 kg ha⁻¹); Factor C: Cultivares de boniato con dos niveles ('INIVIT B-2-2005' y 'CEMSA 78-354') y Factor D: Años evaluados con dos niveles (Año 1 y 2).

En la época lluviosa y en los tratamientos no inoculados, ambos cultivares respondieron a la

fertilización mineral, con incrementos crecientes en el rendimiento hasta las dosis de 75 kg ha⁻¹ de P₂O₅, con la cual se obtuvieron rendimientos altos entre 27 y 34 t ha⁻¹ (Tabla 16) dependientes del año, pero no de los cultivares y con los mayores rendimientos en el segundo año. Dosis superiores presentaron una tendencia a disminuir rendimientos que fue significativa en el primer año. Los rendimientos del tratamiento sin fertilizante fosfórico fueron superiores, entre 62 a 66 %, en el segundo año con relación al primero.

En presencia de la inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11, la respuesta a las dosis de fertilizante fosfórico fue similar en ambos cultivares y años, ya que siempre se presentó una respuesta creciente ($P \leq 0,05$) hasta la dosis de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅, con la cual se obtuvieron rendimientos altos (32,8 a 35 t ha⁻¹), numéricamente superiores a los máximos obtenidos en los tratamientos no inoculados, aunque las diferencias solo fueron significativas en el primer año.

En los tratamientos inoculados se encontró una respuesta creciente a la fertilización, sobre la frecuencia de colonización (17 I) y de esporas (17 II) hasta la dosis de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅, para cualquiera de los cultivares y años; dosis superiores o inferiores presentaron valores menores ($P \leq 0,05$). En el caso de la frecuencia de colonización, los menores valores se obtuvieron siempre con la aplicación de la dosis superior de fertilizante fosfórico, mientras que en el conteo de esporas los menores valores se alcanzaron en los tratamientos que no recibieron fertilizante fosfórico. En ambas variables y en los dos años, los mayores valores se alcanzaron en el cultivar 'CEMSA 78-354' del orden de 69 % y 470 esporas en 50 g de suelo, superiores ($P \leq 0,05$) a los obtenidos con el cultivar 'INIVIT B-2-2005' los cuales fueron del orden de 66 % y 350 esporas en 50 g de suelo. En los tratamientos no inoculados se encontraron bajos valores en ambas variables, alrededor de cinco veces menores que los alcanzados al inocular.

Tabla 16. Efecto de la fertilización fosfórica y la inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11, en el rendimiento de raíces tuberosas comerciales de dos cultivares de boniato, plantados en la época lluviosa. Desdoblamiento de la interacción A x B x C x D

Cultivar Año	Rendimiento (t ha ⁻¹)									
	HMA					sin HMA				
	P-0	P-25	P-50	P-75	P-100	P-0	P-25	P-50	P-75	P-100
'INIVIT B-2-2005' Año 1	21,34 e	23,63 d	33,83 a	31,86 b	29,61 b	12,18 f	23,16 d	26,80 c	30,43 b	27,89 c
'CEMSA 78-354' Año 1	16,89 g	23,39 e	32,82 a	30,62 b	28,67 c	10,83 h	19,75 f	25,91 d	29,72 bc	25,93 d
'INIVIT B-2-2005' Año 2	22,83 f	27,00 d	34,45 a	33,78 a	33,42 ab	20,92 g	24,52 e	29,52 c	33,27 ab	31,88 b
'CEMSA 78-354' Año 2	22,42 f	27,42 d	35,04 a	34,55 a	34,49 a	20,46 g	25,71 e	29,34 c	34,08 ab	32,64 b
Es $\bar{x} \pm A \times B \times C \times D$	0,77**									

*La comparación entre medias de tratamientos de diferentes filas, se realizó a partir intervalo de confianza (IC) para $P \leq 0,05$, utilizando el percentil de la prueba de Tukey. Las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > 2 \times (IC)$.

Leyenda: Factor A (HMA); Factor B (dosis de P_2O_5); Factor C (cultivares); Factor D (años). P-0: sin fertilizante fosfórico, P-25:25 kg ha⁻¹ de P_2O_5 , P-50:50 kg ha⁻¹ de P_2O_5 , P-75:75 kg ha⁻¹ de P_2O_5 , P-100:100 kg ha⁻¹ de P_2O_5 . HMA: inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11. Todos los tratamientos recibieron un fondo fijo de 90 y 150 kg ha⁻¹ de N y K_2O , respectivamente.

Tabla 17. Efecto de la fertilización fosfórica y la inoculación con *R. irregular*/INCAM-11, en la frecuencia de colonización (A) y esporas totales (B) de dos cultivares de boniato, plantados en época lluviosa. Desdoblamiento de la interacción A x B x C x D

I. Cultivar Año	Colonización total (%)									
	HMA					sin HMA				
	P-0	P-25	P-50	P-75	P-100	P-0	P-25	P-50	P-75	P-100
'INIVIT B-2-2005' Año 1	54,25 c	59,00 b	66,00 a	54,00 c	39,50 d	9,25 f	9,50 ef	10,25 e	11,50 e	10,75 e
'CEMSA 78-354' Año 1	55,75 d	60,25 b	69,50 a	58,50 c	41,50 e	9,50 g	9,75 g	10,50 fg	11,75 f	10,25 fg
'INIVIT B-2-2005' Año 2	52,00 c	60,75 b	64,75 a	52,75 c	37,25 d	9,00 g	9,50 g	10,25 fg	12,25 e	11,25 ef
'CEMSA 78-354' Año 2	53,50 d	60,00 b	69,25 a	56,75 c	43,25 e	9,25 h	10,00 gh	10,75 g	12,75 f	11,25 g
Es $\bar{x} \pm A \times B \times C \times D$	0,68**									

II. Cultivar Año	Esporas totales (50 g de suelo)									
	HMA					sin HMA				
	P-0	P-25	P-50	P-75	P-100	P-0	P-25	P-50	P-75	P-100
'INIVIT B-2-2005' Año 1	254 e	308 c	363 a	335 b	290 d	61 h	75 g	82 f	83 f	81 f
'CEMSA 78-354' Año 1	365 e	420 c	474 a	446 b	404 d	64 i	77 h	85 g	95 f	80 gh
'INIVIT B-2-2005' Año 2	267 e	316 c	355 a	327 b	293 d	63 h	76 g	85 f	81 fg	81 fg
'CEMSA 78-354' Año 2	373 e	422 c	464 a	435 b	400 d	65 h	76 g	85 g	91 f	81 g
Es $\bar{x} \pm A \times B \times C \times D$	2,70**									

*La comparación entre medias de tratamientos de diferentes filas, se realizó a partir intervalo de confianza (I.C) para $P \leq 0,05$, utilizando el percentil de la prueba de Tukey. Las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > 2 \times (IC)$.

Leyenda: Factor A (HMA); Factor B (dosis de P_2O_5); Factor C (cultivares); Factor D (años). P-0: sin fertilizante fosfórico, P-25:25 kg ha⁻¹ de P_2O_5 , P-50:50 kg ha⁻¹ de P_2O_5 , P-75:75 kg ha⁻¹ de P_2O_5 , P-100:100 kg ha⁻¹ de P_2O_5 . HMA: inoculación con *R. irregular*/INCAM-11. Todos los tratamientos recibieron un fondo fijo de 90 y 150 kg ha⁻¹ de N y K₂O, respectivamente.

En los tratamientos inoculados y en el rango de fertilización (0 a 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅), con respuesta creciente de la fertilización, tanto en el rendimiento como en los indicadores del funcionamiento micorrízico, se obtuvieron altos coeficientes de determinación entre la frecuencia de colonización y el rendimiento (Figura 5 A), así como entre la frecuencia de colonización y las esporas contadas (Figura 5 B); de forma tal que los mayores rendimientos, se asociaron con las mayores frecuencias de colonización y viceversa, una asociación similar se encontró entre la frecuencia de colonización y el conteo de esporas. En este rango para cada dosis de fertilizante fosfórico los valores de los indicadores de funcionamiento y de rendimiento se agruparon diferenciadamente (Tablas 16 y 17). Asimismo, para cada dosis de fertilización las mayores frecuencias de colonización, se asociaron con los mayores rendimientos y de forma similar ocurrió con las esporas.

En la Tabla 18 se presentan las concentraciones de P (g kg⁻¹) alcanzadas en diferentes órganos de la planta, en los tratamientos con mayores rendimientos, tanto en presencia de la inoculación (50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ + HMA) como en ausencia de esta (75 kg ha⁻¹ de P₂O₅) y el tratamiento homólogo no inoculado (50 kg ha⁻¹ de P₂O₅).

Tabla 18. Efecto de la fertilización fosfórica y la inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11, en las concentraciones de fósforo de diferentes órganos de dos cultivares de boniato, plantados en época lluviosa (tratamientos seleccionados, muestreo en cosecha)

Tratamientos seleccionados	Hojas	Tallos	Raíces tuberosas
	Contenido P (g kg ⁻¹)		
50 P ₂ O ₅	3,07 c ± 0,06	2,43 c ± 0,08	2,95 c ± 0,04
50 P ₂ O ₅ + HMA	3,30 a ± 0,06	2,80 a ± 0,08	3,45 a ± 0,04
75 P ₂ O ₅	3,17 b ± 0,06	2,71 b ± 0,08	3,30 b ± 0,04
Es $\bar{x} \pm$	0,03**	0,04**	0,02**

*Letras diferentes en los valores correspondientes a cada órgano, conllevan a diferencias significativas a partir de la prueba de Tukey (P≤0,05). Factor A (tratamientos seleccionados). El intervalo de confianza a (P≤0,05) se calculo utilizando el percentil de Tukey. La comparación entre medias de los diferentes órganos utilizando los intervalos de confianza, las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > IC_1 + IC_2$.

En los ANOVA realizados, incluyendo cultivares y años, solo se encontraron efectos significativos entre los tratamientos, no siendo así para los factores cultivares ni años, ni los términos de interacción.

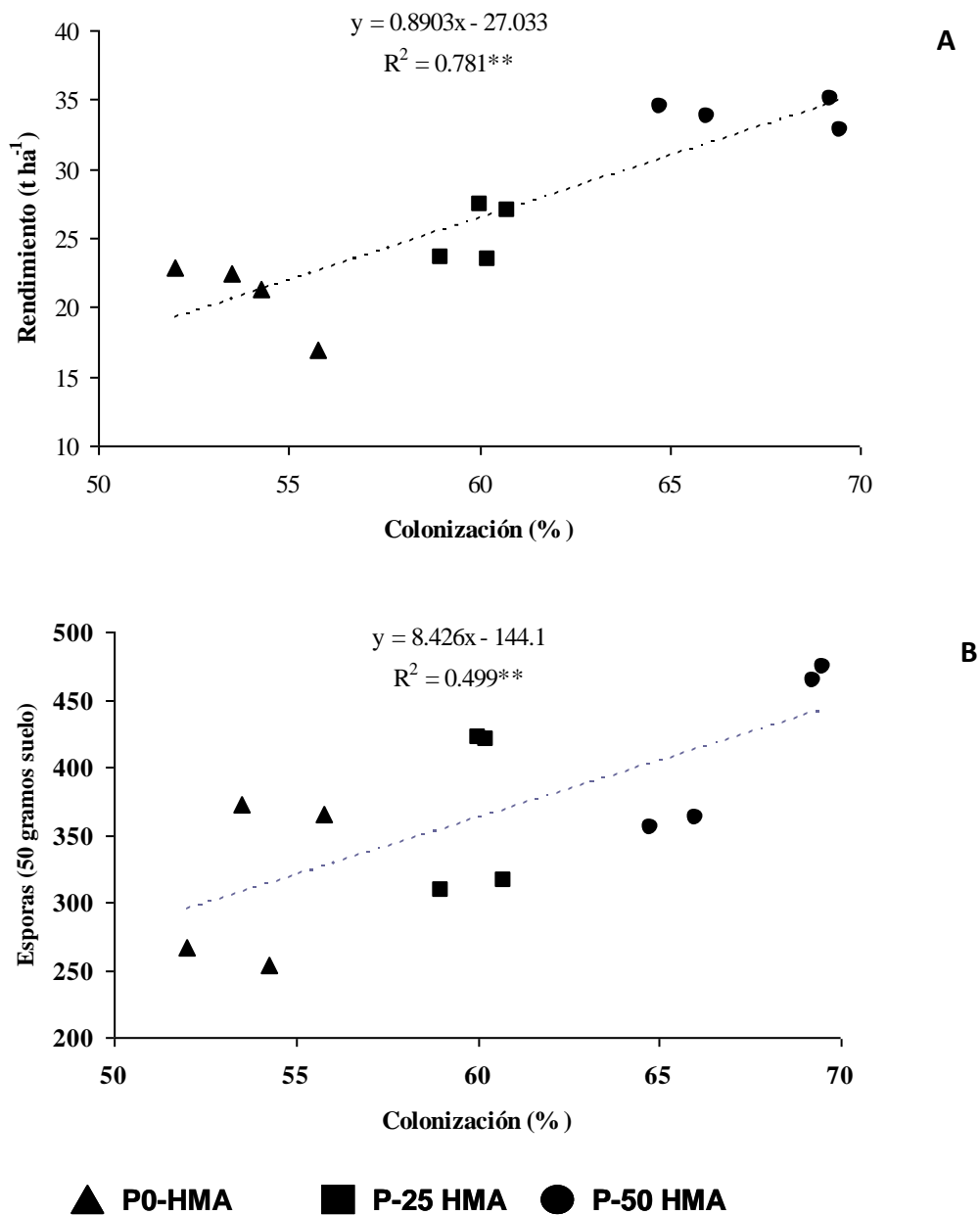


Figura 5. Relaciones entre la frecuencia de colonización y rendimientos (A) y entre la frecuencia de colonización y conteo de esporas en 50 g de suelo (B) para ambos cultivares y años en los tratamientos inoculados con las dosis de 0, 25 y 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅, durante la época lluviosa

Las concentraciones de fósforo (g kg^{-1}) presentaron una respuesta positiva a la inoculación, expresada en que los mayores valores se alcanzaron en cualquiera de los tres órganos muestreados en el tratamiento inoculado, con valores superiores ($P \leq 0,05$) a los alcanzados en tanto en el tratamiento homólogo no inoculado como en el tratamiento óptimo de fertilización ($75 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$). Las concentraciones mayores ($P \leq 0,05$) se encontraron en las raíces tuberosas, seguidas de las encontradas en las hojas y ambas superiores a las presentes en los tallos.

Experimento 4. Resultados en la época poco lluviosa

Los resultados en la época poco lluviosa (Tabla 19) presentaron efectos significativos de los factores inoculación, dosis de fertilizante y cultivares, en las variables rendimiento, frecuencia de colonización y esporas. El factor años solo fue significativo en las esporas. Los términos de interacción de máximo orden nunca fueron significativos. Las interacciones de tercer orden (HMA x dosis x cultivares) fueron significativas para la frecuencia de colonización y esporas y se procederá a desdoblar estas interacciones, comparando las combinaciones A x B para cada nivel del factor C.

Para el rendimiento solo fueron significativas interacciones de segundo orden y teniendo en cuenta los objetivos del experimento, se trabajó con la interacción HMA x dosis P (Figura 6). El cultivo respondió positivamente ($P \leq 0,05$) a la aplicación del fertilizante y en los tratamientos sin inoculación, los mayores rendimientos se alcanzaron con la dosis de 75 kg ha^{-1} de P_2O_5 , los cuales fueron significativamente mayores a los encontrados con las dosis inferiores; con la dosis 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 se presentaron rendimientos similares.

Tabla 19. Experimento 4. Valor P de los diferentes factores y términos de interacción los ANOVA de las variables rendimiento, frecuencia de colonización micorrízica y esporas contadas en 50 g de suelo en la época poco lluviosa

Origen	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Colonización (%)	Esporas (50 g de suelo)
Modelo corregido	0,000	0,000	0,000
Intersección	0,000	0,000	0,000
A	0,000	0,000	0,000
B	0,000	0,000	0,000
C	0,005	0,009	0,000
D	0,954 N.S	0,579 N.S	0,001
A x B	0,000	0,000	0,000
A x C	0,494 N.S	0,129 N.S	0,004
A x D	0,764 N.S	0,167 N.S	0,428 N.S
B x D	0,000	0,972 N.S	0,005
B x C	0,226 N.S	0,051 N.S	0,000
C x D	0,055 N.S	0,406 N.S	0,763 N.S
A x B x C	0,759 N.S	0,012	0,000
B x C x D	0,055 N.S	0,813 N.S	0,432 N.S
A x B x C x D	0,273 N.S	0,794 N.S	0,809 N.S
Factor A (Niveles con y sin HMA); Factor B (dosis de P ₂ O ₅); Factor C (cultivar);Factor D (años)			

Leyenda: Factor A: Inoculación micorrízica con dos niveles (con y sin inoculación); Factor B: Dosis de fertilización mineral fosfórica con cinco niveles (0, 25, 50, 75 y 100 kg ha⁻¹); Factor C: Cultivar de boniato con dos niveles ('INIVIT B-2-2005' y 'CEMSA 78-354') y Factor D: Años evaluados con dos niveles (Año 1 y 2).

En la propia figura 6 se puede observar que en presencia de la inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11, se encontró una respuesta creciente a la fertilización hasta la dosis de 50 kg ha⁻¹. Dentro del rango de 0 a 50 kg ha⁻¹ los rendimientos de los tratamientos inoculados siempre fueron superiores a los homólogos no inoculados y los mayores incrementos se encontraron en ausencia de la fertilización; dosis superiores disminuyeron significativamente el rendimiento. Los rendimientos alcanzados con la dosis de 50 kg ha⁻¹ fueron significativamente superiores a los máximos encontrados en ausencia de inoculación, pero que recibieron 75 kg ha⁻¹.

La inoculación micorrízica también influyó positivamente en los indicadores de funcionamiento micorrízico evaluados (Tabla 20) y los mayores valores se obtuvieron en presencia de la dosis de 50 kg ha⁻¹; dosis inferiores o superiores originaron valores de

ambos indicadores significativamente menores. No se encontraron efectos de los cultivares ni de los años. Los valores promedios de colonización encontrados con la dosis de 50 kg ha⁻¹ en presencia de la inoculación fueron de 63 % y 350 esporas en 50 gramos de suelo.

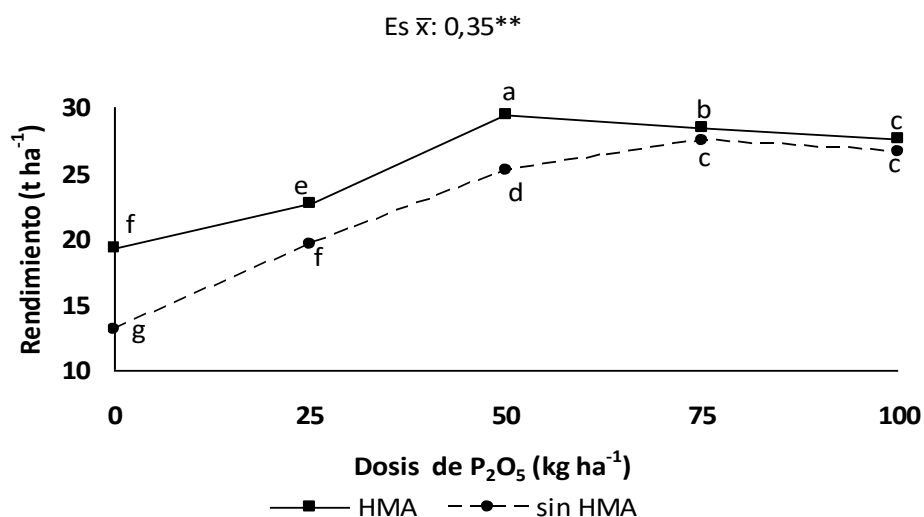


Figura 6. Efectos de la inoculación con *R. irregularis*/INCAM-11 y dosis de fertilizante fosfórico en el rendimiento de dos cultivares de boniato plantado en la época poco lluviosa. Tratamientos con letras desiguales difieren por Tukey para $P \leq 0,05$.

En los tratamientos no inoculados la frecuencia de colonización y el número de esporas fueron muy inferiores del orden del 16 al 24 % respectivamente a los obtenidos al inocular y los valores mayores se encontraron en el tratamiento de 75 kg de P₂O₅ ha⁻¹, que coincidió con el óptimo de fertilización en ausencia de inoculación (Figura 6).

En presencia de la inoculación y en el rango de fertilización (0 a 50 kg de P₂O₅ ha⁻¹), con respuesta creciente del rendimiento y de los indicadores del funcionamiento micorrízico a la fertilización; se obtuvieron altos coeficientes de determinación ($R^2=0,85^{***}$) entre la frecuencia de colonización y el rendimiento, (Figura 7 A), así como entre la frecuencia de colonización y las esporas contadas con $R^2=0,98^{***}$, (Figura 7 B).

Tabla 20. Efecto de la fertilización fosfórica y la inoculación con *R. irregular*/INCAM-11, en la frecuencia de colonización (20 I) y esporas totales (20 II) de dos cultivares de boniato, plantados en época poco lluviosa. Desdoblamiento de la interacción A x B x C

I. Cultivar	Colonización total (%)									
	HMA					sin HMA				
	P-0	P-25	P-50	P-75	P-100	P-0	P-25	P-50	P-75	P-100
'INIVIT B-2-2005'	51,38 c	58,25 b	63,38 a	52,50 c	38,50 d	8,88 h	9,50 gh	10,13 fg	11,50 e	10,63 ef
'CEMSA 78-354'	51,13 c	57,75 b	62,63 a	52,13 c	38,88 d	8,63 g	9,75 fg	10,75 f	11,88 e	10,38 f
Es $\bar{x} \pm A \times B \times C$	0,56**									

II. Cultivar	Esporas totales (50 g de suelo)									
	HMA					sin HMA				
	P-0	P-25	P-50	P-75	P-100	P-0	P-25	P-50	P-75	P-100
'INIVIT B-2-2005'	254 e	311 c	351 a	324 b	294 d	61 j	72 i	77 h	83,0 f	80,0 g
'CEMSA 78-354'	251 e	307 c	350 a	321 b	295 d	60,5 i	70 h	75 g	81,5 f	79,5 f
Es $\bar{x} \pm A \times B \times C$	1,05**									

*La comparación entre medias de tratamientos de diferentes filas, se realizó a partir intervalo de confianza (IC) para $P \leq 0,05$, utilizando el percentil de la prueba de Tukey. Las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > 2 \times (IC)$.

Leyenda: Factor A (HMA); Factor B (dosis de P_2O_5); Factor C (cultivares). P-0: sin fertilizante fosfórico, P-25:25 kg ha⁻¹ de P_2O_5 , P-50:50 kg ha⁻¹ de P_2O_5 , P-75:75 kg ha⁻¹ de P_2O_5 , P-100:100 kg ha⁻¹ de P_2O_5 . HMA: inoculación con *R. irregular*/INCAM-11. Todos los tratamientos recibieron un fondo fijo de 90 y 150 kg ha⁻¹ de N y K₂O, respectivamente.

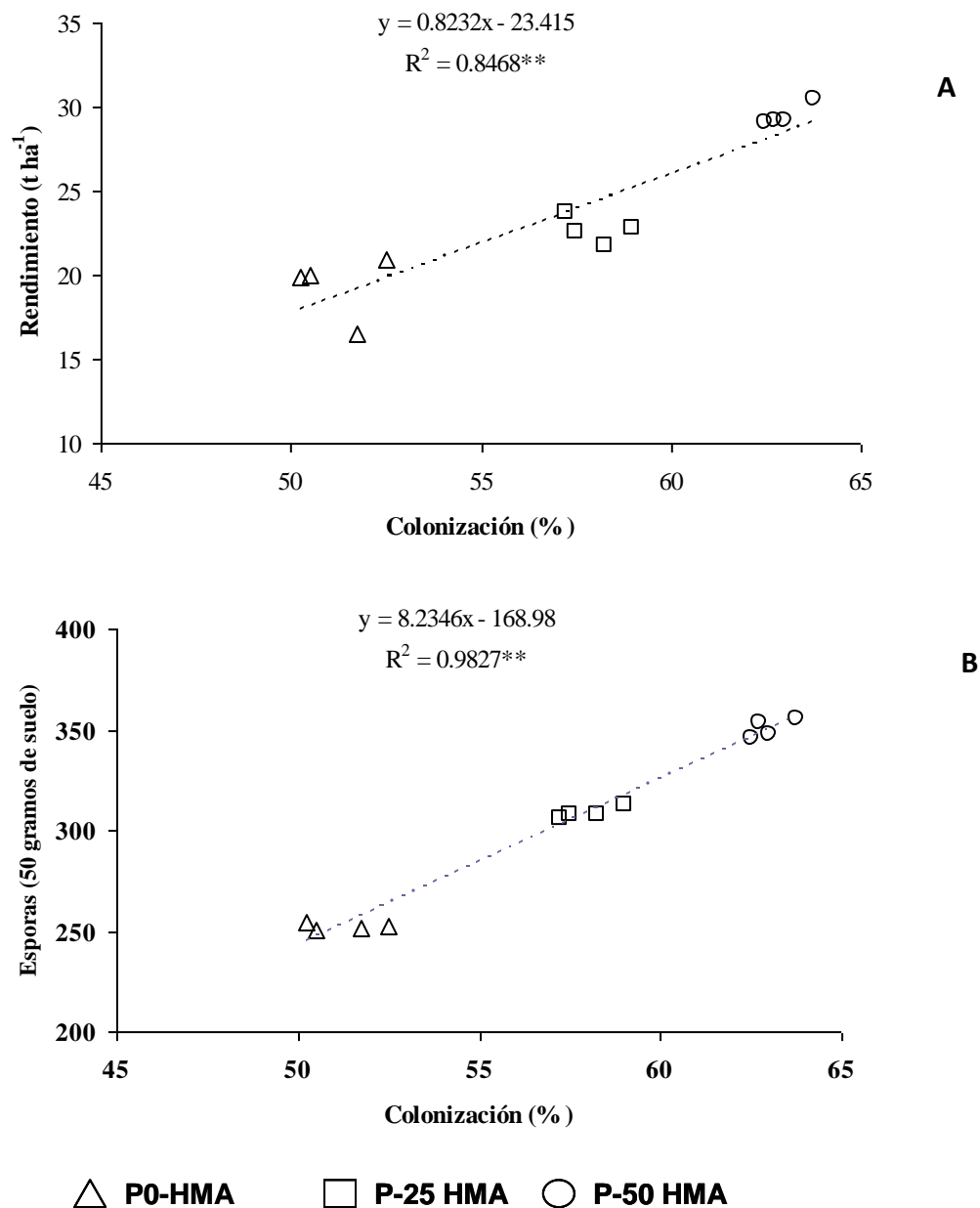


Figura 7. Relaciones entre la frecuencia de colonización y rendimientos (A) y entre la frecuencia de colonización y conteo de esporas en 50 g de suelo (B) para ambos cultivares y años en los tratamientos inoculados con las dosis de 0, 25 y 50 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 , durante la época lluviosa

De forma similar a lo encontrado en la época lluviosa, a cada dosis de fertilizante fosfórico se le asoció un rango de funcionamiento y rendimiento, de forma tal que en la medida que se incrementaron las dosis, mayores fueron los valores en la frecuencia de colonización y de rendimiento, con diferencias significativas entre los valores alcanzados en cada rango por las combinaciones cultivar x año (Figura 6, Tablas 20 I y II). Asimismo, para cada dosis de fertilización, las mayores frecuencias de colonización se asociaron con los mayores rendimientos y de forma similar con los conteos de esporas.

