



Reseña bibliográfica

INFLUENCIA DE LA INOCULACIÓN MICORRÍZICA EN LOS ABONOS VERDES. EFECTO SOBRE EL CULTIVO PRINCIPAL. ESTUDIO DE CASO: EL MAÍZ

Review

Influence of mycorrhizal inoculation on green manures. Effect on the main crop. A case study: corn

Gloria M. Martín[✉] y Ramón Rivera

ABSTRACT. The value of the green manures as nitrogen supply has been recognized during centuries by farmers. Another benefit associated to the use of these plant types is that they increase the activity and diversity of the soil microorganisms, such as the arbuscular mycorrhizal fungus. In the present bibliographical revision it summarizes some results obtained in the world and in Cuba in relation to the definition and importance of green manures, the evaluation of the use of nitrogen and the substitution of other nitrogen sources by these plants in the agricultural systems. Likewise, characteristics and benefits of the arbuscular mycorrhizal fungus (AMF) are approached, their function in the plant nutrition, factors that influence in this efficiency, the effect of the symbiosis establish in the optimization of the nutritious supply. Lastly, some considerations are offered about the mycorrhizal inoculation and rotation with green manures and some results obtained with corn. The use of these two nutritional alternatives for plants is inevitable, given the importance of the environment conservation, to obtain healthy foods and the higher price of fertilizers in the world market.

RESUMEN. El valor de los abonos verdes como vía para el suministro de nitrógeno ha sido reconocido durante siglos por los agricultores. Otro beneficio asociado a la utilización de este tipo de plantas es que incrementan la actividad y diversidad de los microorganismos del suelo, como los hongos micorrízicos arbusculares (HMA). En la presente reseña bibliográfica se resumen algunos resultados obtenidos en el mundo y en Cuba en relación con la definición e importancia de los abonos verdes, la evaluación del aprovechamiento del nitrógeno y la sustitución de otras fuentes nitrogenadas por estos cultivos en los sistemas agrícolas. Así mismo, se abordan las características y beneficios de los HMA