En la tabla 21 se presentan las concentraciones de P (g kg^{-1}) alcanzadas en los diferentes órganos del cultivo en los tratamientos con mayores rendimientos, tanto en presencia de la inoculación (50 kg ha^{-1} de P_2O_5 + HMA) como en ausencia de esta (75 kg ha^{-1} de P_2O_5) y el tratamiento homólogo no inoculado (50 kg ha^{-1} de P_2O_5). En los ANOVA realizados solo se encontraron efectos de los tratamientos, no siendo significativos los factores cultivares ni años, ni de los términos de interacción.

Tabla 21. Efecto de la fertilización fosfórica y la inoculación con *R. irregularis*/INCAM-11 en los concentraciones de fósforo, de diferentes órganos en dos cultivares de boniato, plantados en época poco lluviosa (tratamientos seleccionados, muestreo en cosecha)

Tratamientos seleccionados	Hojas	Tallos	Raíces tuberosas
	Contenido de P (g kg^{-1})		
50 P_2O_5	2,94 c \pm 0,04	2,50 c \pm 0,04	2,82 c \pm 0,04
50 P_2O_5 + HMA	3,20 a \pm 0,04	2,72 a \pm 0,04	3,25 a \pm 0,04
75 P_2O_5	3,10 b \pm 0,04	2,62 b \pm 0,04	3,09 b \pm 0,04
Es $\bar{x} \pm$	0,02**	0,02**	0,02**

*Letras diferentes en los valores correspondientes a cada órgano, conllevan a diferencias significativas a partir de la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$). Factor A (tratamientos seleccionados). El intervalo de confianza a ($P \leq 0,05$) se calculó utilizando el percentil de Tukey. La comparación entre medias de los diferentes órganos utilizando los intervalos de confianza, las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > \text{IC}_1 + \text{IC}_2$.

Las concentraciones de fósforo (g kg^{-1}) presentaron una respuesta positiva a la inoculación, expresada en que los mayores contenidos se alcanzaron en cualquiera de los tres órganos en el tratamiento inoculado y que recibió 50 kg ha^{-1} con valores superiores ($P \leq 0,05$) a los

alcanzados en el tratamiento óptimo de fertilización en ausencia de inoculación (75 kg ha^{-1} de P_2O_5) y ambos superiores al tratamiento homólogo no inoculado (50 kg ha^{-1} de P_2O_5). Las concentraciones de P fueron altas y similares entre las raíces tuberosas y las hojas con valores entre $3,20$ y $3,25 \text{ g kg}^{-1}$ de fósforo y superiores ($P \leq 0,05$) a los encontrados en los tallos.

Efecto de la época sobre el rendimiento, las concentraciones de fósforo e indicadores del funcionamiento micorrízico.

En la tabla 22 se presentan los efectos de la época en los experimentos 3 y 4 evaluados a través de los efectos en el tratamiento 50 kg ha^{-1} de $\text{P}_2\text{O}_5 + \text{HMA}$ (50 P+HMA) que se corresponde con el tratamiento que presentó los mayores rendimientos e indicadores de funcionamiento micorrízico. En cualquiera de las tres variables se encontró que en la época lluviosa los valores fueron significativamente superiores ($P \leq 0,05$) a los obtenidos en la época poco lluviosa.

Tabla 22. Efecto de las épocas y años sobre el rendimiento, frecuencia de colonización y esporas en el boniato inoculado con *R. irregulare*/INCAM-11 en el tratamiento 50 P + HMA.

Años	Rendimiento (t ha^{-1})		Colonización (%)		Esporas en 50 g de suelo	
	Lluviosa	Poco lluviosa	Lluviosa	Poco lluviosa	Lluviosa	Poco lluviosa
Año 1	$33,3 \pm 1,54$	$29,80 \pm 0,70$	$67,8 \pm 1,36$	$63,3 \pm 1,12$	$419 \pm 5,4$	$355 \pm 2,10$
Año 2	$34,7 \pm 1,54$	$29,15 \pm 0,70$	$67,0 \pm 1,36$	$62,8 \pm 1,12$	$410 \pm 5,4$	$347 \pm 2,10$

Tabla elaborada a partir de la información de las tablas 16, 17, 20 y Fig 6. En el ANOVA específico realizado para la información presentada no fue significativo el factor cultivar.

En relación con el efecto de la época sobre las concentraciones de fósforo, en los diferentes órganos del cultivo (Tabla 23), se encontró que los años no presentaron efectos significativos y a la vez solo las concentraciones en las raíces tuberosas fueron significativamente mayores en la época lluviosa, en el resto de los órganos las concentraciones en ambas épocas fueron similares.

Tabla 23. Efecto de las épocas, en las concentraciones de fosforo (g kg^{-1}), en el boniato inoculado con *R. irregulare*/INCAM-11 en el tratamiento 50 P + HMA.

Hojas		Tallo		Raíces tuberosas	
Lluviosa	Poco lluviosa	Lluviosa	Poco lluviosa	Lluviosa	Poco lluviosa
$3,3 \pm 0,06$	$3,2 \pm 0,04$	$2,8 \pm 0,08$	$2,7 \pm 0,04$	$3,5 \pm 0,04$	$3,3 \pm 0,04$

Tabla elaborada a partir de la información de las tablas 18 y 21. En el ANOVA específico realizado para este tratamiento no fueron significativos los factores cultivar y años.

Influencia de la inoculación con HMA, en la Eficiencia Agronómica (EA) del fertilizante fosfórico

En la figura 8 se presenta la relación entre las EA del fertilizante fosfórico obtenidos para los mejores tratamientos de los experimentos 3 y 4, en las variantes con y sin inoculación que se corresponden con la aplicación de 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 y de 75 kg ha^{-1} de P_2O_5 respectivamente. Además se presentan los rendimientos correspondientes del tratamiento testigo (sin fertilización fosfórica y sin inoculación) para las diferentes combinaciones de época x cultivar x año (Figura 8).

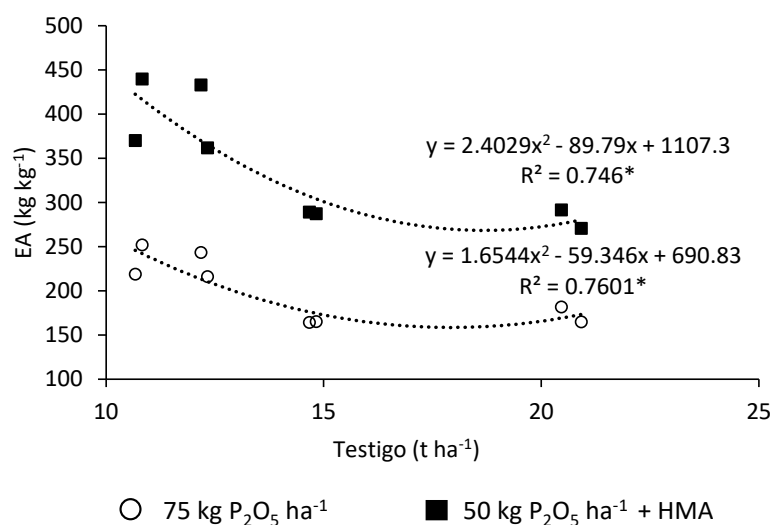


Figura 8. Experimentos 3 y 4. Eficiencia agronómica (EA) del fertilizante fosfórico para los tratamientos más productivos, en presencia y ausencia de la inoculación vs. el rendimiento del tratamiento testigo para cada una de las combinaciones época-cultivares-años

Se puede observar como la EA para ambos tratamientos esta inversamente relacionada con el rendimiento del tratamiento testigo (P, 0,000), es decir mientras mayor sea el rendimiento obtenido en el tratamiento testigo menor será la EA; no obstante, en todas las combinaciones época-cultivares-años, siempre la EA correspondiente al mejor tratamiento inoculado, fue superior a la encontrada en el tratamiento que recibió la dosis óptima de fertilizante fosfórico en ausencia de inoculación.

Discusión: Uno de los beneficios ampliamente reconocido a la simbiosis micorrízica es la mejora de la nutrición fosfórica de las plantas (Karandashov y Bucher, 2005; Smith y Smith, 2011; Bagyaraj *et al.*, 2015; Chu *et al.*, 2020), explicable en los incrementos en la capacidad de absorción que le confiere el micelio extrarradical a las plantas, lo cual es significativo para este elemento de baja solubilidad y que se mueve en el suelo por difusión, asimismo algunos autores han reportado incrementos en la solubilización de fuentes orgánicas de P en el suelo, además de que en la propia micorrizosfera se incrementa la actividad biológica, incluyendo a los microorganismos solubilizadores de fósforo (Bagyaraj *et al.*, 2015).

La inoculación de la cepa eficiente garantizó altos rendimientos con menores cantidades de fertilizante fosfórico, para ambos cultivares y épocas. La respuesta en rendimiento a la inoculación, en el rango de 0 a 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅, se asoció con incrementos en la frecuencia de colonización micorrízica y esporas reproducidas, indicando como en la medida que se incrementó el suministro de P se incrementó el funcionamiento micorrízico. A partir de la dosis de 50 kg ha⁻¹ los incrementos en fertilización disminuyeron el funcionamiento micorrízico. Ello resulta explicable porque en presencia de una disponibilidad adecuada de P en el suelo, la planta no tiene que requerir de las micorrizas

para garantizar sus requerimientos nutricionales y la inoculación de una cepa eficiente deja de ser efectiva (Rivera y Fernández, 2003, Yang *et al.*, 2018).

En relación con lo anterior Netu *et al.* (2012) y Rai *et al.* (2013), informaron que la disponibilidad de nutrientes controló el crecimiento de las estructuras micorrízicas y que la cantidad de arbuscúlos e hifas extrarradicales se reducen cuando los cultivos han sido suficientemente fertilizados, ya que la planta disminuye y hasta cesa la entrega de C a las micorrizas (Kiers *et al.*, 2011) y por tanto el funcionamiento micorrízico y el suministro de los nutrientes del suelo a la planta hospedera a través de los HMA pierde importancia.

Diversos han sido los trabajos realizados para evaluar la efectividad o respuesta a la inoculación en función de dosis crecientes de P en el suelo; pero comúnmente han sido ejecutados en macetas o producción de posturas (Siqueira *et al.*, 1993; Saggin-Junior *et al.*, 1994; Chu *et al.*, 2020). De forma general se ha encontrado que la respuesta se incrementa con bajas dosis de fertilizantes fosfórico y que la efectividad va desapareciendo con el incremento de las dosis (Janos 2007).

En el cultivo del boniato existen algunos informes a escala de experimentos de campo sobre efectividad de la inoculación micorrízica y disminución de las dosis de fertilizantes para obtener altos rendimientos (Ruíz, 2001; Mukhongo *et al.*, 2017) aunque en dichos trabajos se evaluaron porcentajes de las dosis recomendadas de macronutrientes primarios para obtener altos rendimientos y por tanto no se pudo precisar el efecto específico en la nutrición fosfórica del cultivo. Carneiro *et al.* (2007 y 2010), aseguraron que existe la posibilidad de mejorar la nutrición fosfórica y la productividad de los cultivos mediante la introducción de una cepa de HMA eficiente, a partir de la contribución de esta al aumento de los rendimientos y reducir los requerimientos de fertilizante fosfórico.

La frecuencia de colonización alcanzados en los tratamientos inoculados que recibieron 50 kg⁻¹ de P, son propios de una micorrización efectiva de acuerdo con los resultados de Ruíz *et al.* (2012) y João *et al.* (2016) en el propio cultivo del boniato y en otros cultivos dependientes de la micorrización, e incluso superiores a los reportados en especies de braquiaria (González, 2014) y en canavalia y banano (Simó *et al.*, 2020).

Los altos índices de determinación encontrados entre rendimiento y la frecuencia de colonización en ambas épocas, en el rango de 0 a 50 kg de P₂O₅ ha⁻¹, así como la disminución de los porcentajes con dosis superiores, dejan claro que no solo la dosis de P regula la efectividad de la cepa eficiente inoculada (Rivera y Fernández, 2003), sino que a la vez en presencia de la dosis óptima de P para la micorrización los mayores rendimientos asociados a las combinaciones cultivares x años conllevaron a un mayor funcionamiento micorrízico, siendo un ejemplo del beneficio de ambos participantes en la simbiosis (Kiers *et al.*, 2011).

Las altas relaciones entre la frecuencia de colonización y la reproducción de esporas también han sido publicadas por diferentes investigadores al comparar la respuesta a la inoculación de varias cepas en diferentes cultivos (González 2014; Simó *et al.*, 2015; Ruíz *et al.*, 2016a) y fueron indicativas de que la inoculación con la cepa eficiente en presencia de la cantidad de nutrientes que garantiza los mayores efectos en el rendimiento y en la frecuencia de colonización, asimismo origina las mayores cantidades de esporas y está en consonancia con los criterios de Willys *et al.* (2013) de que las cepas generalistas, en condiciones de buen funcionamiento dedican cantidades crecientes del C suministrado por la planta a incrementar las estructuras fúngicas, entre ellas las esporas.

Asimismo, la inoculación en presencia de la cantidad adecuada de fertilizante fosfórico

incrementó las concentraciones de P en los diferentes órganos, con relación al homólogo no inoculado y al mejor tratamiento de fertilización (75P), indicando la importancia y el efecto directo de las micorrizas para la nutrición fosfórica de las plantas (Smith y Smith, 2011; Chu *et al.*, 2020) y dejando claro que la inoculación en presencia de la dosis adecuada garantizo un estado nutricional incluso superior al de las plantas no inoculadas que recibieron las mayores dosis recomendadas de fertilizante fosfórico.

Integralmente los efectos beneficiosos de la inoculación sobre los requerimientos de fertilizante fosfórico, se expresaron consecuentemente en los altos incrementos encontrados en la EA del fertilizante en ambas épocas, por lo que la inoculación siempre garantizó un aprovechamiento más eficiente de los fertilizantes.

4.1.3. Experimentos 5 y 6. Efecto de la inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11 en la respuesta y los requerimientos de fertilizante potásico de dos cultivares comerciales de boniato, en época lluviosa (experimento 5) y poco lluviosa (experimento 6)

Experimento 5. Resultados en la época lluviosa

Los análisis estadísticos de las variables rendimiento, frecuencia de colonización micorrízica y esporas totales en 50 g de suelo, mostraron un efecto significativo de todos los factores, excepto el factor cultivar para la variable rendimiento y el factor años, en la variable esporas. Los términos de interacción de mayor orden A x B x C x D fueron significativos al menos a $P \leq 0,05$ (Tabla 24).

Para simplificar la interpretación de los resultados y en función de los objetivos planteados, se realizó el desdoblamiento de la interacción de máximo orden (Tablas 25 y 26 I y II), comparando las combinaciones A x B para cada combinación C x D.

Tabla 24. Experimento 5. Valor P de los diferentes factores y términos de interacción en los ANOVA realizados para las variables rendimiento, frecuencia de colonización micorrízica y esporas contadas, en la época lluviosa

Origen	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Colonización (%)	Esporas en (50 g de suelo)
Modelo corregido	0,000	0,000	0,000
Intersección	0,000	0,000	0,000
A	0,000	0,000	0,000
B	0,000	0,000	0,000
C	0,757 N.S	0,000	0,000
D	0,000	0,000	0,756 N.S
A x B	0,000	0,000	0,000
A x C	0,469 N.S	0,000	0,000
A x D	0,000	0,000	0,145 N.S
B x D	0,000	0,000	0,000
B x C	0,002	0,214 N.S	0,000
C x D	0,023	0,886 N.S	0,882 N.S
A x B x C	0,000	0,066 N.S	0,000
B x C x D	0,000	0,650 N.S	0,057 N.S
A x B x C x D	0,000	0,000	0,047

Leyenda: Factor A: Inoculación micorrízica con dos niveles (con y sin inoculación); Factor B: Dosis de fertilización mineral potásica con cinco niveles (0, 75, 150, 225 y 300 kg ha⁻¹); Factor C: Cultivar de boniato con dos niveles ('INIVIT B-2-2005' y 'CEMSA 78-354') y Factor D: Años evaluados con dos niveles (Año 1 y 2).

El cultivo presentó una respuesta creciente a la fertilización potásica, en cualquiera de los cultivares y años, con incrementos significativos entre las diferentes dosis hasta recibir 150 kg ha⁻¹ de K₂O; con la cual se obtuvieron rendimientos altos que oscilaron entre 30 y 35 t ha⁻¹ (Tabla 25). Dosis superiores presentaron ligeros decrecimientos ($P \leq 0,05$) en el rendimiento. No se encontró efecto de los cultivares, pero sí de los años con los mayores rendimientos en el segundo año. Es de destacar que el tratamiento que no recibió fertilizante potásico alcanzó rendimientos importantes, del orden del 60 al 70 % de los rendimientos máximos alcanzados en las combinaciones cultivar –años.

La respuesta a la inoculación de *R. irregulare*/INCAM-11 fue positiva ($P \leq 0,05$) hasta la dosis de 75 kg ha⁻¹ de K₂O, con la cual se obtuvieron los mayores rendimientos entre 33 y 37,4 t ha⁻¹, los cuales en el primer año fueron superiores a los máximos encontrados en los

Tabla 25. Efecto de la fertilización potásica y la inoculación con *R. irregular*/INCAM-11, en el rendimiento de raíces tuberosas comerciales de dos cultivares de boniato, plantados en la época lluviosa. Desdoblamiento de la interacción de máximo orden (A x B x C x D)

Cultivar Año	Rendimiento (t ha ⁻¹)									
	HMA					sin HMA				
	K-0	K-75	K-150	K-225	K-300	K-0	K-75	K-150	K-225	K-300
'INIVIT B-2-2005' Año 1	22,08 e	35,70 a	31,98 b	31,39 b	31,16 b	18,42 f	26,04 d	30,71 b	28,02 c	28,02 c
'CEMSA 78-354' Año 1	21,98 e	33,33 a	31,14 b	30,62 b	30,95 b	17,50 f	24,83 d	29,72 b	26,29 c	25,89 cd
'INIVIT B-2-2005' Año 2	28,84 d	37,40 a	36,29 ab	35,78 b	35,50 b	25,84 e	29,34 d	35,64 b	33,10 c	33,04 c
'CEMSA 78-354' Año 2	28,45 f	36,96 a	35,70 ab	35,47 bc	35,35 bc	25,79 g	30,20 e	35,28 bc	34,04 d	34,17 cd
Es $\bar{x} \pm A \times B \times C \times D$	0,66**									

*La comparación entre medias de tratamientos de diferentes filas, se realizó a partir del intervalo de confianza (IC) para $P \leq 0,05$, utilizando el percentil de la prueba de Tukey. Las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > 2 \times (IC)$.

Leyenda: Factor A (HMA); Factor B (dosis de K₂O); Factor C (cultivares); Factor D (años). K-0: sin fertilizante potásico, K-75: 75 kg ha⁻¹ de K₂O, K-150: 150 kg ha⁻¹ de K₂O, K-225: 225 kg ha⁻¹ de K₂O, K-300: 300 kg ha⁻¹ de K₂O. HMA: inoculación con *R. irregular*/INCAM-11. Todos los tratamientos recibieron un fondo fijo de 90 y 75 kg ha⁻¹ de N y P₂O₅, respectivamente.

tratamientos sin inoculación y en el segundo año fueron similares; no obstante los rendimientos en el segundo año, fueron superiores a los obtenidos en el primero. Dosis superiores a 75 kg ha⁻¹ de K₂O disminuyeron ligeramente los rendimientos en el primer año ($P \leq 0,05$), pero no en el segundo. La inoculación incrementó significativamente la frecuencia de colonización y el número de esporas contadas hasta la aplicación de 75 kg ha⁻¹ de K₂O, alcanzando altos porcentajes de colonización y esporas los cuales oscilaron entre 74 y 77 % de colonización y entre 570 y 590 esporas en 50 gramos de suelo, respectivamente (Tabla 26 I y II). En presencia de esta dosis de potasio, no se presentaron efectos ni por los cultivares ni por los años. Dosis inferiores y superiores a 75 kg ha⁻¹ de K₂O presentaron valores significativamente menores ($P \leq 0,05$), aunque es de destacar que en presencia de la dosis óptima para los tratamientos no inoculados (150 kg ha⁻¹), si bien ambos indicadores presentaron valores menores al tratamiento 75 K+HMA, estos fueron superiores a cuando los tratamientos inoculados no recibieron fertilizantes. La aplicación de 300 kg ha⁻¹ conllevó a las menores frecuencias de colonización; en relación con las esporas los menores conteos se encontraron en los tratamientos que no recibieron fertilizante potásico.

En los tratamientos no inoculados, ambos indicadores presentaron valores bajos y de forma general fueron seis veces menores a los encontrados en los tratamientos inoculados.

En los tratamientos de fertilización con respuesta positiva a la inoculación, que se encontraron en el rango de 0 a 75 kg ha⁻¹ de K₂O se encontraron altos coeficientes o índice de determinación, entre la frecuencia de colonización y el rendimiento ($R^2=0,875^{***}$) y entre la frecuencia de colonización y el número de esporas contadas ($R^2=0,942^{***}$).

Las concentraciones de potasio en hojas, tallos y raíces tuberosas en plantas muestreadas, en cosecha, reflejaron también los beneficios de la inoculación (Tabla 27). En esta variable no se presentaron efectos de los cultivares, ni de los años y los términos de interacción no fueron significativos.

Tabla 26. Efecto de la fertilización potásica y la inoculación con *R. irregular*/INCAM-11, en la frecuencia de colonización (26 I) y esporas totales (26 II) de dos cultivares de boniato, plantados en época lluviosa. Desdoblamiento de la interacción A x B x C x D

I. Cultivar Año	Colonización total (%)									
	HMA					sin HMA				
	K-0	K-75	K-150	K-225	K-300	K-0	K-75	K-150	K-225	K-300
'INIVIT B-2-2005' Año 1	57,50 c	75,25 a	61,25 b	53,75 d	33,00 e	9,25 h	9,50 h	11,50 f	11,00 fg	10,00 gh
'CEMSA 78-354' Año 1	51,50 c	73,75 a	59,25 b	50,25 d	30,75 e	9,00 h	10,00 gh	11,50 f	11,00 fg	10,75 fg
'INIVIT B-2-2005' Año 2	59,25 c	77,25 a	65,00 b	56,75 d	37,00 e	8,50 i	9,75 h	12,00 f	11,25 fg	10,25 gh
'CEMSA 78-354' Año 2	56,00 c	76,00 a	64,25 b	54,25 d	36,75 e	8,75 h	10,00 g	11,75 f	11,25 f	11,00 fg
Es $\bar{x} \pm A \times B \times C \times D$	0,61**									

II. Cultivar Año	Esporas totales (50 g de suelo)									
	HMA					sin HMA				
	K-0	K-75	K-150	K-225	K-300	K-0	K-75	K-150	K-225	K-300
'INIVIT B-2-2005' Año 1	379 e	571 a	473 b	432 c	415 d	52 j	72 h	88 f	83 g	64 i
'CEMSA 78-354' Año 1	411 e	575 a	480 b	460 c	437 d	57 h	70 g	90 f	72 g	68 g
'INIVIT B-2-2005' Año 2	383 e	589 a	481 b	456 c	425 d	55 i	71 h	92 f	84 g	68 h
'CEMSA 78-354' Año 2	406 e	593 a	477 b	456 c	435 d	57 j	73 i	92 f	85 g	68 h
Es $\bar{x} \pm A \times B \times C \times D$	2,19**									

*La comparación entre medias de tratamientos de diferentes filas, se realizó a partir del intervalo de confianza (I.C) para $P \leq 0,05$, utilizando el percentil de la prueba de Tukey. Las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > 2 \times (I.C)$.

Leyenda: Factor A (HMA); Factor B (dosis de K₂O); Factor C (cultivares); Factor D (años). K-0: sin fertilizante potásico, K-75:75 kg ha⁻¹ de K₂O, K-150:150 kg ha⁻¹ de K₂O, K-225:225 kg ha⁻¹ de K₂O, K-300: 300 kg ha⁻¹ de K₂O. HMA: inoculación con *R. irregular*/INCAM-11. Todos los tratamientos recibieron un fondo fijo de 90 y 75 kg ha⁻¹ de N y P₂O₅, respectivamente.

Tabla 27. Efecto de la fertilización potásica y la inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11 en las concentraciones de potasio (g kg^{-1}), de diferentes órganos de dos cultivares de boniato plantados en la época lluviosa (muestreo en cosecha de tratamientos seleccionados)

Tratamientos seleccionados	Hojas	Tallos	Raíces tuberosas
	Contenido K (g kg^{-1})		
75 K_2O	27,01 c \pm 0,12	19,56 c \pm 0,25	30,94 c \pm 0,12
75 K_2O + HMA	28,31 a \pm 0,12	23,32 a \pm 0,25	32,93 a \pm 0,12
150 K_2O	27,75 b \pm 0,12	22,53 b \pm 0,25	31,95 b \pm 0,12
Es $\bar{x} \pm$	0,06**	0,13**	0,06**

*Letras diferentes en los valores correspondientes a cada órgano, conllevan a diferencias significativas a partir de la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$). Factor A (tratamientos seleccionados). El intervalo de confianza a ($P \leq 0,05$) se calculó utilizando el percentil de Tukey. La comparación entre medias de los diferentes órganos utilizando los intervalos de confianza, las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > \text{IC}_1 + \text{IC}_2$.

La combinación (75 K_2O + HMA) que además fue la que presentó mayores rendimientos y valores de los indicadores de funcionamiento micorrízico, exhibió las mayores concentraciones de K, en cualquiera de los órganos y superiores ($P \leq 0,05$) tanto a los encontrados en los homólogos no inoculados, como a los que recibieron la mejor dosis de fertilización, en ausencia de inoculación (150 kg de $\text{K}_2\text{O ha}^{-1}$). Los mayores valores se encontraron en las raíces tuberosas, seguidas de las hojas y de los tallos en todos los casos con diferencias significativas ($P \leq 0,05$).

Experimento 6. Resultados en la época poco lluviosa

En la época poco lluviosa se encontraron efectos significativos de todos los factores, en el rendimiento e indicadores micorrízicos evaluados (Tabla 28). La significación de los términos de interacción dependió de la variable. En el rendimiento al no ser significativas las interacciones de tercero y cuarto orden se seleccionó para analizar la interacción A (HMA) x B (dosis de K_2O); mientras que, en las demás variables las interacciones de máximo orden A x B x C x D fueron significativas y por tanto para estas variables se procedió al desdoblamiento de la interacción, comparando las combinaciones A x B para cada combinación C x D.

Tabla 28. Experimento 6. Valor P de los diferentes factores y términos de interacción en los ANOVA realizados para las variables rendimiento, frecuencia de colonización micorrízica y esporas contadas en la época poco lluviosa

Origen	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Colonización (%)	Esporas (50 g de suelo)
Modelo corregido	0,000	0,000	0,000
Intersección	0,000	0,000	0,000
A	0,000	0,000	0,000
B	0,000	0,000	0,000
C	0,000	0,000	0,000
D	0,000	0,000	0,000
A x B	0,000	0,000	0,000
A x C	0,560 N.S	0,000	0,000
A x D	0,000	0,000	0,000
B x D	0,000	0,007	0,000
B x C	0,829 N.S	0,000	0,000
C x D	0,000	0,015	0,000
A x B x C	0,476 N.S	0,022	0,000
B x C x D	0,255 N.S	0,560 N.S	0,007 N.S
A x B x C x D	0,210 N.S	0,014	0,000

Leyenda: Factor A: Inoculación micorrízica con dos niveles (con y sin inoculación); Factor B: Dosis de fertilización mineral potásica con cinco niveles (0, 75, 225, 150 y 300 kg ha⁻¹ respectivamente); Factor C: Cultivar de boniato con dos niveles ('INIVIT B-2-2005' y 'CEMSA 78-354') y Factor D: Años evaluados con dos niveles (Año 1 y 2).

Los resultados obtenidos en las diferentes variables evaluadas fueron similares a los ya presentados en la época lluviosa. En los tratamientos no inoculados se encontró una respuesta creciente del rendimiento a la fertilización y la dosis óptima de fertilización potásica fue de 150 kg ha⁻¹ (Figura 9), alcanzando rendimientos entre 28 y 29,5 t ha⁻¹ sin diferencias entre cultivares y años. Dosis superiores a 150 kg ha⁻¹ disminuyeron ligeramente ($P \leq 0,05$) los rendimientos.

En presencia de la inoculación se alcanzaron rendimientos altos del orden de 30 a 32 t ha⁻¹, pero requiriendo solo de la aplicación de 75 kg de K₂O ha⁻¹, siendo los rendimientos incluso superiores ($P \leq 0,05$) a los mayores obtenidos en ausencia de la inoculación. Dosis superiores disminuyeron fue ($P \leq 0,05$) los rendimientos, aunque sin diferenciarse de los homólogos no inoculados, respectivamente. En las combinaciones (75 K₂O + HMA) que

fueron las que originaron los mayores rendimientos, no se encontraron diferencias por los años, ni por los cultivares.

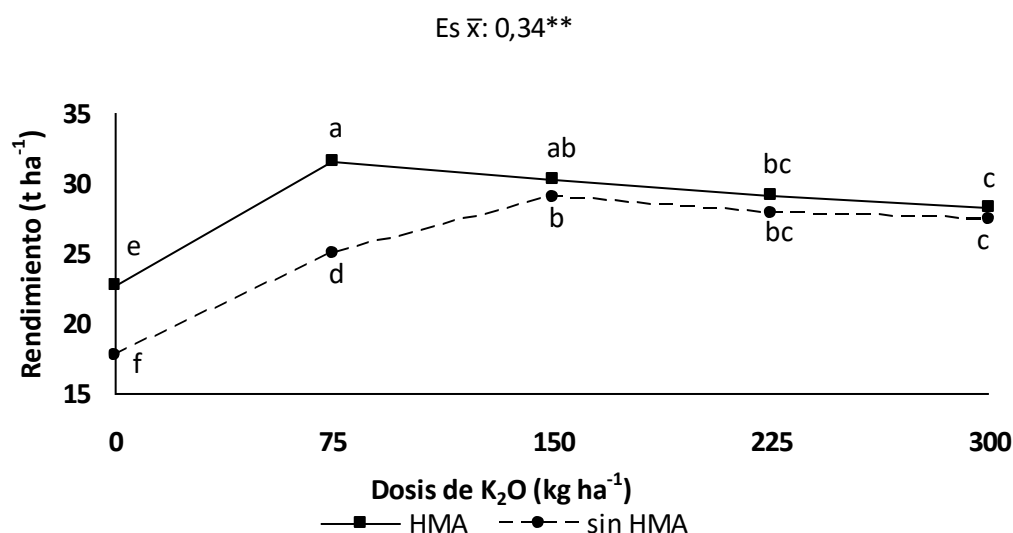


Figura 9. Efectos de la inoculación con *R. irregularis*/INCAM-11 y dosis de fertilizante potásico, en el rendimiento de dos cultivares de boniato plantados en época poco lluviosa. Tratamientos con letras desiguales difieren por Tukey para $P \leq 0,05$.

La inoculación además, incrementó significativamente la frecuencia de colonización y las esporas en la época poco lluviosa (Tabla 29 I y II) y los mayores valores del orden de 71 a 74 % y entre 555 a 560 esporas en 50 g de suelo respectivamente, se encontraron también con la dosis de 75 kg ha⁻¹ de K₂O. Dosis inferiores o superiores a 75 kg ha⁻¹ de K₂O originaron menores valores ($P \leq 0,05$) en ambos indicadores, aunque aún en presencia de la dosis de 150 kg ha⁻¹ se presentaron valores altos. En la colonización la caída fue brusca en presencia de la dosis de 300 kg ha⁻¹, sobre todo en el primer año: sin embargo en las esporas fueron superiores a las obtenidas en el tratamiento inoculado que no recibió fertilizantes.

Dosis inferiores o superiores a 75 kg ha⁻¹ de K₂O inoculado originaron menores valores ($P \leq 0,05$) en ambos indicadores, aunque aún en presencia de la dosis de 150 kg ha⁻¹ se presentaron valores altos. En la frecuencia de colonización la caída fue brusca en presencia

Tabla 29. Efecto de la fertilización potásica y la inoculación con *R. irregular*/INCAM-11, en la frecuencia de colonización (A) y esporas totales (B) de dos clones de boniato, cultivados en época poco lluviosa. Desdoblamiento de la interacción A x B x C x D

I. Cultivar Año	Colonización total (%)									
	HMA					Sin HMA				
	K-0	K-75	K-150	K-225	K-300	K-0	K-75	K-150	K-225	K-300
'INIVIT B-2-2005' Año 1	55,25 c	74,00 a	58,50 b	51,50 d	34,75 e	9,50 g	9,50 g	12,00 f	10,75 fg	10,00 g
'CEMSA 78-354' Año 1	50,75 c	72,00 a	57,00 b	51,00 c	32,50 d	9,25 f	9,25 f	11,25 e	10,25 ef	9,50 f
'INIVIT B-2-2005' Año 2	54,75 c	73,25 a	58,50 b	51,50 d	46,00 e	8,75 h	10,00 gh	12,25 f	11,00 fg	10,25 gh
'CEMSA 78-354' Año 2	52,50 c	71,25 a	56,50 b	50,75 d	42,75 e	9,00 g	9,50 g	11,50 f	10,50 fg	10,00 fg
Es ± A x B x C x D	0,77*									

II. Cultivar Año	Esporas totales (50 g de suelo)									
	HMA					sin HMA				
	K-0	K-75	K-150	K-225	K-300	K-0	K-75	K-150	K-225	K-300
'INIVIT B-2-2005' Año 1	394 e	557 a	455 b	419 c	404 d	52 j	71 h	86 f	82 g	65 i
'CEMSA 78-354' Año 1	379 e	560 a	453 b	413 c	404 d	51 j	69 h	84 f	80 g	63 i
'INIVIT B-2-2005' Año 2	393 e	555 a	453 b	418 c	411 d	52 j	71 h	85 f	81 g	67 i
'CEMSA 78-354' Año 2	381 e	554 a	451 b	414 c	404 d	51 j	70 h	84 f	80 g	66 i
Es ± A x B x C x D	1,46***									

*La comparación entre medias de tratamientos de diferentes filas, se realizó a partir intervalo de confianza (IC) para $P \leq 0,05$, utilizando el percentil de la prueba de Tukey. Las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > 2 \times (IC)$.

Leyenda: Factor A (HMA); Factor B (dosis de K_2O); Factor C (cultivares); Factor D (años). K-0: sin fertilizante potásico, K-75:75 kg ha⁻¹ de K_2O , K-150:150 kg ha⁻¹ de K_2O , K-225:225 kg ha⁻¹ de K_2O , K-300: 300 kg ha⁻¹ de K_2O . HMA: inoculación con *R. irregular*/INCAM-11. Todos los tratamientos recibieron un fondo fijo de 90 y 75 kg ha⁻¹ de N y P_2O_5 , respectivamente

de la dosis de 300 kg ha⁻¹ sobre todo en el primer año, no ocurriendo así en las esporas totales, que aún en presencia de esa dosis, se obtuvieron valores superiores al tratamiento inoculado que no recibió fertilizantes.

En presencia de las dosis de K₂O que permitieron una repuesta positiva a la inoculación tanto en el rendimiento como en los indicadores de funcionamiento micorrízico, se encontraron altos coeficientes de determinación, entre la frecuencia de colonización y el rendimiento ($R^2=0,95^{***}$) y entre la frecuencia de colonización y las esporas contadas ($R^2=0,98^{***}$), de forma que cada dosis de K₂O se asoció con un rango de funcionamiento y rendimiento mientras mayores fueron las frecuencias de colonización mayores fueron los rendimientos y los conteos de esporas, de forma similar a como ocurrió en la época lluviosa.

La inoculación también incrementó las concentraciones de K, en los diferentes órganos, con valores significativamente superiores ($P \leq 0,05$) al del tratamiento homólogo no inoculado y similares a los obtenidos con el mejor tratamiento fertilizado que no recibió inoculación y que recibió el doble del fertilizante potásico (Tabla 30).

Tabla 30. Efecto de la fertilización potásica y la inoculación con *R. irregulare*/INCAM-11, en las concentraciones de potasio en diferentes órganos para dos cultivares de boniato, plantados en la época poco lluviosa (muestreo en cosecha)

Tratamientos seleccionados	Hojas	Tallos	Raíces tuberosas
	Contenido K (g kg ⁻¹)		
75 K ₂ O	20,50 c \pm 0,08	17,88 c \pm 0,14	30,74 c \pm 0,14
75 K ₂ O + HMA	28,40 a \pm 0,08	23,32 a \pm 0,14	32,52 a \pm 0,14
150 K ₂ O	28,23 b \pm 0,08	22,53 b \pm 0,14	31,83 b \pm 0,14
Es $\bar{x} \pm$	0,04**	0,07**	0,07**

*Letras diferentes en los valores correspondientes a cada órgano, conllevan a diferencias significativas a partir de la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$). Factor A (tratamientos seleccionados). El intervalo de confianza a ($P \leq 0,05$) se calculó utilizando el percentil de Tukey. La comparación entre medias de los diferentes órganos utilizando los intervalos de confianza, las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > IC_1 + IC_2$.

Las concentraciones de K no presentaron efectos significativos por los factores cultivares y años. Los mayores valores se presentaron en las raíces tuberosas, seguido por las hojas y

los tallos, con diferencias significativas entre ellos.

Efecto de la época sobre el rendimiento, las concentraciones de potasio e indicadores del funcionamiento micorrízico

En la tabla 31 se presentan los efectos de las épocas y los años en los experimentos 5 y 6 evaluado a partir de los efectos del tratamiento (75 K₂O + HMA) que se corresponde con el tratamiento que presentó los mayores rendimientos e indicadores de funcionamiento micorrízico en ambas épocas.

Tabla 31. Efecto de la época y años sobre el rendimiento, colonización (%) y conteo de esporas en el boniato inoculado y recibiendo la dosis de K₂O para mayor respuesta

Años	Rendimiento (t ha ⁻¹)		Colonización (%)		Esporas en 50 g	
	Lluviosa	Poco lluviosa	Lluviosa	Poco lluviosa	Lluviosa	Poco lluviosa
Año 1	34,5 ± 1,32	32,13 ± 0,68	73,5 ± 1,22	73,0 ± 1,54	573 ± 4,38	559 ± 2,92
Año 2	37,2 ± 1,32	31,01 ± 0,68	76,6 ± 1,22	72,3 ± 1,54	591 ± 4,38	555 ± 2,92

Tabla elaborada a partir de la información de las tablas 25, 26, 29 y Figura 9.

En cualquiera de las tres variables se encontró que en el segundo año de la época lluviosa, se encontraron los mayores valores ($P \leq 0,05$). En el rendimiento y en la frecuencia de colonización no se encontraron diferencias entre el resto de las combinaciones época x año; no obstante, los conteos de esporas en la época lluviosa siempre fueron mayores que los obtenidos en la época poco lluviosa. En las concentraciones de potasio (tabla 32) se presentaron diferencias significativas entre los órganos, de forma tal que las raíces tuberosas > hojas > tallos; sin embargo, ni la época ni los años influyeron.

Tabla 32. Efecto de las épocas en las concentraciones de potasio (g kg⁻¹) en el boniato inoculado, con *R. irregulare*/INCAM-11 y recibiendo la dosis de K₂O para mayor respuesta

Hojas		Tallo		Raíces tuberosas	
Lluviosa	Poco lluviosa	Lluviosa	Poco lluviosa	Lluviosa	Poco lluviosa
28,3 ± 0,12	28,4 ± 0,08	23,3 ± 0,25	23,3 ± 0,14	32,9 ± 0,12	32,5 ± 0,14

Tabla elaborada a partir de la información de las tablas 27 y 30. En ninguna de las épocas existió efecto significativo de los factores cultivar y años.

Influencia de la inoculación con HMA en la Eficiencia Agronómica (EA) del fertilizante potásico.

En la figura 10 se presenta la EA obtenidas para los mejores tratamientos de los experimentos 5 y 6 en presencia o no de la inoculación y que se corresponden con la aplicación de 75 kg ha⁻¹ de K₂O en presencia de la inoculación (75 K₂O + HMA) y de 150 kg ha⁻¹ de K₂O en ausencia de esta, para las diferentes combinaciones de épocas x cultivar x año.

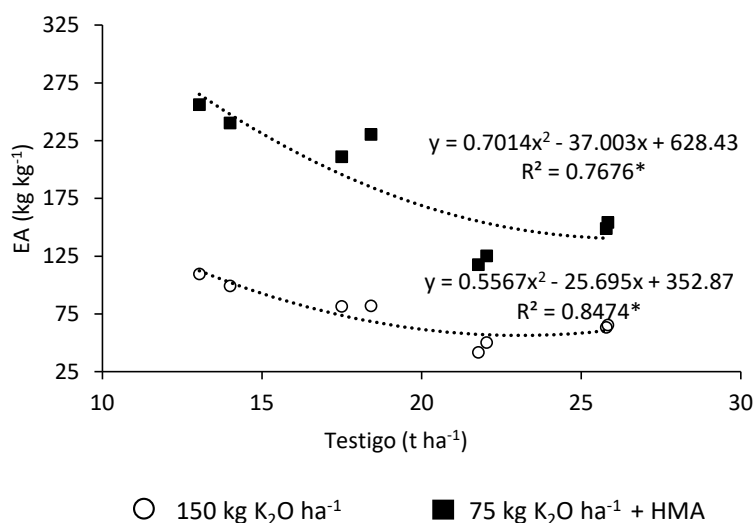


Figura 10. Experimentos 5 y 6. Eficiencia agronómica (EA) del fertilizante potásico para los tratamientos más productivos, en presencia y ausencia de la inoculación vs. el rendimiento del tratamiento testigo en cada una de las combinaciones época-cultivares-años

Se puede observar como la EA para ambos tratamientos esta inversamente relacionada con el rendimiento del tratamiento testigo ($P < 0,000$), es decir mientras mayor fue el rendimiento obtenido en el tratamiento testigo sin fertilizante potásico, menor fue la EA; no obstante, en cualquiera de las combinaciones época-cultivares-años siempre la EA obtenida en el tratamiento inoculado fue superior a la encontrada en el tratamiento no inoculado que recibió la dosis óptima de fertilizante potásico, con incrementos entre 135 y 180 %.

Discusión: Si bien los efectos de las micorrizas sobre la absorción del potasio no fueron señalados desde un inicio e incluso han sido poco estudiadas (García y Zimmerman, 2014), ya los resultados de Marschner *et al.* (1994) y Liu *et al.* (2002) establecieron que hay un

efecto directo de las micorrizas sobre la absorción de este nutriente. Asimismo, otras informaciones han asociados los incrementos en la absorción como parte de los mecanismos de las plantas micorrizadas para ser más tolerantes a la salinidad (García y Zimmeramn, 2014). Más adelante los trabajos con ^{86}Rb confirmaron la absorción “directa” basado en los métodos isotópicos (Fernández, 2012).

Los resultados obtenidos dejaron claro el efecto beneficioso de las micorrizas sobre la absorción de potasio expresado en que se garantizaron altos rendimientos para ambos cultivares y épocas con menores cantidades de fertilizante potásico y alcanzando mayores concentraciones de potasio, que los homólogos no inoculados e incluso superiores a cuando se compararon con el mejor tratamiento de fertilización en plantas no inoculadas.

Los incrementos en las concentraciones de potasio permiten asumir un efecto directo según Correa *et al.* (2015) por lo cual se estableció que en este caso hay una mejora en la nutrición potásica y que se vinculó con los altos porcentajes de colonización micorrízica que se alcanzaron.

En los trabajos de Fernández (1999), Ruíz (2001) y Sánchez (2001) se obtuvieron incrementos en las concentraciones de potasio en los tratamientos inoculados con cepas eficientes, aunque el esquema de aplicaciones de porcentaje de fórmulas completas u abonos orgánicos podía enmascarar la interpretación de los resultados.

En publicaciones más recientes (González, 2014) y Ruíz *et al.* (2016 a y b) con esquemas de trabajos similares a los utilizados en este trabajo, aunque en otros cultivos, encontraron en todos los casos que la inoculación de la cepa eficiente garantizó altos rendimientos, con menores cantidades de fertilizantes y un satisfactorio funcionamiento micorrízico e incrementos en la concentración de potasio con relación a los homólogos no inoculados. En estos trabajos el porcentaje de colonización estuvo ligado con los mejores tratamientos

inoculados fueron de 70 a 75 % en el caso del cultivo de la yuca y de 60 a 65 % en las braquiarias, lo cual corrobora que los valores de porcentajes de colonización asociados con un funcionamiento micorrízico efectivo además del suministro de nutrientes (Rivera y Fernández, 2003) dependen de los cultivos.

En estos experimentos de potasio se obtuvieron los mayores rendimientos en la época lluviosa del año con mayores precipitaciones y a la vez se alcanzaron las mayores frecuencias de colonización y producción de esporas, explicables en que cuando el cultivo se inocula con la cepa eficiente y se maneja adecuadamente el suministro de nutrientes, los rendimientos potenciales a alcanzar y dependientes de las condiciones edafoclimáticas, parecen exigir un mayor funcionamiento micorrízico para que las plantas, en esta condición de suministro subóptimo, puedan adquirir los requerimientos nutricionales asociados a las cosechas en formación.

Las mayores necesidades de la planta pudieron ser satisfechas por las micorrizas y la mayor cantidad de estructuras fúngicas parecen ser consecuencia de una mayor cantidad de C hacia las mismas, lo cual es explicable por los criterios de Kiers *et al.* (2011) de “recompensas mutuas” como base del funcionamiento micorrízico. Lo anterior también es una causa para explicar las diferencias entre las frecuencias de colonización asociados a un funcionamiento efectivo informado por diferentes autores.

La frecuencia de colonización micorrízica que se encontraron en los tratamientos inoculados que no recibieron fertilizante potásico fueron relativamente altos, entre 50 y 58 % similares a los encontrados en los tratamientos análogos de los experimentos de nitrógeno y fósforo (4.2.1. y 4.2.2.) y posiblemente asociado no solo al propio cultivo, sino a que las plantas micorrizadas incrementan la absorción de los nutrientes del suelo y disminuyen los índices críticos de estos (Siqueira y Franco, 1988, González y *et al.*, 2016a)

a lo cual se le sumó que en cada experimento se aplicaron fondos fijos en cantidades suficientes de los otros dos macronutrientes. Es decir, si bien se trabajó en condiciones de respuesta a la fertilización y a la inoculación, el suministro de nutrientes y los contenidos de potasio disponible del suelo en los tratamientos inoculados que no recibieron el nutriente bajo estudio, permitieron valores relativamente altos de funcionamiento, aunque los mismos no se asociaron con un funcionamiento efectivo.

Similar a lo ocurrido en los experimentos de dosis de nitrógeno y fósforo los tratamientos no inoculados presentaron porcentajes bajos y similares de colonización micorrízica, asociados con una baja micorrización residente, tal y como ya informaron otros autores en experimentos de inoculación micorrízica realizados en este cultivo y en este mismo tipo de suelo y localidad (Ruíz, 2001; Marrero *et al.*, 2008; Ruiz *et al.*, 2010).

Las mayores y altas concentraciones de potasio en los tratamientos inoculados con valores superiores tanto con relación al homólogo no inoculado como con relación al tratamiento no inoculado que recibió la dosis óptima de fertilización, dejan claro el efecto de las micorrizas sobre la absorción potásica. Las concentraciones de potasio en las raíces tuberosas fueron un 50 % mayor que las de nitrógeno, lo cual establece tanto la importancia del potasio para este cultivo, como de evaluar la dinámica de este nutriente en el suelo como parte del monitoreo del suministro de potasio a las plantaciones inoculadas.

El efecto positivo de la inoculación en la nutrición potásica también se manifestó en las mayores EA encontradas en comparación con el mejor tratamiento no inoculado (150 kg ha⁻¹ de K₂O) en cualquiera de los cultivares y épocas de plantación. Estos incrementos fueron ligeramente superiores en la época poco lluviosa y explicable por los efectos beneficiosos de las micorrizas en la tolerancia al déficit hídrico (Ruíz-Lozano *et al.*, 2012)

lo cual les permitió a las plantas inoculadas aprovechar mejor el potasio del suelo y de los fertilizantes.

4.2. Grupo de Experimentos II: Utilización de cultivos precedentes inoculados como vía para lograr una micorrización eficiente en el cultivo del boniato

4.2.1. Experimentos del 7 al 12. Cultivos precedentes en época lluviosa y cultivo principal en época poco lluviosa

En ambos precedentes el factor tratamientos fue significativo y los términos de interacción con las repeticiones y años no fueron significativos (Tabla 33), por lo cual solo se presentarán para cada precedente los efectos del factor tratamientos sobre cada una de las variables.

Tabla 33. Valor P de los diferentes factores y términos de interacción en los ANOVA realizados para los cultivos precedentes sembrados en época lluviosa, en las variables rendimiento, frecuencia de colonización micorrízica y esporas.

Factores	Maíz			Vigna		
	Rdto	Col (%)	Esp	Rdto	Col (%)	Esp
Tratamientos	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
repeticiones	0,860	0,236	0,442	0,940	0,109	0,797
años	0,704	0,724	0,099	0,497	0,205	0,319
repeticiones x años	0,497	0,770	0,659	0,871	0,376	0,589
tratamientos x años	0,335	0,452	0,161	0,286	0,528	0,365
repeticiones x años	0,233	0,220	0,461	0,286	0,528	0,365

Leyenda: Rdto =Rendimiento (t ha⁻¹), Col =frecuencia colonización micorrízica (%); Esp =esporas 50 g⁻¹

Tanto el maíz como la vigna presentaron respuesta a la inoculación micorrízica, alcanzando altos rendimientos en el maíz (3,6 t ha⁻¹) y en la vigna (2,50 t ha⁻¹), sin diferencias con los tratamientos que recibieron la fertilización de 100 % N P K y sí con relación a los respectivos tratamientos homólogos no inoculados (Tabla 34 A y B). La inoculación micorrízica también originó incrementos significativos en la frecuencia de colonización y esporas contadas, los cuales fueron superiores ($P \leq 0,05$) en el maíz, en comparación con los obtenidos en la vigna. En el maíz la frecuencia de colonización alcanzada fue del 72 %

Tabla 34. Respuesta de dos cultivos precedentes y el boniato en sucesión a la inoculación de la cepa eficiente HMA, incluyendo la influencia sobre el efecto de permanencia de tres intervalos (30, 45 y 60 días) en la sucesión de los cultivos. Resultados de las sucesiones iniciadas en época lluviosa.

A. Maíz época lluviosa				Boniato época poco lluviosa									
				Tratamiento	Plantación 30 días (ddcp)			Plantación 45 días (ddcp)			Plantación 60 días (ddcp)		
Tratamiento	Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp (50 g)		Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp (50 g)	Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp (50 g)	Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp (50 g)
HMA 50 % NPK	3,59a	72,8a	735a	66 %NP %50 K (HMA)	25,75a	72,3a	715a	25,1a	71,8a	713a	25,9a	73,5a	715a
HMA 50 % NPK	3,58a	71,4a	736a	66 %NP %50 K (I-p)	25,49a	70,8a	712a	24,1b	70,1a	712a	20,4b	37,1b	310b
50 % NPK	3,36b	10,9b	71b	66 %NP %50 K	21,33b	10,1b	69b	20,9c	9,9b	69b	20,6b	8,5c	70c
100 % NPK	3,58a	9,5b	54c	100 % NPK	25,84a	9,8b	61c	25,5a	8,9b	60c	25,8a	8,5c	60d
Es $\bar{x} \pm$	0,01	0,53	0,99	Es $\bar{x} \pm$	0,23	0,38	1,10	0,20	0,49	1,10	0,21	0,39	1,30
I.C. ₁ P≤0,05	±0,02	±1,04	±1,94	IC ₁ P≤0,05	±0,45	±0,74	±2,16	±0,39	±0,96	±2,16	±0,41	±0,76	±2,55
P	0,00	0,00	0,00	P	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B.Vigna época lluviosa				Boniato época poco lluviosa									
				Tratamiento	Plantación 30 días (ddcp)			Plantación 45 días (ddcp)			Plantación 60 días (ddcp)		
Tratamiento	Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp (50 g)		Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp (50 g)	Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp (50 g)	Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp (50 g)
HMA 50 % NPK	2,5 a	58,8 a	521,0 a	66 %NP %50 K (HMA)	25,8 a	54,3 a	517 a	26,1 a	53,9 a	516 a	26,1 a	55,3 a	516 a
HMA 50 % NPK	2,5 a	57,8 a	520,0 a	66 %NP %50 K (I-p)	25,9 a	54,5 a	516 a	26,1 a	52,9 a	513 a	21,1 b	41,8 b	226 b
50 % NPK	2,1 b	9,3 b	56,0 b	66 %NP %50 K	20,9 b	10,4 b	56 b	21,2 b	9,8	56 b	21,2 b	10 c	56 c
100 % NPK	2,5 a	8,3 b	51,0 c	100 % NPK	26,1 a	8,6 c	41 c	26,3 a	8,4	37 c	26,3 a	8,3 d	41 d
Es $\bar{x} \pm$	0,03	0,27	0,44	Es $\bar{x} \pm$	0,14	0,31	1,0	0,18	0,33	1,5	0,21	0,43	1,5
I.C. ₂ P≤0,05	±0,06	±0,53	±0,86	IC ₂ P≤0,05	±0,27	±0,61	±1,96	±0,35	±0,65	±2,94	±0,41	±0,84	±2,94
P	0,00	0,00	0,00	P	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Col (%) (Frecuencia de colonización micorrízica); Esp (esporas contadas en 50 g⁻¹). HMA: *R. irregulare* /NCAM 11. (ddcp) días después de la cosecha del precedente, (I-p) Inoculación realizada en el cultivo precedente. Las interacciones con las repeticiones y años no fueron significativas para ninguno de los cultivos. Para cada cultivo precedente o intervalo de plantación del boniato, letras diferentes en cada columna, conllevan a diferencias significativas a P≤0,05según Prueba de Tukey. P: valor P del factor tratamientos en los ANOVA realizados. Las comparaciones entre medias de tratamientos correspondientes las dos sucesiones, se realizó utilizando los intervalos de confianza (I.C.) de cada media; las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > IC_1 + IC_2$.

mientras que en la vigna cercanos a 55 %; las esporas presentaron una tendencia similar con conteos de 735 esporas en 50 g de suelo para el maíz y de 520 esporas en 50 gramos de suelo para la vigna.

En relación con el boniato, siempre respondió significativamente a la inoculación y a la mayor fertilización, de forma tal que ambos tratamientos presentaron rendimientos similares en cualquiera de las sucesiones (Tabla 34 A y B) y superiores en 22 % al tratamiento 50 % N P K no inoculado.

En los tratamientos en que se inoculó el cultivo precedente y no se inoculó el boniato, el efecto de permanencia del inoculante aplicado en el precedente sobre la micorrización efectiva del boniato fue positivo en el intervalo de 30 días para ambos precedentes, con rendimientos similares en relación, con los tratamientos en que el boniato también se inoculó.

Cuando el intervalo entre ambos cultivos fue de 45 días, la micorrización vía inoculación del cultivo precedente, solo fue completamente efectiva en la sucesión vigna-boniato. En este intervalo de 45 días, en la sucesión maíz-boniato, aunque el rendimiento alcanzado en el boniato fue superior ($P \leq 0,05$), en comparación con el obtenido en el tratamiento homólogo que nunca fue inoculado, el efecto de permanencia fue solo del 76 %, en comparación con el incremento en rendimiento obtenido cuando ambos cultivos en la sucesión se inocularon. Cuando el boniato se plantó a los 60 días después de la cosecha de los cultivos precedentes inoculados, el efecto desapareció completamente con ambos precedentes.

Tanto la frecuencia de colonización como el número de esporas respondieron significativamente ($P \leq 0,05$) a la inoculación del boniato, con valores superiores cuando el maíz fue precedente. Para cada precedente y en los tratamientos con precedentes inoculados

y boniato sin inocular, se presentaron durante los intervalos de 30 y 45 días, valores similares de ambos indicadores micorrízicos, en relación a los tratamientos en que los dos cultivos en la sucesión se inocularon. Ambos indicadores disminuyeron bruscamente ($P \leq 0,05$) en el intervalo de 60 días, aunque con valores superiores a los tratamientos homólogos no inoculados.

En las dos sucesiones la frecuencia de colonización micorrízica del boniato se asociaron fuertemente con el rendimiento y con la producción de esporas (Figuras 11 A, B, C y D), mostrando en la sucesión maíz-boniato que los mayores rendimientos del cultivo principal se alcanzaron con frecuencias de colonización en el rango de 70 a 75 % y estos, se asociaron con cantidades de esporas promedios de 708 en 50 g de suelo.

Al utilizar la vigna las frecuencias de colonización que se asociaron con los mayores rendimientos fueron inferiores a los alcanzados con el maíz ($P \leq 0,05$) y estuvieron en el rango de 52 a 56 % y con una producción de esporas también inferior ($P \leq 0,05$) del orden de 510 esporas en 50 gramos de suelo.

En las figuras de colonización vs rendimiento en ambas sucesiones (Figura 11 A y 11 C), se puede observar como valores alcanzados, del orden de 40 % de colonización en el intervalo de 60 días, presentaron similar rendimiento que los tratamientos no inoculados con cerca de 10 % de colonización.

4.2.2 Experimentos del 13 al 18. Cultivos precedentes en la época poco lluviosa y cultivo principal en la época lluviosa.

En ambos precedentes el factor tratamiento fue significativo y los términos de interacción no fueron significativos (Tabla 35), por lo cual solo se presentarán para cada precedente los efectos del factor tratamientos, sobre cada una de las variables.

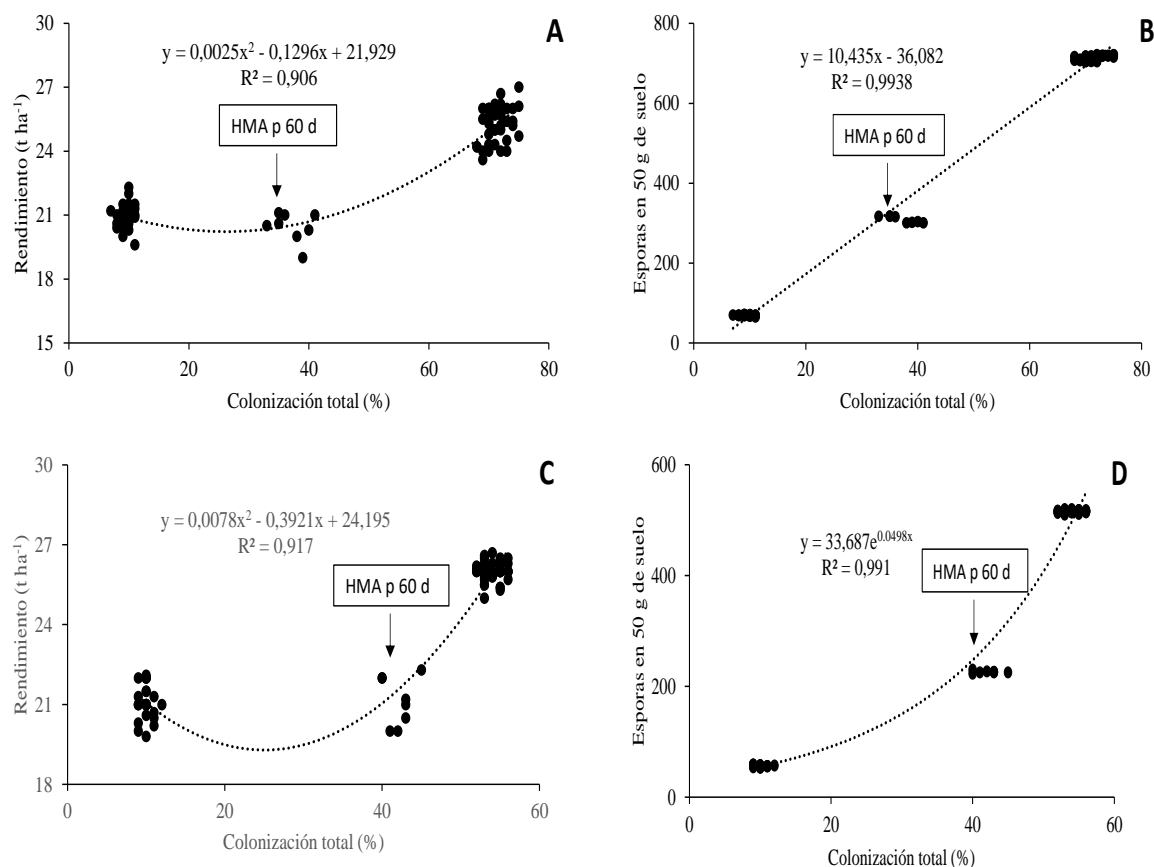


Figura 11. Relaciones en el cultivo del boniato, entre la frecuencia de colonización con el rendimiento y con las esporas micorrízicas, en las sucesiones maíz - boniato (A y B) y en la sucesión vigna - boniato (C y D). Se utilizaron los datos correspondientes a los tres intervalos, los dos años y cuatro réplicas de los tres tratamientos que recibieron la misma dosis de fertilizantes, con y sin inoculación (n = 72). HMA p 60 d (precedente inoculado-boniato sin inocular, intervalo 60 días). La agrupación de puntos en la extrema izquierda de cada gráfico corresponden a los tratamientos no inoculados.

Tabla 35. Valor P de los diferentes factores y términos de interacción de los ANOVA realizados para los cultivos precedentes sembrados en época poco lluviosa en las variables rendimiento, frecuencia de colonización micorrízica y esporas.

Factores	Maíz			Frijol		
	Rdto	Col (%)	Esp	Rdto	Col (%)	Esp
Tratamientos	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
repeticiones	0,677	0,126	0,535	0,363	0,974	0,552
años	0,146	1,000	0,343	0,096	0,529	0,803
tratamientos x repeticiones	0,920	0,077	0,280	0,082	0,589	0,487
tratamientos x años	0,079	0,271	0,243	0,830	0,884	0,099
repeticiones x años	0,478	0,331	0,215	0,595	0,785	0,717

Leyenda: Rdto =Rendimiento (t ha⁻¹), Col =Frecuencia de colonización micorrízica (%); Esp =esporas contadas en 50 g⁻¹

Para ambos precedentes se encontró una respuesta significativa en el rendimiento a la inoculación y a la fertilización (Tabla 36 A y B), de forma tal que los tratamientos inoculados con la cepa eficiente HMA y dosis media de fertilización, presentaron rendimientos similares a los obtenidos con las mayores dosis de fertilización y sin inoculación (100 % N P K) y a la vez superiores ($P \leq 0,05$) en 12,5 y 18 % a los tratamientos homólogos no inoculados para los cultivos de frijol y maíz respectivamente. Asimismo, tanto el maíz como el frijol inoculados, presentaron valores muy superiores en la frecuencia de colonización y en el número de esporas contadas que los alcanzados en los tratamientos no inoculados, aunque los mayores valores correspondieron al maíz inoculado. Las mayores dosis de fertilización presentaron los menores valores de estos indicadores del funcionamiento micorrízico.

El boniato presentó una respuesta positiva a la inoculación y a la fertilización mineral en ambas sucesiones, con valores similares entre los tratamientos de cada experimento (Tabla 36 A y B), alcanzando en la sucesión frijol-boniato, rendimientos mayores (31,5 t ha⁻¹) e incrementos superiores con relación al tratamiento homólogo no inoculado (19 %) que los

Tabla 36. Respuesta de dos cultivos precedentes y el boniato en sucesión a la inoculación de la cepa eficiente HMA, incluyendo la influencia sobre el efecto de permanencia de tres intervalos (30, 45 y 60 días) en la sucesión de los cultivos. Resultados de las sucesiones iniciadas en época poco lluviosa.

A. Maíz época poco lluviosa				Boniato época lluviosa									
				Tratamiento	Plantación 30 días (ddcp)			Plantación 45 días (ddcp)			Plantación 60 días (ddcp)		
Tratamiento	Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp 50 g		Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp 50 g	Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp 50 g	Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp 50 g
HMA 50 % NPK	3,1 a	60,6 a	562 a	66 %NP %50 K (HMA)	29,7 a	62,5 a	553 a	29,4 a	61,8 a	552 a	29,8 a	61,5 a	552 a
HMA 50 % NPK	3,1 a	59,3 a	562 a	66 %NP %50 K (I-p)	29,3 a	61,3 a	551 a	28,4 b	60,6 a	549 a	25,5 b	36,5 b	229 b
50 % NPK	2,6 b	10,5 b	62 b	66 %NP %50 K	24,9 b	10,0 b	61 b	24,1 c	9,5 b	60,8 b	24,2 b	10,0 c	61,0 c
100 % NPK	3,2 a	9,0 c	58 c	100 % NPK	30,2 a	8,6 b	57 c	29,3 a	8,5 b	55,6 c	29,3 a	9,8 c	55,0 d
Es $\bar{x} \pm$	0,03	0,36	0,50	Es $\bar{x} \pm$	0,14	0,41	0,70	0,14	0,36	0,90	0,21	0,40	0,80
I.C. ₁ P≤0,05	±0,06	±0,70	±0,98	IC ₁ P≤0,05	±0,27	±0,80	±1,37	±0,27	±0,70	±1,76	±0,41	±0,78	±1,57
P	0,00	0,00	0,00	P	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B. Frijol época poco lluviosa				Boniato época lluviosa									
				Tratamiento	Plantación 30 días (ddcp)			Plantación 45 días (ddcp)			Plantación 60 días (ddcp)		
Tratamiento	Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp 50 g		Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp 50 g	Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp 50 g	Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp 50 g
HMA 50 % NPK	2,4 a	51,5 a	449 a	66 %NP %50 K (HMA)	31,5 a	54,0 a	438 a	31,1 a	53,8 a	437 a	31,0 a	55,5 a	437 a
HMA 50 % NPK	2,4 a	50,8 a	448 a	66 %NP %50 K (I-p)	31,2 a	53,5 a	437 a	30,7 a	53,1 a	436 a	25,1 b	35,5 b	139 b
50 % NPK	2,1 b	9,1 b	49,0 b	66 %NP %50 K	25,4 b	11,1 b	47 b	25,4 b	10,1 b	47 b	25,1 b	9,1 c	46 c
100 % NPK	2,4 a	8,4 b	44,0 c	100 % NPK	31,4 a	9,5 c	40 c	31,2 a	8,60	39 c	31,2 a	8,6 c	38 d
Es $\bar{x} \pm$	0,02	0,38	0,70	Es $\bar{x} \pm$	0,23	0,40	0,81	0,27	0,42	1,00	0,21	0,36	1,00
I.C. ₂ P≤0,05	±0,04	±0,74	±1,37	IC ₂ P≤0,05	±0,45	±0,78	±1,59	±0,53	±0,82	±1,96	±0,41	±0,71	±1,96
P	0,00	0,00	0,00	P	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Col (%) (Frecuencia de colonización micorrízica); Esp (esporas contadas en 50 g⁻¹). HMA: *R. irregulare* /INCAM 11. (ddcp) días después de la cosecha del precedente, (I-p) Inoculación realizada en el cultivo precedente. Las interacciones con las repeticiones y años no fueron significativas para ninguno de los cultivos. Para cada cultivo precedente o intervalo de plantación del boniato, letras diferentes en cada columna, conllevan a diferencias significativas a P≤0,05, según Prueba de Tukey. P: valor P del factor tratamientos en los ANOVA realizados. Las comparaciones entre medias de tratamientos correspondientes las dos sucesiones, se realizó utilizando los intervalos de confianza (I.C.) de cada media; las medias serán diferentes si $\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > IC_1 + IC_2$.

obtenidos en la sucesión maíz-boniato, en la cual los rendimientos fueron del orden de 29,6 t ha⁻¹ y los incrementos en rendimiento resultaron del 12,5 %.

De forma similar a la época lluviosa, el efecto de permanencia se alcanzó con ambos precedentes en el intervalo de 30 días; a los 45 días solo se mantuvo completamente con el precedente de frijol inoculado, aunque con el maíz fue del orden del 81 %; a los 60 días desapareció en ambas sucesiones, con rendimientos similares en ese momento, a los tratamientos homólogos que nunca se inocularon.

Tanto la frecuencia de colonización como el número de esporas respondieron significativamente a la inoculación del boniato, con valores superiores cuando el maíz fue precedente. Para cada precedente y durante los intervalos de 30 y 45 días, se presentaron valores similares, en ambos indicadores micorrízicos entre los tratamientos con precedentes inoculados y boniato sin inocular y los tratamientos cuando los dos cultivos en sucesión se inocularon.

Sin embargo, en el intervalo de 60 días ambos indicadores disminuyeron bruscamente, con relación al tratamiento en que ambos cultivos se inocularon y en correspondencia con la desaparición del efecto de permanencia en este intervalo, aunque presentando valores muy superiores ($P \leq 0,05$) a los tratamientos homólogos no inoculados.

En las dos sucesiones la frecuencia de colonización micorrízica del boniato se asociaron con el rendimiento y la producción de esporas (Figura 12). Los resultados muestran que en la sucesión maíz-boniato los rendimientos mayores, se lograron con frecuencias de colonización entre 59 a 64 % los que se asociaron con 550 y 555 esporas, en 50 gramos de suelo.

En el caso del frijol, la frecuencia de colonización que se vincularon con los mayores

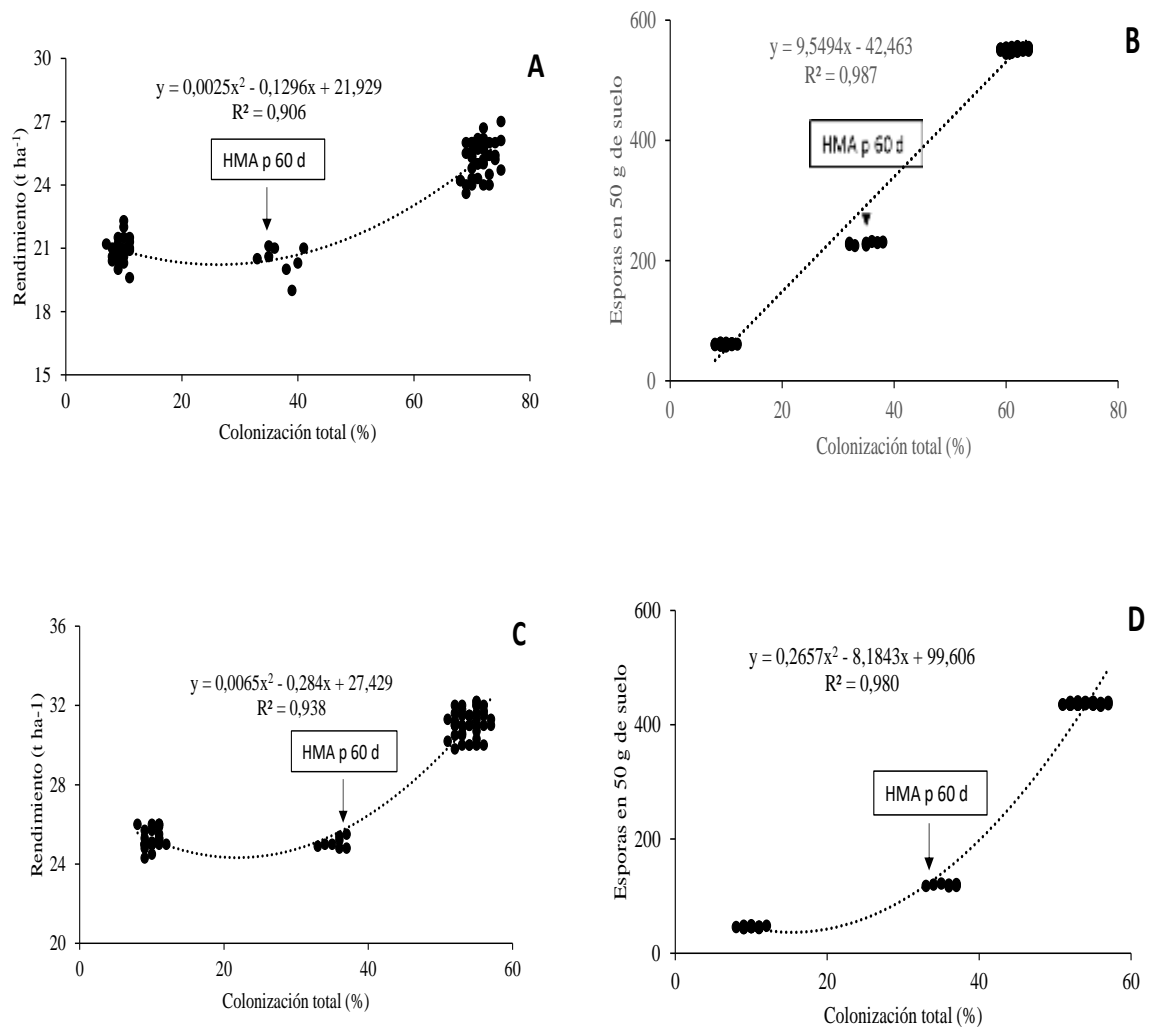


Figura 12. Relaciones en el cultivo del boniato, entre frecuencia de colonización con el rendimiento y con las esporas micorrízicas, en las sucesiones, maíz-boniato (A y B) y frijol-boniato (C y D) iniciadas en la época poco lluviosa. Se utilizaron los datos correspondientes a los tres intervalos, los dos años y cuatro réplicas de los tres tratamientos que recibieron la misma dosis de fertilizantes ($n = 72$ en cada caso). HMA p 60 d (precedente inoculado- boniato sin inocular en intervalo 60 días). La agrupación de puntos en la extrema izquierda de cada gráfico corresponden a los tratamientos no inoculados.

rendimientos fueron inferiores a los alcanzados con el maíz y se encontraron entre 51 a 57 % y presentando una producción de esporas del orden de 440; no obstante, los rendimientos del boniato fueron superiores en la sucesión frijol-boniato.

De forma similar a la otra época, cuando se alcanzó un 40 % de colonización con ambos precedentes en el intervalo de 60 días, se obtuvo similar rendimiento que en los tratamientos no inoculados con la frecuencia de colonización cercanos al 10 % (Figura 12 A y C).

Efecto de la época.

En la tabla 37 se presentan los resultados alcanzados en las diferentes secuencias y épocas. Se seleccionaron los tratamientos en que ambos cultivos fueron inoculados los cuales presentaron siempre los mayores rendimientos y valores de los indicadores de funcionamiento micorrízico.

En la época lluviosa el maíz alcanzó no solo los mayores rendimientos que cuando se sembró en la época poco lluviosa, sino también las mayores frecuencias de colonización micorrízica y conteo de esporas. Al mismo tiempo, la vigna presentó mayor frecuencia de colonización micorrízica y esporas contadas que el frijol.

Las épocas generaron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) en la frecuencia de colonización y en la cantidad de esporas en el boniato y se presentaron los mayores valores cuando los precedentes se sembraron en la época lluviosa. Asimismo el rendimiento del boniato fue superior cuando se plantó en la época lluviosa, es decir con los precedentes sembrados en la época poco lluviosa.

Discusión: La respuesta positiva a la inoculación con una cepa eficiente de HMA, tanto de los cultivos precedentes como del boniato y obtenida en ambas épocas, evidenció que con

Tabla 37. Efecto de la época sobre los rendimientos e indicadores micorrízicos de los cultivos en ambas sucesiones

Precedentes época poco lluviosa				Boniato época lluviosa			
Tratamientos	Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp (50 g)	Tratamientos	Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp (50 g)
Maíz HMA 50 % NPK	3,1 ±0,06	60,6 ±0,70	562 ±1,0	66 %NP %50 K (HMA)	29,6 ± 0,18	61,9 ± 1,17	552 ± 0,80
Frijol HMA 50 % NPK	2,4 ±0,04	51,5 ±0,74	449 ±1,4	66 %NP %50 K (HMA)	31,2 ± 0,26	54,4 ± 0,93	437 ± 0,92
Precedentes época lluviosa				Boniato época poco lluviosa			
Tratamientos	Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp (50 g)	Tratamientos	Rdto (t ha ⁻¹)	Col (%)	Esp (50 g)
Maíz HMA 50 % NPK	3,5 ±0,02	72,8 ±1,04	735 ±1,9	66 %NP %50 K (HMA)	25,5 ± 0,45	72,5 ± 0,35	714 ± 0,80
Vigna HMA 50 % NPK	2,5 ±0,06	58,8 ±0,53	521 ±0,86	66 %NP %50 K (HMA)	26,0 ± 0,23	54,5 ± 1,27	516 ± 1,37

Intervalos de confianza en los precedentes a partir de la información presentada en las tablas 34 y 36. Intervalos de confianza en el boniato calculado a partir de los 12 valores del tratamiento boniato inoculado para cada sucesión en cada época.

Rdto (t ha⁻¹) (Rendimiento); Col (%) (Frecuencia de colonización micorrízica); Esp (esporas contadas en 50 g⁻¹). HMA: *R. irregulare* /INCAM 11

menores dosis de fertilizantes se garantizan altos rendimientos y similares a los obtenidos con la dosis óptima recomendada para el cultivo (100 % N P K) y se encuentra en correspondencia con resultados publicados en diferentes cultivos y condiciones edáficas (Rivera *et al.*, 2007; Ruíz, 2015; Rivera *et al.*, 2017), así como en el grupo I de experimentos y deja claro uno de los beneficios de la inoculación.

Los diferentes cultivos precedentes inoculados y el propio boniato alcanzaron altos porcentajes de colonización, con valores como mínimo muy cercanos a 60 %, que de acuerdo con diferentes autores (Martín *et al.*, 2011, Ruíz *et al.*, 2012; González, 2014, Simó, 2016) se han asociado con un funcionamiento micorrízico efectivo.

Cuando los cultivos se sembraron o plantaron en la época lluviosa, los valores de frecuencia de colonización resultaron mayores, posiblemente asociado con los mayores crecimientos y rendimientos obtenidos en esta época, lo cual puede conllevar a un incremento de las necesidades de estructuras fúngicas que satisfagan los requerimientos de las plantas, tal como ocurre con especies de forrajeras inoculadas cuando se cultivan en una y otra época (González *et al.*, 2016b).

Consecuentemente los mayores valores de esporas obtenidos al sembrar los precedentes en la época lluviosa, debe ser consecuencia de los mayores porcentajes de colonización obtenidos y un mayor crecimiento de ambos cultivos en esta época. A su vez, los mayores valores en el maíz, pueden estar relacionadas con un sistema radical más profuso y la vez mayores colonizaciones, parecen conllevar a mayor cantidad de esporas asociadas. Diversos autores han reportado mayor cantidad de esporas asociados con los mayores porcentajes de colonización y con las mayores producciones de biomasa, en diferentes cultivos inoculados con cepas eficientes (Sánchez *et al.*, 2009; Gonzáles *et al.*, 2015b), en los cuales las mayores cantidades de esporas, se encontraron en época lluviosa comparado

con el poco lluviosa para un mismo cultivo (González, 2014).

En correspondencia con lo anterior Willys *et al.* (2013), plantean que un funcionamiento micorrízico eficiente puede conllevar a que las ganancias de C obtenidas por el hongo se inviertan en la producción de esporas, mecanismo que no solo se favorece en las especies de carácter generalista que se caracterizan por una alta producción de ellas, sino que se presenta en un grupo amplio de géneros y especies de *Glomeromicota* (Koch *et al.*, 2017).

Un aspecto interesante es que las magnitudes de la colonización y las cantidades de esporas producidas por los precedentes inoculados, parecen mantener una influencia directa en la frecuencia de colonización y la cantidad de esporas obtenidas en el boniato en sucesión. Lo anterior se explicaría a partir de la relación positiva que se establece entre la frecuencia de colonización y la reproducción de esporas en los cultivos inoculados con las cepas eficientes, lo cual también ha sido encontrado por otros autores trabajando con la aplicación de cepas eficientes de HMA en otros cultivos y tipos de suelos (González, 2014; González *et al.*, 2015; Ruíz *et al.*, 2016 b; Simó, 2016), así como que resulta muy probable que la mayor cantidad de esporas micorrízicas existentes al plantar el boniato, deben originar mayores colonizaciones y esto posibilite a su vez mayores cantidades de esporas. Sin embargo, esto no necesariamente explica porque se mantienen cantidades similares de esporas a lo largo de cada sucesión, en los tratamientos inoculados.

Los resultados demuestran la factibilidad de utilizar el efecto de permanencia del inoculante aplicado a un cultivo micótrofo precedente como vía para micorrizar eficientemente el boniato, tanto en época lluviosa como poco lluviosa, lo cual había sido encontrado para otros cultivos económicos utilizando abonos verdes inoculados (Martín *et al.*, 2012; Simó, 2016) y en secuencias de cultivos (Ruíz, 2001; Riera, 2003). No obstante en todas las publicaciones se utilizaron intervalos de hasta 30 días entre el corte del precedente y la

plantación o siembra del cultivo sucesor y por tanto con estos resultados se extienden hasta 45 días el intervalo entre cosecha del precedente y plantación del boniato en que se puede utilizar eficientemente esta vía de inoculación, sobre todo cuando se utilizan leguminosas como precedentes. Con el precedente de maíz inoculado se alcanza a los 45 días, un rendimiento equivalente a cerca del 80 % del efecto, lo cual tiene una notable importancia práctica.

La desaparición del efecto a épocas mayores debe ser consecuencia de la interacción con la micorriza residente, así como factores asociados al ambiente edáfico, mesofauna, temperatura, en otros y en diferentes trabajos realizados con cultivos micótrofos e inoculando una cepa eficiente, el efecto desaparece en algún momento, dependiente del tipo de cultivo y su manejo (Marrero *et al.*, 2008; Ruíz *et al.*, 2012; González, 2014; Fernández *et al.*, 2017). La desaparición del efecto es importante ya que disminuye posibles riesgos ecológicos asociados a la inoculación de cepas no residentes (Pellegrino *et al.*, 2012); aunque en el caso específico de *R.irregulare* se ha reportado muy bajo endemismo (Savary *et al.*, 2017) y por tanto estos autores consideran que el riesgo de introducción de una cepa “exótica”, de esta especie, parece menor que con otras especies.

Es de destacar que el efecto se logra aún cuando se ejecutaron las labores comunes de preparación del suelo previo a la plantación del boniato. Si bien se reconoce que las labores al suelo afectan la estabilidad de la micorrización residente (Yang *et al.*, 2014), en los diversos trabajos realizados en Cuba sobre manejo de la inoculación en secuencias de cultivos (Riera, 2003; Ruíz *et al.*, 2012) este efecto de “permanencia” se ha encontrado en presencia de las labores del suelo. Incluso en un trabajo en que se estudio la influencia del laboreo mínimo y convencional sobre la efectividad de esta via de inoculación, los resultados fueron similares y positivos (Marrero *et al.*, 2008), posiblemente relacionado

con el hecho de que las cepas generalistas como *R. irregulare* se caracterizan por la alta producción de esporas (Helgason y Fitter, 2009), propágulos más resistentes al laboreo que el micelio extraradical.

Es importante señalar que el mayor efecto de permanencia obtenido con las leguminosas aún cuando alcanzaron valores menores de frecuencia de colonización y conteo de esporas con el uso del maíz, indican que no se pueden asociar las potencialidades para utilizar uno u otro precedente simplemente por los valores obtenidos en estos indicadores del funcionamiento micorrízico.

Los cultivos inoculados no se colonizan solo con la cepa aplicada (Pellegrino *et al.*, 2012; van der Heijden *et al.*, 2015), así como cada uno posee diferentes capacidades para colonizarse con una u otra cepa (van der Heijden *et al.*, 2015) y aunque la frecuencia de colonización es un indicador del funcionamiento y se relaciona de forma general positivamente con el rendimiento, su magnitud depende de cada cultivo y de las micorrizas residentes, por lo tanto, no se pueden inferir mayores funcionamientos al comparar diferentes cultivos inoculados, teniendo en cuenta solo los valores de estos porcentajes.

Aunque algunos autores han relacionado positivamente la existencia del efecto de permanencia con la cantidad de esporas asociadas al cultivo inoculado, por ejemplo en la sucesión *Canavalia ensiformis* inoculada–banano (Simó, 2016) y en áreas de forraje para varias especies de braquiarias inoculadas (González, 2014), las diferentes características en la reproducción de esporas por los cultivos, las diferencias en la comunidad micorrízica residente, la influencia de las épocas y el propio hecho de que las esporas no son el único propágulo infectivo (Willys *et al.*, 2013; van der Heidjen *et al.*, 2015), si bien pueden permitir hacer valoraciones para un mismo cultivo inoculado en un agroecosistema en particular, no permiten comparar la potencialidad de los diferentes cultivos precedentes

inoculados para obtener el efecto de permanencia.

La utilización del frijol inoculado como precedente parece presentar otro beneficio adicional asociado a los mayores rendimientos encontrados en el boniato, en comparación a los obtenidos en la sucesión maíz-boniato, lo cual puede estar relacionado entre otros con la influencia positiva de los residuos de las raíces de las leguminosas, con mayor facilidad para mineralizarse que los residuos de maíz con mayor relación C/N y teniendo en cuenta la importancia del nitrógeno para el boniato (Ruíz *et al.*, 2012; Espinosa *et al.*, 2015).

Los valores intermedios de colonización alcanzados en el boniato en el intervalo de 60 días por las diferentes sucesiones con precedentes inoculados y boniato sin inocular, se vincularon con rendimientos similares a los alcanzados en los tratamientos homólogos no inoculados. Sin embargo, en cultivos perennes inoculados se ha reportado una desaparición gradual del efecto de permanencia, con decrecimientos proporcionales entre las colonizaciones y los rendimientos asociados (Gonzáles, 2014; Fernández *et al.*, 2017). La aparente contradicción puede estar relacionada con características diferentes del funcionamiento micorrízico en los cultivos, como con el hecho de que quizás no sea lo mismo iniciar una colonización como en este caso, que puede requerir un número mínimo de propágulos y que si se logra se convierte en efectiva, que ir disminuyendo la efectividad de un funcionamiento existente en un cultivo perenne en el cual sin duda está presente un efecto acumulado sobre el crecimiento, que puede enmascarar las relaciones entre el frecuencia de colonización actual y la respuesta de la planta (Janos, 2007).

En los diferentes cultivos las dosis superiores de fertilizantes presentaron los menores valores de los indicadores de funcionamiento, corroborando los aspectos más generales ya informados de que las cantidades de fertilizantes diseñadas para altos rendimientos, disminuyen o inhiben el funcionamiento micorrízico, tanto cuando los cultivos se inoculan (Rivera *et al.*, 2007), como el

proveniente de las comunidades micorrízicas residentes (Willys *et al.*, 2013; van der Heidjen *et al.*, 2015).

4.3 Extracciones y exportaciones

Las extracciones y exportaciones de nutrientes son componentes necesarios para el establecimiento de sus balances de aportes y exportaciones en el agroecosistema y de conjunto con su dinámica en el suelo y el estado nutricional de las plantas, permiten evaluar la suficiencia de los sistemas de suministro de nutrientes.

En las figuras 13, 14 y 15 se presentan las relaciones entre los rendimientos con las extracciones y las exportaciones (kg ha^{-1}) de los tres macronutrientes primarios, respectivamente. Además, se presentan los porcentajes de exportación para cada caso. Es de señalar que estas figuras se construyeron con la información de los dos grupos de experimentos y se incluyeron tanto tratamientos inoculados y no inoculados con diferentes suministros de nutrientes y que por tanto condicionan una gama de rendimientos entre medios y altos para ambos cultivares de boniato.

Se encontraron relaciones altas y positivas entre los rendimientos y las extracciones y con las exportaciones para los tres macronutrientes, de forma tal que en el rango de mayores rendimientos (30 a 37 t ha^{-1}) las extracciones fueron del orden de 130 a 160 kg ha^{-1} de N, de 18 a 24 kg ha^{-1} de P y de 166 a 208 kg ha^{-1} de K. En ese mismo rango los cultivares 'CEMSA 78-354' e 'INIVIT B-2-2005' presentaron índices de extracción de alrededor de 4,3 a 4,5 kg t^{-1} , de 0,6 a 0,64 kg t^{-1} y de 5,4 a 5,7 kg t^{-1} para N, P y K respectivamente, por cada tonelada de raíces tuberosas producida y las exportaciones se encontraron entre 77 y 92 kg ha^{-1} , 11 a 14 kg ha^{-1} y 100 a 133 kg ha^{-1} de N, P y K respectivamente, mientras que los índices de exportación por cada tonelada de raíces tuberosas comestibles producidas fueron del orden de 2,5; 0,37 y 3,5 kg t^{-1} para N, P y K.

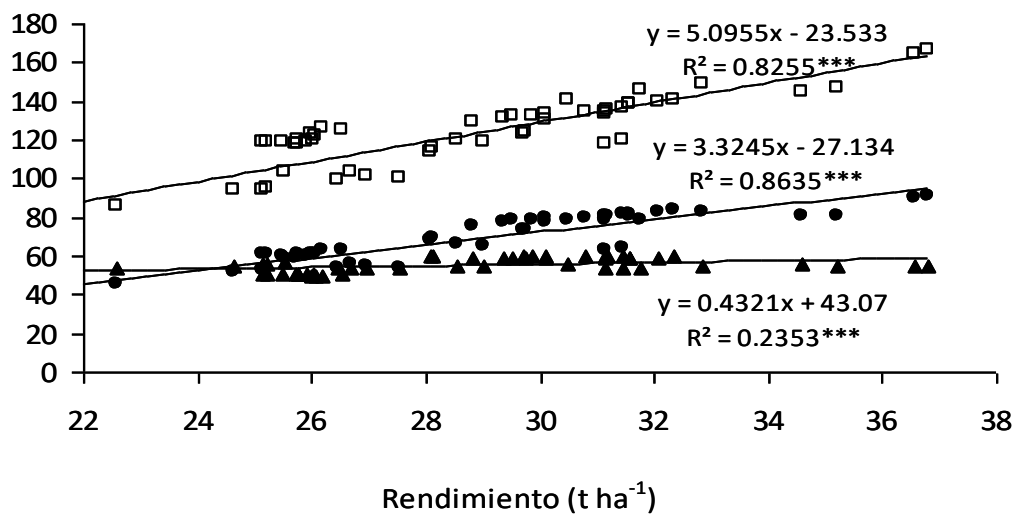


Figura 13. Relaciones entre rendimientos ($t\ ha^{-1}$) vs. extracciones de N ($kg\ ha^{-1}$), exportaciones de N ($kg\ ha^{-1}$) y porcentajes de N (exportado/extraído) respectivamente en *Ipomoea batatas*. Datos de experimentos del Grupo I (tratamientos N 60 HMA, N 60 y N 90 en ambos cultivares y épocas) y del Grupo II (los cuatro tratamientos en las cuatro sucesiones, para el cultivar 'CEMSA 78-354').

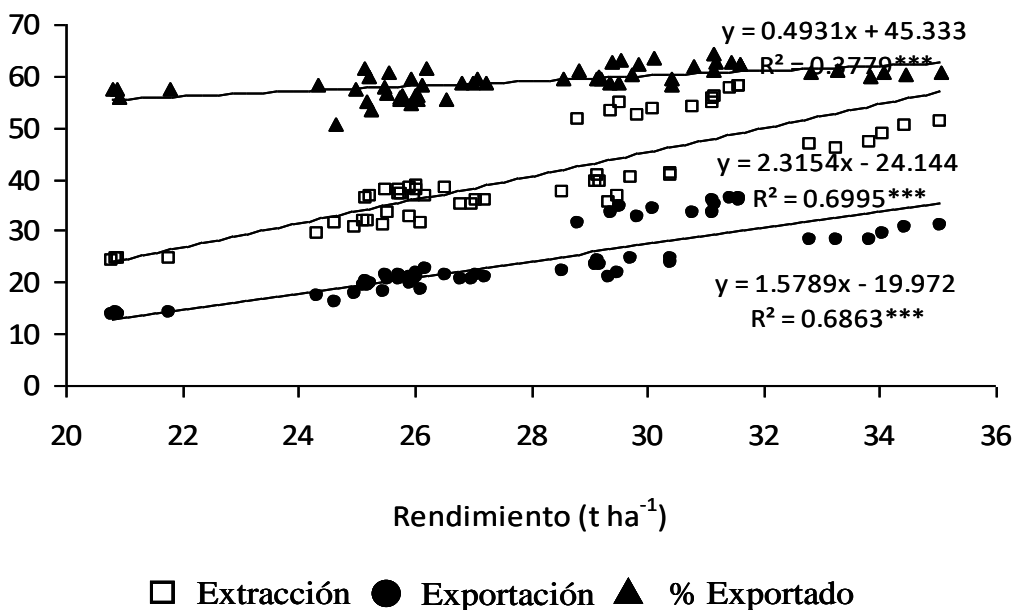


Figura 14. Relaciones entre los rendimientos ($t\ ha^{-1}$) vs. extracciones de P ($kg\ ha^{-1}$), exportaciones de P ($kg\ ha^{-1}$) y porcentajes de P exportado del extraído respectivamente en *Ipomoea batatas*. Datos de experimentos del Grupo I (tratamientos P 50 HMA, P 50 y P 100, en ambos cultivares y épocas) y del Grupo II (los cuatro tratamientos en las cuatro sucesiones, para el cultivar 'CEMSA 78-354').

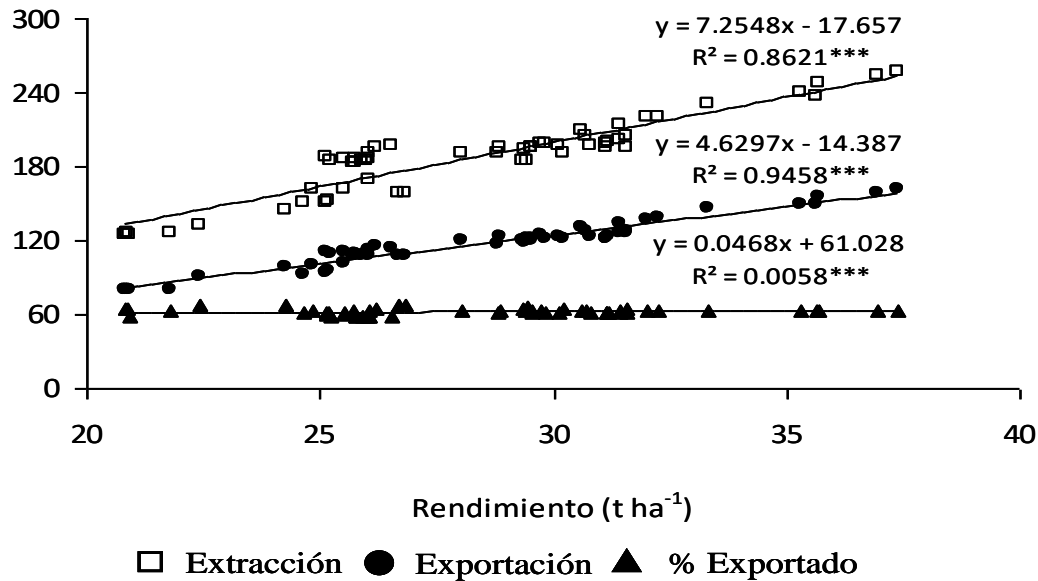


Figura 15. Relaciones entre rendimientos ($t\ ha^{-1}$) vs. extracciones de K ($kg\ ha^{-1}$), exportaciones de K ($kg\ ha^{-1}$) y porcentajes de K exportado del extraído respectivamente en *Ipomoea batatas*. Datos de experimentos del Grupo I (tratamientos K 75 HMA, K 75 y K 150, en ambos cultivares y épocas) y del Grupo II (los cuatro tratamientos en las cuatro sucesiones, para el cultivar 'CEMSA 78-354').

Los porcentajes de exportación (kg exportados por cada kg extraído) del nitrógeno y del fósforo presentaron una ligera tendencia a ser menores, en los rendimientos inferiores y ya a partir de las $26\ t\ ha^{-1}$ se mantuvieron prácticamente constantes con valores de 58 y 60 %, respectivamente. En el caso del potasio se mantuvo con valores similares, en el rango de rendimientos estudiados y se estimó en 62 %.

Berstch (2003) en su amplio compendio sobre extracciones y exportaciones en numerosos cultivos, comunica específicamente para el boniato y para rendimientos de $33\ t\ ha^{-1}$, extracciones entre 157 a $175\ kg\ ha^{-1}$ de N, 22 a $31\ kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 y 224 a $291\ kg\ ha^{-1}$ de K_2O , estimando un índice promedio de extracción de 4,8; 0,79 y $7,48\ kg\ t^{-1}$ de raíces tuberosas producidas. Estos valores fueron similares a los encontrados en este trabajo para el N y el P, aunque superiores a los encontrados en K.

En relación con la exportación Bersch (2003) señala para ese mismo rendimiento, valores de 82 a 90, 17 a 18 y 157 a 179 kg ha⁻¹ de N, P y K; respectivamente, con índices de exportación por cada tonelada de raíces tuberosas producidas de 3, 0,5 y 5 kg para el N, P y K; respectivamente. Asimismo, estimó los índices de exportación en el orden de 60, 62 y 71 % para cada uno de los macronutrientes, en ese orden.

En el caso de la exportación (kg t⁻¹) los valores encontrados en este trabajo fueron similares en el nitrógeno, un poco inferior en el fósforo y bajos en el caso del potasio y en consonancia los índices de exportación fueron similares para el N y P e inferiores para el K. La alta diferencia encontrada en el potasio, posiblemente está asociada con los altos contenidos de potasio existentes en los suelos costarricenses de origen volcánico, en los cuales se realizó el grueso de los trabajos revisados por Bersch (2003) y que pudo haber conducido a una mayor absorción de este nutriente.

Ruíz (2001) en una recopilación sobre estos índices para el boniato en condiciones de Cuba y durante la época 1970-1990, encontró índices de exportación de 1,74; 0,42 y 2,66 kg t⁻¹ para N, P y K respectivamente, para niveles de rendimiento de 35 t ha⁻¹. Estos índices fueron inferiores a los encontrados en este trabajo para el N y el K y superiores a los valores de P y pudiendo tener relación con las altas dosis de fósforo que se aplicaron en la época 1970-1990.

Howeler (2002) informó de exportaciones de 61; 5,80 y 81 kg ha⁻¹ de N, P y K para niveles de rendimiento de 25,2 t ha⁻¹ con índices de exportación similares para N y K, pero más bajos en el P que los encontrados en esta investigación.

Las variaciones en concentraciones de los elementos en función de las condiciones edafoclimáticas y la disponibilidad de los nutrientes han sido ampliamente descritas para los cultivos en general (Carvajal, 1984; Howeler 2002) por tanto los resultados alcanzados

son compatibles a otras informadas en la literatura internacional; no obstante en cualquiera de ellas queda establecido la alta importancia del K para este cultivo, así como que en el rango de rendimientos valorados (20 a 37 t ha⁻¹), un porcentaje cercano al 60 % de los macronutrientes primarios extraídos se exportan.

Los niveles altos y satisfactorios de rendimiento obtenidos para los tratamientos inoculados, en presencia de las dosis adecuadas de los diferentes macronutrientes y que han sido comparables a los obtenidos con las dosis de fertilizantes recomendadas por el instructivo técnico (MINAG, 2012a), a la vez que los índices de extracción y exportación en estos tratamientos hayan sido similares, avalan favorablemente la utilización del inoculante micorrízico que vinculado con dosis medias de fertilizantes garantizaron los requerimientos nutricionales del cultivo.

En la tabla 38 y para cada época se presenta un estimado del balance de aportes y exportaciones del cultivo del boniato, en los tratamientos inoculados del grupo de experimento II. Como los rendimientos en condiciones de producción no son tan altos como en condiciones de investigación, se incluyen los estimados de balances para una plantación con un buen rendimiento de 20 t ha⁻¹ y otra con rendimiento de 16 t ha⁻¹.

Para los rendimientos de 16 y 20 t ha⁻¹ los balances son satisfactorios en general ya que aún en el caso del K₂O, los desbalances fueron menores de 10 kg ha⁻¹ año⁻¹, en un suelo que posee el equivalente a 510 kg ha⁻¹ de K₂O, en base al potasio disponible y sin tener en cuenta las potencialidades del potasio no intercambiable.

Es de destacar que las formas de potasio no intercambiable pueden participar significativamente en la nutrición de diferentes cultivos que extraen altas cantidades de potasio como las especies del género *Urochloa* (González, 2014), variedades de *Morus alba* L. (Pentón *et al.*, 2016) y en caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) (Cuéllar,

Tabla 38. Balance de aportes y exportaciones para diferentes niveles de rendimiento en plantaciones inoculadas con cepas eficientes de HMA en *Ipomoea batatas* (L.) Lam. en suelo Pardos mullidos carbonatados

Tratamiento / Época		Rendimiento (t ha ⁻¹)	Aportes por fertilizantes ^a (kg ha ⁻¹)	Exportaciones (kg ha ⁻¹)			Balance (kg ha ⁻¹)		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	66 % N P 50 % K+HMA/ lluviosa	30,40	60-50-75	76	25,7	127,7	-16	+24,3	-52,7
2	66 % N P 50 % K+HMA/ poco lluviosa	25,74	60-50-75	64	21,8	108,2	-4	+28,2	-33,2
3	66 % N P 50 % K+HMA	20,00	60-50-75	50	16,9	84	+ 10	+ 33,1	- 9,0
4	66 % N P 50 % K+HMA	16,00	60-50-75	40	13,9	67,2	+20	+ 36,1	+7,8

a: Los aportes de fertilizantes se corresponden con las dosis de cada macronutriente para máximo funcionamiento micorrízico y respuesta a la fertilización, obtenidas en el Grupo I de experimentos y comprobadas en el Grupo II de experimentos. Datos de las filas 1 y 2 resultados promedios del grupo II de experimentos (n=32). Datos de las filas 3 y 4 niveles de rendimientos encontrados en condiciones de producción. En todos los casos se utilizaron los índices de exportación encontrados en los Grupo I y II de experimentos

1983), así como se mantienen en equilibrio con las formas intercambiables y son una fuente de suministro de potasio intercambiable en el suelo.

Para los niveles superiores de rendimiento el desbalance es ligero en el nitrógeno, pero no parece ser preocupante ya que solo por la mineralización de la materia orgánica se liberan entre 30 y 45 kg ha⁻¹ en los primeros 20 cm de estos suelos. Además, si en la rotación de los cultivos se incluye un abono verde, se logran balances positivos del nitrógeno en el agroecosistema (Simó, 2016). El fósforo siempre presentó balances positivos.

En el caso del K, si bien los desbalances fueron mayores que en los otros dos macronutrientes y vinculados con los mayores índices de exportación, existen diferentes aspectos que deben permitir el manejo satisfactorio de los inoculantes micorrízicos en el cultivo. 1) Las dosis de fertilizante que permiten un satisfactorio funcionamiento micorrízico, dependen del rendimiento esperado y de la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Rivera y Fernández, 2003), por lo que se debe monitorear la dinámica del potasio en el suelo e incrementar la fertilización cuando se presenten disminuciones en los contenidos; 2) en las curvas de respuesta a N y P se encontró respuesta a la inoculación en presencia de un fondo fijo de K que coincidió con la dosis óptima para obtener altos rendimientos, en ausencia de inoculación.

Los resultados de estos experimentos y de otros realizados con similar esquema experimental en banano, yuca y pastos; permitieron plantear que una simbiosis micorrízica eficiente se obtenía incluso con uno solo de los macroelementos como elemento limitante (Rivera *et al.*, 2016). Por tanto dependiendo de los contenidos de potasio en el suelo, las dosis del mismo pueden incrementarse y en última instancia aplicar aquellas recomendadas para altos rendimientos por el instructivo técnico del cultivo del boniato y obtener los beneficios del funcionamiento micorrízico efectivo, en la nutrición nitrogenada y fosfórica,

además de otros beneficios asociados con bioprotección frente a algunos patógenos (Pérez, 2009; Pozo *et al.*, 2010), mejora de agregados del suelo (Lehman *et al.*, 2017), mayor tolerancia de las plantas al déficit hídrico (Ruíz-Lozano *et al.*, 2012), entre otros (Rillig *et al.*, 2018).

Un desbalance mayor se encontrará si gran parte del follaje también es extraído como en el caso de los bancos de "semillas", donde resultará entonces más apremiante la restitución de los nutrientes extraídos para mantener los niveles productivos.

Por tanto la obtención de altos rendimientos de forma sostenible y basada en el uso de los inoculantes micorrízicos es factible en plantaciones de *Ipomoea batatas* (L.) Lam. y aunque estos incrementan la eficiencia de la fertilización y de la toma de los nutrientes del suelo, se puede garantizar un manejo sostenible de los nutrientes a partir de establecer los balances de aportes, exportaciones y el monitoreo de la dinámica de los elementos disponibles en el suelo y ajustando diferenciadamente el suministro de los diferentes macronutrientes.

4.4. Resultado de las extensiones

En ambas extensiones se encontró en los cultivos precedentes un efecto positivo de la inoculación de la cepa eficiente HMA combinada con el 50 % de la fertilización mineral (Tablas 39 y 40), con la cual se alcanzaron rendimientos similares a los obtenidos con el 100 % de la fertilización, lo cual corrobora uno de los principales efectos beneficiosos de la micorrización y asociada con la disminución de las cantidades de fertilizantes (Rivera y Fernández, 2003; Ruíz *et al.*, 2012; González *et al.*, 2015). Es de señalar que los rendimientos en el frijol, fueron cercanos a la media nacional $1,0 \text{ t ha}^{-1}$ y en el caso del maíz resultaron ligeramente inferiores (ONEI, 2018).

En el cultivo del boniato los rendimientos alcanzados en ambas extensiones fueron superiores a la media nacional de $9,3 \text{ t ha}^{-1}$ (ONEI, 2018). La respuesta a la inoculación fue

Tabla 39. Resultados alcanzados en la extensión ejecutada en la UEB Integral Agropecuaria “10 de Octubre” de Ranchuelo, en suelo Pardo mullido carbonatado

Tratamiento	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Tratamiento	Rendimiento (t ha ⁻¹)
Frijol+100% N P K	0,93	Boniato 66% N P 50% K	11,3
		Boniato+100 % N P K	16,7
Frijol+HMA+50% N P K	0,95	Boniato+HMA+66% N P 50% K	16,4
Frijol+HMA+50% N P K	0,96	Boniato+66% N P 50% K	15,7

HMA: *R. irregulare*/INCAM-11. Cultivar frijol: 'CUL-156'; época de cultivo del frijol: 17/11/2016 al 27/2/2017; 100 % NPK: 100-40-93 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O.

Cultivar de boniato: 'INIVIT B2-2005'; época de cultivo: 1/3 al 5/8/2017; 100 % NPK: 90-75-150 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O respectivamente.

Tabla 40. Resultados alcanzados en la extensión ejecutada en la UEB Integral Agropecuaria “Manicaragua”, en suelo Pardo mullido carbonatado

Tratamiento	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Tratamiento	Rendimiento (t ha ⁻¹)
Maíz+100% N P K	1,00	Boniato 66 % N P 50 % K	9,2
		Boniato+100 % N P K	14,2
Maíz+HMA+50% N P K	1,10	Boniato+HMA+66 % N P 50 % K	13,6
Maíz+HMA+50% N P K	0,98	Boniato+66 % N P 50 % K	13,0

HMA: *R. irregulare*/INCAM-11. Cultivar de maíz: 'P-7928'; época del cultivo de maíz: 10/11/ 2017 a 12/ 3/2018; 100 % NPK: 90-130-170 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O.

Cultivar de boniato: 'INIVIT B-50'; época de cultivo del boniato: 10/4/2018 al 4/8/2018; 100 % NPK: 90-75-150 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O respectivamente.

destacada con incrementos en los rendimientos de 5,1 t ha⁻¹, con relación al homólogo no inoculado en la extensión realizada en la UEB Integral Agropecuaria “10 de Octubre” y equivalentes al 45 % de incremento relativo y de 4,4 t ha⁻¹ y equivalentes al 47,8 % en la extensión ejecutada en la UEB Integral Agropecuaria “Manicaragua”.

En ambas extensiones, los rendimientos alcanzados en los tratamientos inoculados fueron del orden del 96 al 98 % a los obtenidos con el 100 % de la fertilización y alcanzando rendimientos de 16,4 t ha⁻¹ y 13,6 t ha⁻¹, respectivamente, pero aplicando el 66 % de los fertilizantes nitrogenado y fosfórico y el 50 % de las dosis de fertilizante potásico y validando por tanto los resultados obtenidos, en los experimentos del Grupo I con dos de los cultivares comerciales más ampliamente utilizados en el país.

Otro objetivo evaluado fue la validación a escala productiva del efecto de permanencia del inoculante aplicado al cultivo precedente, como vía para micorrizar efectivamente el boniato en sucesión. En las dos extensiones los rendimientos alcanzados con este tratamiento fueron del orden del 96 % del rendimiento obtenido en el tratamiento en que el boniato fue inoculado y por tanto también se validó satisfactoriamente este resultado; con los ahorros significativos en cantidades de inoculante y de manipulación que serían necesarias para una inoculación directa de este cultivo (Ruíz *et al.*, 2012). Es de destacar que este efecto se logró al inocular dos cultivos comunes en la agricultura cubana como el frijol y el maíz y también se ha obtenido a escala productiva utilizando la yuca como precedente inoculada (Rivera *et al.*, 2020).

La base del efecto de permanencia es la utilización de cepas eficientes de HMA de carácter generalista, las cuales establecerán un funcionamiento micorrízico efectivo con cultivos dependientes de la micorrización y por tanto este efecto también puede lograrse con otros cultivos precedentes, siempre que se maneje adecuadamente la época entre la cosecha del

precedente y la plantación del boniato.

4.5. Valoración Económica

La valoración económica (Tabla 41) estableció los beneficios económicos satisfactorios de la inoculación micorrízica, en el cultivo del boniato en ambas extensiones. En la UEB “10 de Octubre” en cuya extensión se obtuvieron mayores rendimientos de boniato, las mayores ganancias se encontraron en el tratamiento en que el boniato se inoculó, aunque con ganancias similares a las obtenidas por el tratamiento que recibió el 100 % N P K y por el tratamiento en que se utilizó el efecto de permanencia y este último fue el que presentó la mayor rentabilidad. En la UEB “Manicaragua” las mayores ganancias se lograron con el tratamiento que recibió el 100 % de la fertilización y similares a las obtenidas en los tratamientos inoculados. La mayor rentabilidad se encontró cuando se utilizó el efecto de permanencia. Este tratamiento no solo disminuyó los costos de fertilización, sino que no presentó costos adicionales asociados con la inoculación del boniato.

Hay dos efectos positivos que no se reflejaron en esta valoración económica y que incrementan los beneficios del manejo del efecto de permanencia. El primero es la disminución en divisas en los tratamientos inoculados del orden 146,8 USD ha⁻¹ y el segundo que con los 35 kg de EcoMic[®] requeridos para la inoculación directa de una hectárea de boniato, se pueden inocular 17,5 ha de maíz o 8,75 ha de frijol, con incrementos en sus rendimientos y pudiendo beneficiar adicionalmente esas superficies de boniato si fueran plantadas en sucesión.

4.6. Consideraciones generales

El boniato es un cultivo micótrofo con alta respuesta a la micorrización y requiere la inoculación de cepas eficientes por condición edáfica para obtener los beneficios asociados a una micorrización eficiente (Ruíz, 2001). Los estudios condujeron a definir las dosis

Tabla 41. Valoración económica de la producción de boniato en las extensiones

Tratamiento	Rendimiento	Ingresos ventas	Costo fertilizantes	Costo EcoMic	Costo total	Ganancia	Beneficio/costo
	(t ha ⁻¹)	(pesos ha ⁻¹)					
Frijol como cultivo precedente							
Boniato 66 % NP 50% K	11,3	14 916	1632,00	0	6 305,38	8 610,62	1,37
Boniato 66 %NP 50 % K (I-p)	15,7	20 724	1632,00	0	6 680,35	14 043,65	2,10
Boniato HMA 66 % NP 50% K	16,4	21 648	1632,00	401,82	7 141,77	14 506,23	2,03
Boniato 100 % NPK	16,7	22 044	2678,16	0	7 811,73	14 232,27	1,82
Maíz como cultivo precedente							
Boniato 66% NP 50% K	9,2	12 144	1632,00	0	6 126,43	6 017,57	0,98
Boniato 66%NP 50%K (I-p)	13	17 160	1632,00	0	6 450,25	10 709,75	1,66
Boniato HMA 66% NP 50 %K	13,6	17 952	1632,00	401,82	6 903,21	11 048,79	1,60
Boniato 100 % NPK	14,2	18 744	2678,16	0	7 598,68	11 145,32	1,47
USD/ha							
Boniato HMA 66 % NP 50% K	240,42						
Boniato 100 % NPK	387,26						

adecuadas de fertilizantes minerales para el cultivo del boniato inoculado, garantizando la obtención de altos rendimientos y reducción de las dosis de N y P_2O_5 en 34 % y las de K_2O en 50 % en comparación con la recomendación establecida (MINAG, 2012a).

Un aspecto a señalar es que posiblemente este sea el primer trabajo en el cultivo del boniato a escala de campo, en que se establezcan los requerimientos de los fertilizantes como portadores simples de los macronutrientes y se evalúen el funcionamiento micorrízico y el estado nutricional asociado mediante un esquema de curva de respuesta al suministro de estos en presencia o no de la inoculación de la cepa eficiente de HMA.

Las disminuciones de los requerimientos de fertilizantes fueron consecuencia de un funcionamiento micorrízico efectivo, el cual se manifestó no solo con el incremento de los rendimientos, sino también de las variables fúngicas, cuyos máximos valores también se obtuvieron en presencia de las dosis óptimas de fertilizantes para el boniato inoculado.

En los experimentos de curvas de respuesta a la fertilización y para cada macronutriente se encontró un rango de dosis de fertilizantes con respuesta positiva a la inoculación. Los valores iniciales de cada rango fue la no aplicación del nutriente y el superior la dosis óptima para alcanzar el máximo funcionamiento micorrízico y consecuentemente los mayores rendimientos. Dosis superiores a la óptima para la micorrización no incrementaron los rendimientos e incluso en algunos años lo disminuyeron y en todos los casos conllevaron a disminución de los indicadores de funcionamiento micorrízico. En los rangos de respuesta se encontraron altos y significativos coeficientes de determinación entre los rendimientos y la frecuencia de colonización micorrízica, indicando la relación entre suministro de nutrientes, la efectividad del funcionamiento micorrízico y el rendimiento..

La inoculación con la cepa eficiente de *R. irregulare* en presencia de la dosis adecuada de fertilizantes incrementó las concentraciones de los tres macroelementos primarios, con

valores siempre mayores ($P \leq 0,05$) que los homólogos no inoculados e incluso que los tratamientos que recibieron las dosis óptimas de fertilización para las plantas no inoculadas. Las concentraciones de cada macronutriente fueron diferente entre los órganos y en el caso de las raíces tuberosas se ordenaron como sigue $K > N \gg P$. Las extracciones y exportaciones de los macronutrientes presentaron un ordenamiento similar $K > N > P$. Los índices de extracción y exportación (kg t^{-1}) obtenidos se encuentran en el rango de los obtenidos por varios autores en las raíces y tubérculos (Ruíz, 2001; Howeler, 2002; Bertsch, 2003) y establecen que para el boniato aproximadamente el 60 % de los macronutrientes extraídos son exportados con la cosecha.

Los incrementos en las concentraciones de los tres macronutrientes en los experimentos de curvas de respuesta, unido con la respuesta en el rendimiento y altamente asociados con el funcionamiento micorrízico permitieron plantear que existió un efecto directo de la micorrización sobre la nutrición de cada uno de los tres macronutrientes en el boniato.

Un resultado que permitirá la utilización a escala productiva de los inoculantes micorrízicos en este cultivo y obtener sus beneficios ha sido la micorrización vía cultivos precedentes inoculados, basados en el carácter generalista de la cepa utilizada y en el efecto de permanencia que se logra. La utilización de dos cultivos muy frecuentes en la agricultura cubana y que a la vez requieren de bajas cantidades de inoculantes, permitió micorrizar eficientemente el boniato y sustituir las altas cantidades de biofertilizantes que requería su inoculación directa (35 kg ha^{-1}) y que impedían una utilización generalizada de estos inoculantes en las tecnologías establecidas para este cultivo. Se debe garantizar un periodo no mayor de 45 días entre la cosecha del frijol inoculado y la plantación del boniato y hasta 30 días para la sucesión maíz-boniato.

Los resultados anteriores fueron validados a escala de extensiones generando rendimientos

de hasta 16 t ha⁻¹ a escala productiva, similares a los obtenidos aplicando las dosis de fertilización recomendadas por el instructivo (100 % N P K) y superiores a los obtenidos con los tratamientos homólogos no inoculados y no siendo necesario inocular el boniato.

La utilización de esta tecnología permitió altos rendimientos con los mayores valores de rentabilidad y menores costos asociados con la disminución de los fertilizantes y la no utilización de los inoculantes micorrízicos en el boniato. No menos importante resulta el ahorro en divisas asociado a la disminución de los fertilizantes, así como propiciar el incremento de la superficie de cultivos inoculados al hacer un uso más eficiente de estos biofertilizantes.

El balance de aporte y exportaciones de los macronutrientes primarios, es un indicador definitorio de la sostenibilidad de la tecnología. Los resultados del balance de aportes y exportaciones dependieron de los rendimientos alcanzados. Para plantaciones con altos rendimientos, del orden de 30 t ha⁻¹ los balances de nitrógeno fueron ligeros y estimados en -16 kg ha⁻¹ cosecha⁻¹, los cuales resultaron inferiores a las cantidades de nitrógeno que se mineralizan anualmente en estos suelos y que pueden ser resueltas con la utilización de abonos verdes inoculados con HMA y rizobios en la secuencia de cultivos que se realice en la localidad.

Para esos niveles de rendimiento en el caso del potasio los desbalances fueron superiores y del orden de -53 kg ha⁻¹ cosecha⁻¹ de K₂O, lo cual a corto plazo resultan poco significativos en este tipo de suelo, que presenta contenidos equivalentes a 560 kg ha⁻¹ de potasio intercambiable. A mediano plazo originará un desbalance significativo, aunque solucionable con incrementos en la fertilización potásica en función de los contenidos existentes en el suelo e incluso en última instancia aplicando las dosis de potasio recomendadas por el instructivo técnico (MINAG, 2012a) para alcanzar altos rendimientos

y partiendo de los propios resultados comprobados en este trabajo, de que se puede alcanzar un funcionamiento efectivo, solo en presencia de un macronutriente primario en condición de elemento limitante (Rivera *et al.*, 2016). En ese hipotético caso los beneficios de la inoculación estarían asociados con la nutrición nitrogenada, la fosfórica y los otros ecoservicios que aporta el funcionamiento micorrízico efectivo.

No obstante para niveles de rendimientos de hasta 20 t ha⁻¹, que son superiores a los 9,93 t ha⁻¹ que se alcanzan con la media nacional (ONEI, 2018) los balances son positivos en el nitrógeno y fósforo y para nada preocupantes en el potasio (-9 kg ha⁻¹) y solucionables con el monitoreo del potasio intercambiable del suelo e incrementos ligeros en las dosis de potasio cuando fuera necesario y aún así aplicando menores cantidades de potasio que las recomendadas en el instructivo técnico del cultivo del boniato. Un enfoque similar ha sido propuesto para el manejo de la fertilización potásica en áreas de *Urochloa* para forraje (González, 2014) las cuales también son altas exportadoras de potasio.

Un aspecto a tener en cuenta es que las cantidades de nutrientes que se encuentran en el follaje en el momento de la cosecha (40 %) requieren ser incorporadas al suelo, de no hacerlo esas cantidades deben ser incluidas en los balances de aportes, exportaciones y los desbalances serían en todos los casos mayores.

A partir de los resultados alcanzados se propone un esquema de utilización de los inoculantes micorrízicos en la tecnología de producción en el cultivo del boniato (Figura 16). En el caso de los cultivos precedentes se incluyen además resultados comprobados con la aplicación de otros bioproductos los cuales resultan compatibles con la inoculación micorrízica de estos cultivos (Rivera *et al.*, 2017) y forman parte de los bioproductos que tienen a mano los agricultores para hacer frente a la escasa disponibilidad de fertilizantes minerales.

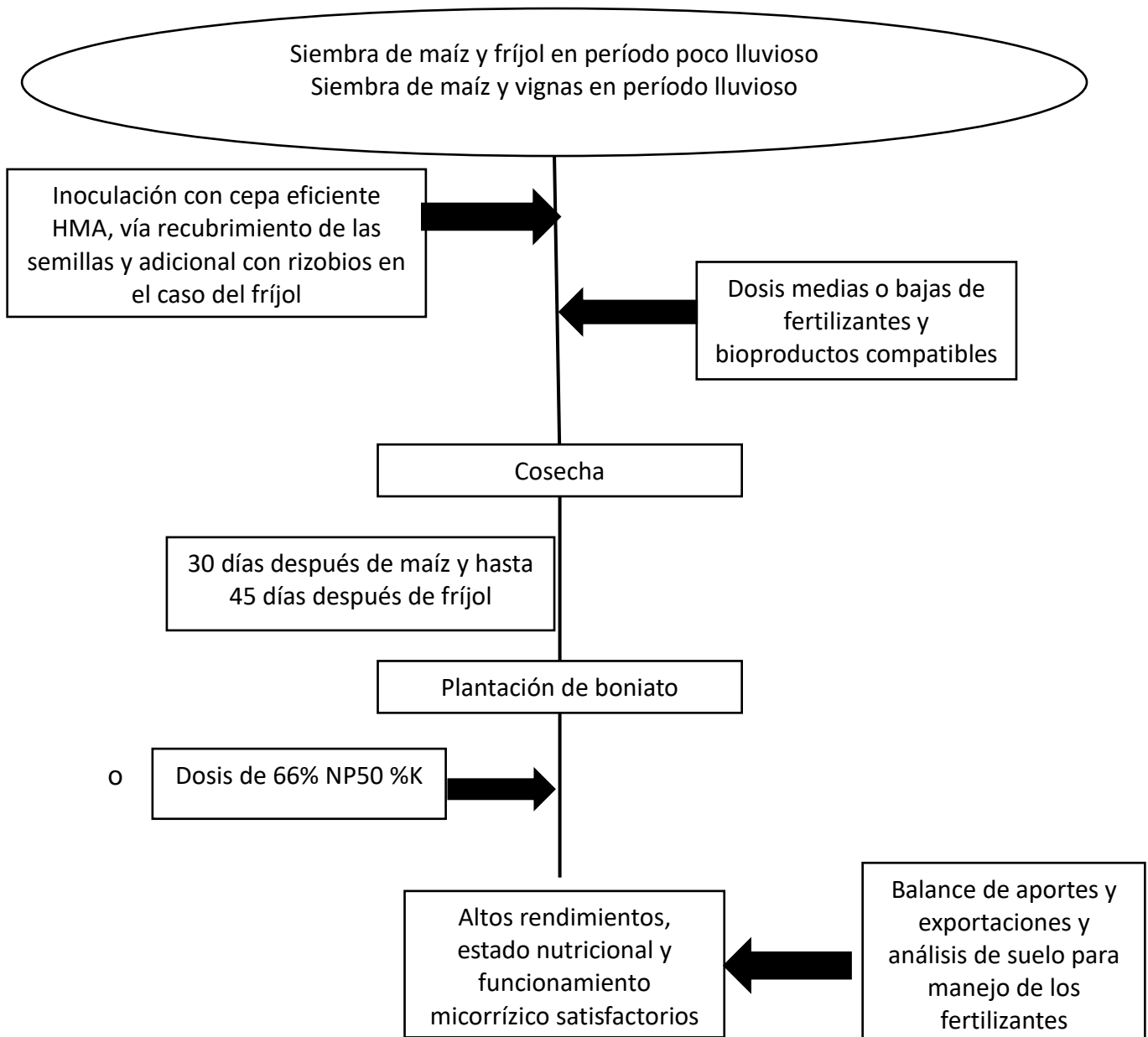


Figura 16. Componentes a incluir en una tecnología de manejo de inoculantes micorrízicos, en el cultivo del boniato que permita altos rendimientos, un uso más eficiente de los insumos y mejores indicadores de rentabilidad

CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

1. La inoculación con la cepa eficiente *R. irregulare*/INCAM-11 es efectiva en los cultivares ('INIVIT B-2-2005' y 'CEMSA 78-354') y en las dos épocas de plantación.
2. Las mayores respuestas del cultivo a la inoculación y expresadas en los rendimientos, los indicadores del funcionamiento micorrízico, las concentraciones de los tres macronutrientes primarios y la eficiencia agronómica de los fertilizantes, requieren de cantidades menores y similares de estos en ambas épocas de plantación, con un efecto directo de la micorrización sobre la absorción de cada uno de ellos.
3. En el rango de fertilización con respuesta positiva a la inoculación de la cepa eficiente de HMA, la frecuencia de colonización micorrízica se asocia estrechamente con el rendimiento y resulta dependiente tanto de las dosis aplicadas de cada uno de los macronutrientes, como de las exigencias de las plantas para alcanzar diferentes niveles de rendimientos.
4. La micorrización de *Ipomoea batatas* (L.) Lam. vía inoculación de los cultivos precedentes con la cepa eficiente de HMA, es efectiva en ambas épocas de plantación y prescinde de su inoculación directa. Utilizando frijol y vigna el efecto de permanencia del inoculante aplicado se extiende hasta 45 días y en el maíz solo hasta los 30 días.
5. Se establece una tecnología para la producción del boniato basada en el uso efectivo de los inoculantes micorrízicos, con mejores indicadores económicos y validada a escala de extensiones.

RECOMENDACIONES

6. RECOMENDACIONES

- Utilizar esta tecnología en el cultivo del boniato en suelos Pardos mullidos carbonatados, basada en la inoculación con la cepa eficiente de HMA del frijol o maíz y en un rango de 30 a 45 días posterior a la cosecha de estos, plantar el boniato y aplicar 60, 50 y 75 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente.
- Establecer campos control en áreas de producción que permitan monitorear los esquemas de suministro de nutrientes empleados, en base a los balances de aportes y exportaciones y la dinámica de los nutrientes en el suelo, para lograr una estrategia de manejo sostenible de los nutrientes que permitan mantener un adecuado funcionamiento micorrízico, garantizar altos rendimientos y satisfactorios indicadores económicos en el cultivo del boniato y a la vez mejorar la fertilidad de los suelos.
- Adecuar y validar esta tecnología en diferentes suelos.
- Emplear los resultados como material de consulta para productores, estudiantes y especialistas, en los estudios de pre y posgrado de la especialidad de Agronomía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilera Gómez, L. I.; Olalde Portugal, V.; Arriaga, M. R.; Contreras Alonso, R. 2007. Micorrizas arbusculares. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3): 300-306.
2. Aguirre, M. F.; Irizar, G. M. B.; Durán, P. A.; Grajeda, C. A.; Peña, M. A.; Loredó, O. C. y Gutiérrez, B. A. 2009. Los biofertilizantes microbianos: alternativa para la agricultura en México. Chiapas, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Centro de Investigación Regional Pacífico Sur. Campo Experimental Rosario Izapa. 86 p
3. Alarcón A.; R. Ferrera-Cerrato. 1999. Manejo de la micorriza arbuscular en sistemas de propagación de plantas frutícolas. *Terra*, 17(3): 179–191.
4. Álvarez, J. M.; Vidal, E.A.; Gutiérrez, R.A. 2012. Integration of local and systemic signaling pathways for plant N responses. *Curr. Opin. Plant Biol.* 15, 185–191.
5. An, L. V.; B. E. Frankow-Lindberg y J. E. Lindberg. 2003. Effect of harvesting interval and defoliation on yield and chemical composition of leaves, stems and tubers of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) plant parts. *Field Crops Research*, 82, 49–58.
6. Arora, N. K.; Mehnaz, S.; Balestrini, R. 2016. Bioformulations: for Sustainable Agriculture. Springer (India) 299 p., DOI 10.1007/978-81-322-2779-3.
7. Asghari, H.; Cavagnaro, T. 2011. Arbuscular mycorrhizas enhance plant interception of leached nutrients. *Functional Plant Biology*, 38. 219-226.
8. Austin, D.F. 1978. The *Ipomoea batatas* complex. I. Taxonomy. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 105(2): 114–129.
9. Austin, D.F. 1979. An Infrageneric Classification for *Ipomoea* (*Convolvulaceae*). *Taxon*., 28(4): 359-361.

10. Austin, D.F. 1988. The taxonomy, evolution and genetic diversity of sweet potatoes and related wild species. In: Gregory, P. (ed.). Exploration maintenance, and utilization of sweet potato genetic resources. International Potato Center, Lima, Peru. p. 27-60.
11. Austin, D.F.; Huamán, Z. 1996. A synopsis of *Ipomoea* (*Convolvulaceae*) in the Americas. *Taxon*, 45(1): 3–38.
12. Baath, E. and Spokes, J. 1989. The effect of added nitrogen and phosphorus on mycorrhizal grown response and infection in *Allium*. *Can J. Bot.*, 67: 3221-3232.
13. Bago, Berta; Pfeffer, Philip; Shachar-Hill, Yair. 2000. Carbon metabolism and transport in arbuscular mycorrhizas. *Journal of Plant Physiology*, 124:949-957.
14. Bagyaraj, D. J.; Sharma, M.P.; Maiti, D. 2015. Phosphorus nutrition of crops through arbuscular mycorrhizal fungi. *Current Sci.* 108(7): 1288-1293.
15. Baker, Susan.; Tagu, D; Delp, G. 1998. Regulation of root and fungal morphogenesis in mycorrhizal symbiosis. *Plant Physiology*, 116: 1201-1207.
16. Barker S.G. y Tagu D. 2000. The role of auxins and cytokinins in mycorrhizal symbiosis. *J Plant Growth Regul* 19: 144-154 p.
17. Barber, S.A. 1995. Soil nutrient bioavailability; a mechanistic approach. John Wiley y Sons. New York. 414 p.
18. Barrer, Silvia. 2009. El uso de hongos micorrízicos arbusculares como una alternativa para la agricultura. *Ciencias Agropecuarias*, 7(1): 123-132.
19. Bearden, B.N.; Petersen, L. 2000. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and aggregate stability of vertisols. *Plant Soil*, 218: 173–183.

20. Berbara, R. L. L.; Souza, F. A.; Fernades, M. S. 2006. Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição. In: Fernandes, M. S. (Ed.). Nutrição mineral de plantas. Viçosa: Sociendade Brasileira de Ciência do Solo. p. 53-88.
21. Bertsch, F. 2003. Absorción de nutrimentos por los cultivos. 1^{era} edición, San José, C.R. ACCS. p.307. ISBN 9968-9422-0-0.
22. Boschini, C. y Vargas, C.F. 2009. Rendimiento y calidad de la morera (*Morus alba*) fertilizada con nitrógeno, fósforo y potasio. *Agronomía Mesoamericana*, 20(2): 285-296. ISSN: 1021-7444.
23. Bronson, B. 1966. Roots and subsistence of the ancient Maya. *Southwestern Journal of Anthropology*, 22(3): 251-279.
24. Bucher, M. 2007. Functional biology of plant phosphate uptake at root and mycorrhiza interfaces. *New Phytologist*,. 173(1): 11–26.
25. Carneiro, R. F. V.; Martins, M. A.; Freitas Marta, S. M.; Detmann, E; Vasquez, H. M. 2007. Inoculação micorrízica arbuscular e doses de fósforo na produção do capim-andropogon, em substrato não estéril. *Rev. Bras. Cienc. Agr.*, 2(3): 212-218. ISSN 1981-0997.
26. Carneiro, R. F. V.; Martins, M. A.; Vásquez, H. M; Detmann, E. 2010. Doses de fósforo e inoculação micorrízica no cultivo de stylosanthes em solo sob condições naturais. *Arch. Zootec.*, 59(227): 415-426. ISSN 0004-0592.
27. Camargo-Ricalde, Sara Lucía.; Montaña, N. M.; De la Rosa-Mera, Claudia Janette y Montaña Arias, Susana Adriana. 2012. Micorrizas: una gran unión debajo del suelo. *Revista Digital Universitaria*, 13(7). [Consultado: abril de 2015]. Disponible en:<<http://www.revista.unam.mx/vol.13/num7/art/index.html>. ISSN: 1067-6079>.

28. Caravaca, F.; Alguacil, M. M.; Azcón, R.; Roldán, A. 2006. Formation of stable aggregates in rhizosphere soil of *Juniperus oxycedrus*: Effect of AM fungi and organic amendments. *Appl. Soil Ecol.*, 33: 30–38.
29. Cardoso, E. J. B. N.; Cardoso, I. M.; Nogueira, M. A.; Baretta, C. R. D. M.; Paula, A. M. 2010. Micorrizas arbusculares na aquisição de nutrientes pelas plantas. In: Siqueira, J. O.; Souza, F. A.; Cardoso, E. J. B. N.; Tsai, S. M. (Eds.). *Micorrizas: 30 anos de pesquisa no Brasil*. Lavras: UFLA. p. 153-214.
30. Carlquist, S. 1988. Tracheid dimorphism a new Pathway in evolution of imperfect trachery elements. *Alison*, 12(1): 103-118.
31. Caruso, T.; Rillig, M.C. 2011. Direct, positive feedbacks produce instability in models of interrelationships among soil structure, plants and arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biol. Biochem.*, 43: 1198–1206.
32. Carvajal, J. F. 1984. Cafeto; cultivo y fertilización. Segunda edición. Instituto Internacional de la Potasa, Berna, Suiza. 254 p.
33. Cavagnaro, Timothy *et al.* 2004. Morphology of arbuscular mycorrhizas is influenced by fungal identity. *New Phytologist*, 151: 469-475.
34. Cavagnaro, T. R. *et al.* 2005. Functional diversity in arbuscular mycorrhizas: exploitation of Soil patches with different phosphate enrichment differs among fungal species. *Plant Cell Environ.*, 28: 642–665.
35. Cavagnaro, T. R. 2008. The role of arbuscular mycorrhizas in improving plant zinc nutrition under low soil zinc concentrations: a review. *Plant Soil*, 304: 315–325.
36. Clarke, R B.; Zeto, S K. 1996. Mineral acquisition by mycorrhizal maize grown on acid and alkaline soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 28(10-11): 1495-1503.

37. CIP. 2017. Ampliando Fronteras Agrícolas. Impactos sobre la Salud, el Hábitat y el Hambre. Informe Anual. Centro Internacional de la Papa. Lima. Perú. pp 4-5.
38. Correa, A.; Cruz, C.; Ferrol, A. 2015. Nitrogen and carbon/nitrogen dynamics in arbuscularmycorrhiza: the great unknown. *Mycorrhiza*. <https://doi.org/10.1007/s00572-015-0627-6>.
39. Corredor, Gloria A. 2008. Micorrizas arbusculares: Aplicación para el manejo sostenible de los agroecosistemas. <http://www.turipana.org.co/Micorrizas.html>. Consulta: 17 de marzo del 2014.
40. Cuenca, Gisela *et al.* 2007. Las micorrizas arbusculares como una alternativa para una agricultura sustentable en áreas tropicales. *Interciencia*, 32(1): 23-29.
41. Cuéllar, I. 1983. Potasio en los principales tipos de suelos de las plantaciones cañeras de Cuba y efectividad de la fertilización potásica de la caña de azúcar. [Tesis en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas]. Instituto de investigaciones de la Caña del Azúcar (INICA), Universidad Agraria de la Habana. 115 pp.
42. Chu, Q.; Zhang, L.; Zhou, J.; Yuan, L.; Chen, E.; Zhang, F.; Feng, G.; Rengel, Z. 2020. Soil plant-available phosphorus levels and maize genotypes determine the phosphorus acquisition efficiency and contribution of mycorrhizal pathway. *Plant Soils*, 449: 357-371. doi. 11104-020-04494-4.
43. Dell'Amico, J.; Torrecillas, A.; Rodríguez, P.; Morte, A.; Sánchez-Blanco, M. J. 2002. Responses of tomato plants associated with the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus clarum* during drought and recovery. *Journal of Agricultural Science*, 138(4): 387-393.

44. Dupré de Boulois, H. 2007. Role of arbuscular mycorrhizal fungi on the accumulation of radiocaesium by plants. Université Catholique de Louvain. Belgique. 292 p.
45. Duchicela, J; González Ma. del C. 2003. La Micorriza Arbuscular en el Contexto de la Agricultura Sustentable. Monografía CEINCI – 02 – 03. 19p.
46. Drew, E .A. *et al.* 2003. Beyond the rhizosphere: growth and function of arbuscular mycorrhizal external hyphae in sands of varying pore sizes. *Plant Soil*, 251: 105–114.
47. Ekanayake, I.; Collins, W. 2004. Effect of irrigation on sweet potato root carbohydrates and nitrogenous compounds. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 2(1): 243-248.
48. Engel E. 1970. Exploration of the Chilca Canyon. *Current Anthropol.*, 11: 55-58.
49. Entry, I.A.; Rygielwicz, P.T.; Watrud, L.S.; Donnelly, P.K. 2002. Influence of adverse soil conditions on the formation and function of Arbuscular mycorrhizas. *Advances in Environmental Research*, 7: 123 – 138.
50. Espinosa, A.; Ruíz Martínez, L.; Rivera Espinosa, R.; Espinosa Cuellar, E. 2015. Efecto del Nitrógeno y hongos micorrízicos arbusculares en dos cultivares comerciales de boniato sobre un suelo Pardo mullido carbonatado. *Centro Agrícola*, 42(2): 39-46. ISSN: 0253-5785.
51. Espíndola, J. A.; de Almeida, D. L.; Guerra, J. M.; da Silva, E. R. y de Souza, F. A. 1998. Influência da adubação verde na colonização micorrízica e na produção da batata-doce. *Pesq. Agropec. Bras.*, vol. 33, no. 3, p. 339-347.
52. FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2017. Disponible en: <http://www.fao.org/statistics/en/> (Última consulta: 17/04/2019).
53. Fernández, F. 1999. Manejo de la asociación micorrízica arbusculares sobre la producción de posturas de café (*Coffea arabica* L. var. catimor) en algunos tipos de

- suelos. [Tesis en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas]. La Habana: INCA. 102 p.
54. Fernández, F.; Gómez, R.; Martínez, M. A.; Noval, B. M. de la.; Rivera R. 2000. *Producto inoculante micorrizógeno*. Patente No. 22 641. Cuba.
55. Fernández, F.; Rivera, R.; Hernández-Jiménez, A.; Herrera, R.; Fernández, K. 2005. Inoculación de los hongos micorrízicos arbusculares y diferentes relaciones de suelo-humus de lombriz sobre el crecimiento del cafeto (*Coffea arabica* L.) cv cauti, bajo la etapa de vivero. Revista Chapingo. *Serie Horticultura*, 11(1): 175-184.
56. Fernández, M. S. (Ed.). 2006. Nutrición mineral de plantas. Viosa, Brasil: SBCS.
57. Fernández, Kalyanne. 2012. Establecimiento de un sistema eficiente de micorrización in vitro de plántulas de *Solanum tuberosum* L. y *Medicago truncatula* Gaertn. [Tesis en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas]. La Habana: Universidad de La Habana, Facultad de Biología: 117p.
58. Fernández, F.; Juárez, J.; Nicolás, E.; Kirchmair, M.; García, F G.; Bernabé, A J. *et al.* 2017. Evolución de la efectividad y persistencia del hongo micorrízico arbuscular *Glomus iranicum* var. nova sobre la fisiología, la adquisición de nutrientes y el rendimiento de las variedades de uva Red Globe y Crimson, tratadas durante tres años en condiciones del Sureste de España. Symborg Technical Report. 36 p. DOI: 10.13140 /RG.2.2.18158.10561.
59. Fisher JB, Jayachandran K. 2002. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance seedling growth in two endangered plant species from south Florida. *International Journal of Plant Science*, 163: 559–566.
60. García, F. O.; Picone, L. y A. Berardo 2005. Fósforo En: Echeverría, H. y F. O. García. (Eds.) Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Ediciones INTA. Balcarce.

61. García, K., Zimmerman, S. D. 2014. The role of mycorrhizal associations in plant potassium nutrition. *Frontiers in Plant Science*, 5(337): 1-9.
62. Gerdemann, J. W.; Nicholson, T. H. 1963. Spore of mycorrhizae endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 46: 235-244.
63. Gianinazzi S.; Gollotte, A.; Binet, M. N.; Van Tuinen, D. and Redecker, D. 2010. Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza*, 20(8): 519–530.
64. Giovanetti, M. y Mosse, B. 1980. An evaluation of techniques to measure vesicular-arbuscular infection in roots. *New Phytol.*, vol. 84, p. 489-500.
65. Gómez, L. 2019. Programa “*emergente*” para la recuperación y desarrollo de los biofertilizantes, bioplaguicidas y estimulantes para sustituir importaciones en la producción agroalimentaria. Informe presentado en Comisión de Bioproductos en el Taller “Mas Ciencia en la Agricultura”. La Habana, 16 p.
66. González, P. J.; Arzola, J.; Morgan, O.; Rivera, R.; Plana, R.; Fernández, F. 2008. Manejo de las asociaciones micorrízicas en pastos del género *Brachiaria* cultivados en suelos Ferralítico Rojo y Pardo Mullido. En: Congreso Científico del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. San José de las Lajas, La Habana.
67. González, P. J.; Arzola, J.; Morgan, O.; Rivera, E. R; Ramírez, J. F. 2011. Efecto de la inoculación de la cepa de hongo micorrícico arbuscular *Glomus hoi-like* en la respuesta de *Brachiaria híbrido* cv. mulato II (CIAT 36087) a la fertilización orgánica y nitrogenada. *Cultivos Tropicales*, 32(4): 5-12.
68. González, P. J. 2014. Manejo efectivo de la simbiosis micorrízica arbuscular vía inoculación y la fertilización mineral en pastos del género *Brachiaria*. [Tesis en

- opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas], Universidad Agraria de la Habana, 99 p. doi: 10.13140/RG.2.2.27770.95685.
69. González, P. J.; Ramírez, J. F.; Rivera, R.; Hernández, A.; Plana, R.; Crespo, G. 2015. Managment of arbuscular mycorrhizal inoculation for the establishment, maintenance and recovery of grasslands. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 49(4): 535-540. ISBN: 0864-0408.
70. González Cañizares, P. J.; Ramírez, J.E.; Rivera Espinosa R.; Hernández Jiménez, A.; Crespo Flores, G. 2016a. Critical levels of phosphorus in the soil for forage legumes, inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi. Technical Note. *Cuban Journal of Agricultural Science*, Volume 50, Number 2, pp.315-320.
71. González Cañizares, P. J.; Ramírez Pedroso, J. F.; Rivera Espinosa, R.; Hernández Jiménez, A.; Crespo Flores, G. 2016b. Efectividad de la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares en dos leguminosas forrajeras cultivadas en dos tipos de suelos. *Forrajes Tropicales*, 4(2): 82-90, doi 10.17138/TGFT (4) 82-90.
72. Govindarajulu, M.; Pfeffer, P E.; Jin, H.; Abubaker, J.; Douds, D D.; Bucking, H.; Lammers, P J.; Shachar-Hill, Y.; Allen, J W. 2005. Nitrogen transfer in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Nature*, 435(9): 819-823. doi:10.1038/nature03610.
73. Guerra, Beatriz Elena. 2008. Micorriza arbuscular. Recurso microbiológico en la agricultura sostenible. *Tecnología en Marcha*, 21(1): 191-201.
74. Hamel C, Plenchette C. 2017. Implications of past, current and future agricultural practices for mycorrhiza mediated nutrient flux. In: *Mycorrhizalmediation of soil: fertility, structure, and carbon storage*. Elsevier, Amsterdam.<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12804312-7.00010-3>.

75. Helgason, T., Fitter, A.H. 2009. Natural selection and the evolutionary ecology of the arbuscular mycorrhizal fungi (Phylum Glomeromycota). *J. Exp. Bot.* 60:2465–2480. doi:10.1093/jxb/erp144.
76. Hernández, J. A.; Pérez, J. J. M.; Bosch, I. D; Castro, S. N. 2015. Clasificación de los suelos de Cuba. Ediciones INCA, Cuba: 93. ISBN: 978-959-7023-77-7.
77. Hodge, A.; Fitter, A.H. 2010. Substantial nitrogen acquisition by arbuscular mycorrhizal fungi from organic material has implications for N cycling. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107: 13754–13759.
78. Hodge, A.; Storer, K. 2015. Arbuscular mycorrhiza and nitrogen: implications for individual plants through to ecosystems. *Plant and Soil*, vol. 386, p. 1-19. ISSN 0032-07. doi 10.1007/s11104-014-2162-1.
79. Howeler R. 2002. Cassava. Mineral Nutrition and Fertilization. In; Cassava. Biology, Production and Utilization, Hillocks R. J.; Tresh J. M.; Belloti, A. C. (Eds). *CAB Internacional*: 115-147.
80. Huamán, Z. 1999. Sweetpotato Germplasm Management (*Ipomoea batatas*), Training manual. International Potato Center (CIP), 218 p.
81. INIFAT. 1993. Frijol Carita Rojo. INIFAT-93. Una opción nada despreciable, 4 p.
82. INSMET. Instituto de Meteorología. 2016. Hojas de asentamiento de las variables meteorológicas diarias. Estación meteorológica No. 326, Santo Domingo, Villa Clara, Cuba.
83. Inzunza, J. C. 2005. Clasificación de los climas de Köppen. *Ciencia Ahora*, 15(8), marzo-abril.

84. Jakobsen, I., Abbott, L. K. and Robson, A. D. 1982. External hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum* L. 2. Spread of hyphae and phosphorus inflow into roots. *New Phytol.*, 120: 371–380.
85. Janos, D.P. 2007. Plant responsiveness to mycorrhiza differs from dependence upon mycorrhizas. *Mycorrhiza*, 17:75–91.
86. Javot, H.; Pumplin, N; Harrison, M. J. 2007. Phosphate in the arbuscular mycorrhizal symbiosis transport properties and regulatory roles. *Plant Cell Environ.*, 30: 310-322.
87. Jia, R. 2013. Weather shocks, sweet potatoes and peasant revolts in historical China. *The Economic Journal*, 124(575): 92–118.
88. João, J. P.; Espinosa, A.; Ruíz, L.; Simó, J; Rivera, R. 2016. Efectividad de cepas de HMA en el cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en dos tipos de suelos. *Cultivos Tropicales*, 37 (1): 48-56, ISSN: 0258-5936.
89. Kafkafi, U.; G. Xu; Imas; H. Magen y J. Tarchitzky. 2001. Potassium and Chloride in Crops and Soils: The Role of Potassium Chloride Fertilizer in Crop Nutrition. Research Topic 22, International Potash Institute, Basel, Switzerland.
90. Karandashov, V y Bucher, M. 2005. Symbiotic phosphate transport in arbuscular mycorrhizas. *Trends in Plant Science*, 1: 1360-1385.
91. Kays, S. 2006. Flavor, the key to sweetpotato consumption. *Acta Horticulturae* , 703: 97-105.
92. Kiers, E T.; Duhamel, M.; Beesetty, Y.; Mensah, J A.; Franken, O.; Verbruggen, E.; Fellbaum, CR.; Kowalchuk, G A.; Hart, M M.; Bago, A.; Palmer, T M.; West, S A.; Vandenkoornhuyse, P.; Jansa, J.; Bucking, H. 2011. Reciprocal rewards stabilize cooperation in the mycorrhizal symbiosis. *Science*, 333: 880–882.

93. Koch, A. M.; Antunes, P. M.; Maherali, H; Klironomos, J. N. 2017. Evolutionary asymmetry in the mycorrhizal symbiosis: Conservatism in fungal morphology does not predict host plant growth response. *New Phytologist*, 214: 1330–1337.
94. Kraiser, T.; Gras, D. E.; Gutiérrez, A. G.; González, B.; Gutiérrez, R. A. 2011. A holistic view of nitrogen acquisition in plants. *J. Exp. Bot.*, 62: 1455–1466.
95. Lehmann, A.; Barto, E K.; Powell, J R.; Rillig M C . 2012. Mycorrhizal responsiveness trends in annual crop plants and their wild relatives -a meta-analysis on studies from 1981 to 2010. *Plant Soil*, 355: 231–250.
96. Lehmann, A. *et al.* 2014. Arbuscular mycorrhizal influence on zinc nutrition in crop plants –a meta-analysis. *Soil Biol., Biochem.* 60: 123–131.
97. Lehmann, A., Leifheit, E.F., Rillig, M.C. 2017. Mycorrhizas and Soil Aggregation. In: Johnson, N., Gehring, C. and Jansa, J (eds). “Mycorrhizal Mediation of Soil”. Elsevier, Amsterdam, pp 241-262. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-804312-7.00014-0>.
98. Le Mire ,G.; Nguyen, M. L.; Fassotte, B.; du Jardin, P.; Verheggen, F.; Delaplace, P.; Jijakli, M.H. 2016. Review: Implementing Plant Biostimulants and Biocontrol Strategies in the Agroecological Management of Cultivated Ecosystems. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 20 (S1): 299-313.
99. Lekberg, Y.; Koide, R.T. 2005. Is plant performance limited by abundance of arbuscular mycorrhizal fungi? A meta-analysis of studies published between 1988 and 2003. *New Phytologist*, 168: 189-204.
100. Li, X. L., Marschner, H. and George, E. 1981. Acquisition of phosphorus and copper by VA mycorrhizal hyphae and root-to-shoot transport in white clover. *Plant Soil*. 136, 49–57.

101. Liu, A.; Hamel, C.; Elmi, A.; Costa, C.; Ma, B; Smith, D. L. 2002. Concentrations of K, Ca and Mg in maize colonized by arbuscular mycorrhizal fungi under field conditions. *Can. J. Soil Sci.*, 82: 271–278.
102. Linnaeus, C. 1737. *Convolvulus batatas*. Hortus Cliffortianus. Amstelaedami. 427 pp.
103. López Zada, M.1980. El boniato. Las Villas: Universidad Central de las Villas: 51.
104. Mabberley, D. J. 1997. The Plant Book. 2nd. edn. Cambridge University Press: 680.
105. Marrero Y.; Simó, J.; Ruíz, L.; Rivera, R.; Plana, R. 2008. Influencia del laboreo sobre el manejo de la simbiosis micorrízica efectiva en una secuencia de cultivos sobre un suelo Pardo con carbonatos. *Cultivos Tropicales*, 29(2): 11-15. ISSN 0258-5936.
106. Marschner, H.; Dell, B. 1994. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. *Plant Soil* 159. 89-102.
107. Marschner, P. 2012. Rhizosphere biology. In: MARSCHNER, P. (Ed.). *Mineral nutrition of higher plants*. 3 ed. London: Elsevier/Academic Press: 369-388.
108. Martí, H.; Corbino, G. y Chludil, H. 2011. Batata: El redescubrimiento de un cultivo. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 21(121): 17-23.
109. Martí, H. 2012. Consuma más batata. Buenos Aires-Argentina, INTA, No. 17.
110. Martín, G.; Rivera, R.; Arias, L; Rentería, M. 2009. Efecto de la *Canavalia ensiformis* y micorrizas arbusculares en el cultivo del maíz. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 43 (2): 191-199.
111. Martín G.; Rivera, R. 2011. Micorrizas, abonos verdes y fertilización nitrogenada en el maíz. Editorial Académica Española, 146 p. ISBN 978-3-8443-3854-6.

112. Martín, G.; Rivera, R.; Pérez, A.; Arias, L. 2012. Respuesta de la *Canavalia ensiformis* a la inoculación micorrícica con *Glomus cubense* (Cepa INCAM-4), su efecto de permanencia en el cultivo del maíz. *Cultivos Tropicales*, 33(2): 20-28. ISSN: 0258-5936.
113. Martin-Robles, N.; Lehmann, A.; Seco, E.; Aroca, R.; Rillig, M. C.; Milla, R. 2017. Impacts of domestication on the arbuscular mycorrhizal symbiosis of 27 crop species. *New Phytologist*, doi: 10.1111/nph.14962.
114. Matos, R. M. B.; Silva, E. M. R.; da; Lima, E. 1999. Fungos micorrízicos e nutrição de plantas. Seropédica: Embrapa Agrobiologia. EMBRAPA–CNPAB. Documentos 98. 36p.
115. Miller, R M.; Jastrow, J D. 2000. Mycorrhizal fungi influence soil structure. En Kapulnik Y, Douds DD (Eds.) *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function*. Kluwer. Dordrecht, Holanda: 3-18 p.
116. MINAG. 1984. Manual de interpretación de los índices físico-químicos y morfológicos de los suelos cubanos. Editorial Científico-Técnica, Ciudad de La Habana, Cuba: 136 p.
117. MINAG. 2010. Guía técnica del cultivo del frijol común. Instituto de Investigaciones de Granos: 12 p.
118. MINAG. 2012a. Instructivo Técnico sobre el cultivo del boniato. Ministerio de la Agricultura. SEDARI/AGINFOR. Ciudad de la Habana, Cuba: 24 p.
119. MINAG 2012b. Manual de fichas de costos Tecnológicos para la elaboración del plan 2012 de la economía. 114 p.
120. Montaldo, A. 1991. Cultivo de Raíces y Tubérculos Tropicales. 2ed. IICA: 408 p.

121. Montes. A.; Hernández, R.; Oropeza, C.; Díaz, E; Arias, J. 2010. Composición mineral y comparación de raíces reservantes de variedades de batatas (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) cultivadas en la isla de La Palma, España. RVCTA 1:1-19.
122. Morales, A. 2014. Mejoramiento genético del boniato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) en Cuba. Curso Internacional en La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). Disponible en: http://cadenahortofruticola.org/admin/bibli/916Mejoramiento_genetico_COL.pdf (Última consulta: 01/05/2017).
123. Morales, A; Morales, A; Rodríguez del Sol, Dania; Pastrana, I y Méndez, Claudia. 2017. Origen, evolución y distribución del boniato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.). Una revisión. Rev. *Agricultura Tropical*, 3. (1):1-13. ISSN on line: 2517-9292.
124. Morell, F.; Hernández, A.; Borges, Yenía.; Marentes, Francy L. 2009. La actividad de los hongos micorrízicos arbusculares en la estructura del suelo. *Cultivos Tropicales*, 30(4). ISSN 0258-5936.
125. Mukhongo, R.W.; Tumuhairwe, J.B.; Ebanyat, AbdelGadir, A.H.; Thuita, M.; Masso, C. 2017. Combined Application of Biofertilizers and Inorganic Nutrients Improves Sweet Potato Yields. *Front. Plant Sci.*, 8:219. doi: 10.3389/fpls.2017.00219.
126. NRAG 564. 1982. Análisis vegetal. Análisis foliar. Métodos de ensayo. NRAG 564:82. Ciudad de La Habana: MINAG: 13 p.
127. NC-10 390. 1999. Calidad del suelo. Determinación de pH. NC-ISO 10 390:99. Ciudad de la Habana. 9 p.
128. NC-51. 1999. Calidad del suelo. Determinación del porcentaje de materia orgánica. NC 51:99. Ciudad de La Habana. 9 p.

129. NC-52. 1999. Calidad del suelo. Determinación de las formas móviles de fósforo y potasio. Ciudad de La Habana.11 p.
130. NC-209. 2002. Calidad del suelo. Determinación de los aniones y cationes solubles en los extractos suelo-agua y el porcentaje de saturación. NC 209:02. Ciudad de La Habana.10 p.
131. Netto, D.V. 2008. Apuntes de clase-Facultad de Agronomía. U.B.A. Biología. Las plantas y los minerales. Disponible en: http://www.fisicanet.com.ar/biologia/fisiologia/ap01_absorcion_de_minerales.php. Consultado en Septiembre de 2016.
132. Netu, N.; Aggarwal, A.; Tanwar, A. y Alpa, A. 2012. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi and *Pseudomonas fluorescens* at different superphosphate levels on linseed (*Linum usitatissimum* L.) Growth response. *Chilean J. of Agric. Res.*, 72: 237-243. ISSN 0718-5839.
133. Nishiyama, I. 1971. Evolution and domestication of the sweet potato. *Bot. Maj.* Tokyo, 84: 377-387.
134. O'brien P. J. 1972. The sweet potato: its origin and dispersal. *Am. Anthropologist* 74: 343-365.
135. O'Dea, M. E. 2007. Fungal mitigation of soil erosion following burning in a semi-arid Arizona savanna. *Geoderma*, 138:79-85.
136. ONEI (Oficina Nacional de Estadística e Información). República de Cuba. 2018. Sector agropecuario. Indicadores seleccionados. Enero-Diciembre de 2013. [En línea]. [Consultado: abril de 2019]. Disponible en: <www.onei.cu/pdf>.
137. Paneque, V. M. y Calaña, J. M. 2001. La fertilización de los cultivos aspectos teórico prácticos para su recomendación. Departamento de Biofertilizantes y Nutrición de las Plantas. INCA.

138. Parihar, M.; Meena, VJ.; Mishra, PK.; Kumar, P.; Rakshit, A.; Choudhary, M *et al.* 2019. Arbuscular mycorrhiza: aviable strategy for soil nutrient loss reduction. Archives of Microbiology, <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01653-9>.
139. Parniske, M. 2008. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology*, 6: 763-775.
140. Pellegrino, E.; Turrini, A.; Gamper, HA.; Cafa, G.; Bonari, E.; Young, PW. *et al.* 2012. Establishment, persistence and effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungal inoculants in the field revealed using molecular genetic tracing and measurement of yield components. *New Phytologist*, 194: 810–822. doi: 10.1111/j.1469-8137.04090.x.
141. Pellegrino, E.; Opik, M.; Bonari, E.; Ercoli, L. 2015. Responses of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi: A meta-analysis of field studies from 1975 to 2013. *Soil Biology & Biochemistry* 84: 210-217. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.02.020>.
142. Pérez, C. A.; Rojas, S. Johanna y Montes, V. D. 2011. Hongos formadores de micorrizas arbusculares: una alternativa biológica para la sostenibilidad de los agroecosistemas de praderas en el caribe colombiano. *Rev. Colombiana Cienc. Anim.*, 3(2): 366-385.
143. Pérez, E. 2009. Hongos micorrízicos arbusculares (HMA) para la bioprotección de patógenos en el cultivo del tomate (*Solanum Lycopersicum* L.). Tesis de Grado (Dr. En Ciencias Biológicas), Facultad de Biología, Universidad de la Habana 100 p.
144. Perry, L. 2002. Starch granule size and the domestication of manioc (*Manihot esculenta*) and Sweet potato (*Ipomoea batatas*). *Economic Botany*, 56: 345-349.

145. Peng, S.; Shen, H.; Yuan, J.; Wei, C.; Guo, T., 2011. Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on soil aggregation dynamics of neutral purple soil. *Shengtai Xuebao Acta Ecol. Sin.*, 31: 498–505.
146. Pentón, G.; Martín, G.; Hernández-Jiménez, A.; González, P.J.; Rivera, R. 2016. Estudio sobre la participación del potasio del suelo en la nutrición de *Morus alba* (L.). *Cad. Cienc. Agra.*, 8(3): 68-77.
147. Peterson, Larry; Massicote, Hugues y Melville, Lewis. 2004. Mycorrhizas: Anatomy and cell biology. Ottawa: NRC Research press: 173 p.
148. Piao, C. H.; Liu, C.; Wang, Q. S. H. 2012. Isotopic evaluation of the role of arbuscular mycorrhiza in nitrogen preference in Chinese fir seedlings. *Pedobiologia* 55: 167-174. doi:10.1016/j.pedobi.2012.03.003.
149. Phillips, J. M.; Hayman, D.E. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.*, 55: 158-161.
150. Pozo M. J.; Azcón-Aguilar C. 2007. Unraveling mycorrhiza-induced resistance. *Current Opinion in Plant Biology*, 10: 393–398. ISBN: 1369-5266.
151. Pozo, M. J.; Jung, S. C.; López-Ráez, J. A.; Azcón-Aguilar, C. 2010. Impact of arbuscular mycorrhizal symbiosis on plant response to biotic stress: The role of plant defence mechanisms, in H. Koltai and Y. Kapulnik (eds.), *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function*. Springer Netherlands, Dordrecht: p. 193–207.
152. Prado, R. M. 2008. *Nutrição de plantas*. São Paulo: Editora UNESP.
153. Rai, A.; Rai, S.; Rakshit, A. 2013. Mycorrhiza-mediated phosphorus use efficiency in plants. *Environm. Exp. Biol.*, 11: 107–117. ISSN 2255-9582.

154. 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: 515–531.
155. Riera, M. 2003. Manejo de la biofertilización con hongos micorrízicos arbusculares y rizobacterias en secuencias de cultivos sobre suelo Ferralítico Rojo. Universidad Agraria de La Habana. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, La Habana, Cuba: 100 p.
156. Rillig, M.C. 2004. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Can. J. Soil Sci.* 84: 355-363.
157. Rillig, M. C.; Mummey, D. L. 2006. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*, 171: 41-53.
158. Rillig, M. C.; Aguilar-Trigueros, C.A.; Camenzind, T.; Cavagnaro, R.T.; Degrune, F.; Hohmann, P. *et al.*,. 2018. Why farmers should manage the arbuscular mycorrhizal symbiosis? *New Phytologist*, doi: 10.1111/nph.15602.
159. Rivera, R; Treto, E. 1989. Influencia de la fertilización-N y el tipo de planta cultivada sobre la dinámica de las formas minerales del N en suelo Ferralítico Rojo compactado. *Cultivos Tropicales*, 11(2): 71-80.
160. Rivera, R.; Fernández, K. 2003. Bases científico-técnicas para el manejo de los sistemas agrícolas micorrizados eficientemente. En: Manejo efectivo de la simbiosis micorrízica, una vía hacia la agricultura sostenible. Estudio de caso: el Caribe. Eds: Rivera, R. y Fernández, K. INCA. La Habana. p. 51-94. ISBN: 959 – 7023 – 24 – 5. doi: 10.13140/2.1.1813.9203.
161. Rivera, R.; Fernández, F, 2006. Inoculation and management of mycorrhizal fungi within tropical agroecosystems. In: Biological approaches to sustainable soil

- systems. Norman Uphoff *et al.*, (Ed.) CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA. p. 479-489. ISBN- 10: 1-57444- 583-9.
162. Rivera, R.; Fernández, F.; Fernández, K.; Ruíz, L.; Sánchez, C.; Riera, M. 2007. Advances in the management of effective arbuscular mycorrhizal symbiosis in tropical ecosystems. En: Hamel, C. y Plenchette, C. (Eds.). *Mycorrhizae in Crop Production*. Binghamton, N. Y: Haworth Press: 151-196. ISBN: 978-1-56022-306-1.
163. Rivera, R.; Sánchez, C.; Caballero, D.; Cupull, D.; González, C. y Urquiaga, S. 2010. Abonos verdes e inoculación micorrízica de pasturas de café sobre suelos Ferrialíticos Rojos Lixiviados. *Cultivos Tropicales*, vol. 31, no. 2, p. 75-81. ISSN: 0258-5936.
164. Rivera, E. R.; Fundora, S. L. R.; Calderón, P. A.; Martín, C. J. V.; Marrero, C. Y.; Martínez, L. R.; Simó, G. J.; Riera, N. M.; Joao, J. P. 2012. La efectividad del biofertilizante EcoMic® en el cultivo de la yuca. Resultados de las campañas de extensiones con productores. *Cultivos Tropicales*, 33(1): 5-10. ISSN 0258-5936.
165. Rivera R, Ruíz L, Martín G, Pérez E, Nápoles M C, García M, *et al.* 2015a. Manejo conjunto e impacto de biofertilizantes micorrízicos y otros bioproductos en la producción agrícola de diferentes cultivos. Informe Primer Semestre Junio 2015. Instituto Nacional Ciencias Agrícolas, Cuba: 29 p. doi 10.13140/RG.2.1.2416.3605.
166. Rivera R.; González P.J.; Hernández-Jiménez A. *et al.* 2015b. La importancia del ambiente edáfico y del pH sobre la efectividad y la recomendación de cepas eficientes de HMA para la inoculación de los cultivos. VIII Congreso de la Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo, del 2 al 5 de Junio. La Habana, Cuba. ISBN: 978-959-296-039-8.

167. Rivera, R.; Armario D.; Espinosa A.; González P. J.; Ruíz. L. 2016. ¿Se establece una simbiosis micorrízica efectiva en presencia de un solo macronutriente limitante? En: XX Congreso Científico del INCA, 2016, nov 23-25 del 2016, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. Memorias. CD-ROM. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. ISBN 978-959-7023-89-0.
168. Rivera, Espinosa, R.; Simó González, J.; Martín Alonso, Gloria; García Rubido, Milagros, Espinosa Cuellar, A.; Nápoles María Caridad; Hernández Forte I.; Ruíz Sánchez, M.; Ruíz Martínez, L.; Hernández Ramírez, J.; González Cañizares, P.J.; Pérez Ortega, E.; Rodríguez Yon, Yakelin y otros. 2017. Informe Final del Proyecto “Manejo conjunto e impacto de biofertilizantes micorrízicos y otros bioproductos en la producción agrícola de diferentes cultivos”. Código: P131LH0010003. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. 135 p.
169. Rivera, R., Fernández, F., Ruíz, L., Fernández, K., González, P.J., Rodríguez, Y y col. 2018. Avances y retos en el manejo de la simbiosis micorrízica arbuscular, vía inoculación de cepas eficientes. Resultados del trabajo en red: 1989-2018. XXI Congreso Científico Internacional del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, 20 al 23 de Noviembre del 2018, Varadero, Cuba.
170. Rivera, R.; Fernández, F.; Ruíz, L.; González, P.J.; Rodríguez, Y.; Pérez, E.; *et al.*, 2020. Manejo, integración y beneficios del biofertilizante micorrízico EcoMic® en la producción agrícola. Ediciones INCA, Mayabeque, Cuba, 155 p. ISBN 978-959-7258-05-6.
171. Rodríguez, M. S. 2001. Prefacio. En: Manejo integrado del gorgojo del camote o tetuán del boniato (*Cylas formicarius* Fab.) en Cuba. Ed. Fausto Sisnero Vera y Jesús Alcázar Sedano. CIP. Lima Perú. pp. 7-8.

172. Rodríguez, M. Sergio. 2010. Conferencia bajo el título. ¿Que agricultura estamos haciendo? Impartida en la jornada inaugural del VIII Encuentro de Agricultura Orgánica y Sostenible, celebrado del 11-14 de marzo de 2010.
173. Rodríguez-Navarro, A; Rubio, F. 2006. High affinity potassium and sodium transport systems in plants. *Journal of Experimental Botany*, 57: 1149-1160.
174. Rodríguez Nodals, A.; Rodríguez, A.; Rodríguez A. 2003. Tecnologías para los huertos intensivos, en rotación con hortalizas, MINAGRI –Grupo Nacional de Agricultura Urbana, La Habana: 12 p.
175. Rosset, Peter M; Martín Bourque. 2001. Lecciones de la Experiencia Cubana. En: Transformando el campo cubano. Avances de la agricultura sostenible. Ed. Fernando Funes, Luís García, Martín Bourque, Nilda Pérez y Peter Rosset. ACTAF La Habana, Cuba: 13-20 pp.
176. Ruíz, L. A.; J. M. Portieles Rodríguez; J. Milian Morales O. 1987. Nutrición mineral y fertilización en el cultivo del boniato (*Ipomoea batatas* (L.)Lam.). Boletín de Reseñas Viandas Tropicales, (5):21.
177. Ruíz, L. 2001. Efectividad de las asociaciones micorrízicas en raíces y tubérculos en dos tipos de suelos [Tesis en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas]. Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA). 102 p.
178. Ruíz, L.; A.; Simó, J; Rivera, R. 2010. Nuevo método para la inoculación micorrízica del cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz). *Cultivos Tropicales*, 31(3): 15-20.

179. Ruíz, L.; Simó, J.; Rodríguez, S.; Rivera, R. 2012. Las micorrizas en cultivos tropicales. Una contribución a la sostenibilidad agroalimentaria. Editorial Académica Española, 239 p. ISBN: 978-3-8484-5382-5.
180. Ruíz, L.; Armario, D.; Rivera, R.; Espinosa, A.; Simó, J.; Espinosa, E. 2016a. Efecto de dosis de nitrógeno, fósforo y potasio combinadas con micorrizas en el cultivo del banano. *Revista Agricultura Tropical*. 2(1) .ISSN:25179292 RNPS: 2397.
181. Ruíz, L.; Espinosa, A.; Camejo, M.; Simó, J.; Rivera, R. 2016b. Efecto de dosis de nitrógeno, fósforo y potasio combinadas con micorrizas sobre el cultivo de la yuca en un suelo Pardo mullido carbonatado. *Revista Agricultura Tropical*, 2 (2) .ISSN:25179292 RNPS: 2397.
182. Ruíz, M. 2015. La importancia del ambiente edáfico y del pH sobre la efectividad y la recomendación de cepas eficientes de HMA para la inoculación de los cultivos. En: VIII Congreso de la Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. (2 al 5 de junio de 2015). [CD-Rom] Memorias. La Habana, Cuba. ISBN 978-959-296-039-8.
183. Ruíz-Lozano, J. M.; Porcel, R.; Bárzana, G.; Azcón-Aguilar, R.; Aroca, R. 2012. Contribution of arbuscular mycorrhizal symbiosis to plant drought tolerance. State of the art. In: *Plant Responses to Drought Stress: From Morphological to Molecular Features*. Ed. R. Aroca. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, p. 335-362. ISBN: 978-3-642-32652-3.
184. Saggin-Junior, A. /et al./. 1994. Interacao fungos micorrízicos versus superfosfato e seusefeitos no crescimento e teores de nutrientes do cafeeiroem solo nao fumigado. *R. bras. Ci. Solo*. 18: 27-36.

185. Saggin-Junior, O.J.; Siqueira, J.O. 1996. Micorrizas arbusculares em cafeeiro. In: Siqueira, J.O.(ed) Avanços em fundamentos e aplicações de micorrizas. Lavras, MG: Universidade Federal de Lavras, p. 203-254.
186. Sánchez, C., 2001. Manejo de las asociaciones micorrízicas arbusculares y abonos verdes en la producción de posturas de cafeto en algunos tipos de suelo. [Tesis en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas]. INCA. Cuba. 105 p.
187. Sánchez, C.; Caballero, D.; Cupull, R.; González, C.; Urquiaga, S.; Rivera, R. 2009. Los abonos verdes y la inoculación micorrízica de plántulas de *Coffea arabica* sobre suelos Cambisoles Gléyicos. *Cultivos Tropicales*, 30 (1): 25-30.
188. Sanchez de Prager, M. 2007. Las endomicorrizas: Expresión bioedáfica de importancia en el trópico. Universidad Nacional de Colombia. Palmira: 115-175.
189. Sangronis, E.; Teixeira, P.; Otero, M.; Guerra, M.; Hidalgo, G. 2006. Manaca, batata y ñame: posibles sustitutos del trigo en alimentos para dos etnias del Amazonas venezolano. *ALAN* 56:122-128.
190. Santos, J. V. 2014. Biofertilizante formononetina (isoflavonóide) como estimulante de micorrização em milho para aumento de produtividade associada a eficiência do uso de fósforo em Minas Gerais. [Tese Doutor em Microbiologia Agrícola] Lavras: Universidade Federal de Lavras. 64 f.
191. Savary, R.; Masclaux, FG.; Wyss, T.; Droh, G.; Corella, JC.; Machado, A. *et al.* 2017. A population genomics approach shows widespread geographical distribution of cryptic genomic forms of the symbiotic fungus *Rhizophagus irregulare*. *The ISME Journal*. 2017:1–14. <http://dx.doi.org/10.1038/ismej.2017.153>.
192. Shüßler, A.; Walker, C. 2011. The *Glomeromycota*: a species list with new families and new genera. Gloucester: The Royal Botanic Garden Edinburgh, The Royal

- Botanic Garden Kew, Botanische Staatssammlung Munich, and Oregon State University. 58 p.
193. Siddiky, M.R.K.; Schaller, J.; Caruso, T.; Rillig, M.C. 2012. Arbuscular mycorrhizal fungi and collembola non-additively increase soil aggregation. *Soil Biol. Biochem.*, 47:93–99.
194. Sieverding, E.; Friedrichsen, J. and Suden, W. 1991. Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems. Sonder publikation der GTZ (Germany), 224: 339-365. ISSN: 0723-9637.
195. Sieverding, E.; da Silva G. A.; Berndt, R.; Oehl, F. 2014. *Rhizoglosum*, a new genus of the *Glomeraceae*. *Mycotaxon*, 129 (2): 373-386. ISSN: 0093-4666.
196. Simó, J.; Martínez, L. R.; R. Espinosa, R. 2015. Manejo de la simbiosis micorrízica arbuscular y suministro de nutrientes en plantaciones de banano cultivar ‘FHIA-18’ sobre suelos Pardos mullidos carbonatados. *Cultivos Tropicales*, 36 (4): 43-54, 2015. ISSN: 0258-5936.
197. Simó González, J. E. 2016.”Manejo integrado de inoculantes micorrízicos arbusculares, el abono verde y fuentes orgánico minerales en la nutrición del banano FHIA-18 (AAAB) en suelo Pardo mullido carbonatado”. Tesis de Doctorado en Ciencias Agrícolas, Universidad Agraria de la Habana. 100 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.33143.32160.
198. Simó, E. J. 2018. Hongos Micorrízicos Arbusculares, abonos verdes y nutrición. Nutrición del banano. Editorial Académica Española. ISBN 978-620-2- 23554-9.
199. Simó, J.; Rivera, R.; Ruíz, L.; Martín, G. 2020. The Integration of AMF Inoculants, Green Manure and Organo-Mineral Fertilization, in Banana Plantations on Calcic Haplic Phaeozems. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23. (08).

200. Siqueira, J. O; Franco, A. A. 1988. Biotecnología do solo. Fundamentos e perspectivas.--Brasilia: Ed. MEC-ESAL-FAEPE-ABEAS:125-177.
201. Siqueira, J. O. /et al./.1993. Crecimento de mudas e producao de cafeeiro sob influencia de fungos micorrízicose superfosfato. R. *Bras. Ci. Solo*. Brasilia. 17 (1): 53-60.
202. Smith S, Read D A. 1997. Mycorrhizal symbiosis. Academic press. Gran Bretaña: 605 p.
203. Smith, F. A., Jakobsen, I. and Smith, S. E. 2000. Spatial differences in acquisition of soil phosphate between two arbuscular mycorrhizal fungi in symbiosis with *Medicago truncatula*. *New Phytol.*,147, 357–366.
204. Smith, S.E.; Read, D. J. 2008. Mycorrhizal Symbiosis. Academic Press, Cambridge, UK.
205. Smith, S. E.; Smith, F. A. 2011. Roles of Arbuscular Mycorrhizas in Plant Nutrition and Growth: New Paradigms from Cellular to Ecosystem Scales. *Annu. Rev. Plant Biol.* 62: 227-50.
206. Sparks, D. L. y Huang, P. M. 1985. Physical chemistry of soil potassium. En: Potassium in agriculture. Munson, R. D. (Ed). Madison, Wisconsin, USA: *American Society of Agronomy*, 201-276 pp.
207. SPSS. 2012. Statistical Package for the Social Sciences.Versión 2.1. Manual del usuario del sistema básico de IBM. [En línea].[Consultado:abril de 2014].Disponible en: <http://www-01.ibm.com/software/es/stats21/>.
208. Staples, G.W., Yang S.Z. 1998. Convolvulaceae *In*: Editorial Committee of the Flora of Taiwan, 2nd. edn., Flora of Taiwan, 4: 341-384.

209. Staples, G.W. 2011. Convolvulaceae unlimited.
<http://convolvulaceae.myspecies.info/> (última consulta: 24/07/2017).
210. Stewart, W.M. 2007. Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes. *Informaciones Agronómicas*.(67): 1 – 7.
211. Strullu, D. G. 1991. Les mycorrhizes des arbres et plantes cultivees. Technique et Documentation. Lavoisier. Paris.
212. Stürmer, S. L.; Siqueira, J. O. 2013. Fungos micorrízicos. In: Moreira, F. M. S. (Ed.). O ecossistema solo. Lavras: UFLA: 291-310 pp.
213. Syers J. K.; Johonston A. E. y D. Curtin. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Reconciling changing concepts of soil phosphorus behavior with agronomic information. FAO N° 18. Roma.
214. Tawarayaya, K. 2003. Arbuscular mycorrhizal dependency of different plant species and cultivars. *Soil Sci Plant Nutr* 49:655–668.
doi.org/10.1080/00380768.2003.10410323.
215. Thirkell, T.; Cameron, D.; Hodge, A. 2019. Contrasting nitrogen fertilisation rates alter mycorrhizal contribution to barley nutrition in a field trial. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01312>.
216. Torres-Guerrero, C, A.; Etchevers B.J.D.; Fuentes-Ponce, Mariela Hada.; Govaerts, B.; De León-González, F.; Herrera, J. M. 2013. Influencia de las raíces sobre la agregación del suelo. *Terra Latinoamericana*, 31(1): 71-84.
217. Turrini, A.; Giordani, T.; Avio, L., Natali, L.; Giovannetti, M.; Cavallini, A. 2016. Large variation in mycorrhizal colonization among wild accessions, cultivars, and inbreds of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Euphytica* 207:331–342.
doi.org/10.1007/s10681-015-1546-5.

218. van der Heijden M.G.A.; Klironomos, J. N.; Ursic, M.; Moutoglis, P.; Streitwolf-Engel, R.; Boller, T.; Wiemken, A.; Sanders, I. R. 1998. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature* 396:69-72.
219. van der Heijden, M. G. A.; Martin, F. C.; Selosse, M. A.; Sanders, I. R. 2015. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *New Phytologist* 205: 1406–1423. doi: 10.1111/nph.13288.
220. Vasconcellos, R. L. F.; Bonfim, J.A.; Baretta, D.; Cardoso, E. J. B. N. 2013. Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Glomalin-Related Soil Protein as Potential Indicators of Soil Quality in a Recuperation Gradient of the Atlantic Forest in Brazil. *Land Degrad. Dev.* n/a–n/a.
221. Vavilov, N. I. 1928. Geographical centers of our cultivated plants. 5th International Congress of Genetics. Proc. 342-369 pp.
222. Verbruggen, E.; van der Heijden, M.; Rillig, M.; Kiers, E. T. 2012. Mycorrhizal fungal establishment in agricultural soils: factors determining inoculation success. *New Phytologist*. [Consultado: abril de 2018]. Disponible en: <[http://dx.DOI:10,1111/j.1469-8137,2012.04348.x](http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04348.x)>.
223. Villa, Gómez, V. 2007. El cultivo de Camote. Programa de Raíces y Tuberosas. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú: 44.
224. Walter, F.; Niemann, H.; Natarajan, M. *et al.* 2012. Mycorrhizal networks: common goods of plants shared under unequal terms of trade. *Plant Physiol* 159:789–797. doi:10.1104/pp.112.195727.

225. Willys, A.; Rodrigues, B. F.; Harris, P. J. C. 2013. The Ecology of Arbuscular Mycorrhizal Fungi. Critical Reviews in *Plant Sciences*, 32: 1–20. ISBN: 0735-2689. DOI: 10.1080/07352689.2012.683375.
226. Wilson, G.W.T.; Rice, C.W.; Rillig, M.C.; Springer, A.; Hartnett, D.C. 2009. Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments. *Ecol. Lett.*, 12: 452–461.
227. WRB 2014. (World Reference Base for Soil Resources). International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Reports no. 106. FAO, Roma, 81 p. ISBN: 978-92-5-108369-7. ISSN: 0532-0488.
228. Yang, W. C.; Ellouze, A.; Navarro-Borrell, A.; Esmaeili T., R.; Klabi, M.; Dai, Z. K.; Hamel, C. 2014. Management of the Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis. Sustainable Crop Production. Editor Solaiman Z. M. Mycorrhizal Fungi: Use in Sustainable *Agriculture and Land Restoration*. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 89-118. DOI: 10.1007/978-3-662-45370-4-7.
229. Yang, H.; Schroeder-Moreno, M.; Giri, B.; Hu, S. 2018. Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Their Responses to Nutrient Enrichment. In B. Giri *et al.* (eds.), Root Biology, *Soil Biology*. Springer International Publishing AG: 429-449. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75910-4_17.
230. Zhang, L.; Wang, Q.; Liu, Q.; Wang, Q. 2009. Sweetpotato in China. In: Loebenstein G, Thottappilly G (eds.). The sweetpotato. Springer, New York, NY: 325–358 pp.

231. Zhang, X.; Davidson, E.A.; Mauzerall, D.L.; Searchinger, T.D.; Dumas, P.; Shen, Y. 2015. Managing nitrogen for sustainable development. *Nature* 528, 51 – 59. <https://doi.org/10.1038/nature15743>.
232. Zhang, L., Fan, J., Feng, G., Declerck, S. 2018. The arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* MUCL 43194 induces the gene expression of citrate synthase in the tricarboxylic acid cycle of the phosphate-solubilizing bacterium *Rahnella aquatilis* HX2. *Mycorrhiza* <https://doi.org/10.1007/s00572-018-0871-7>.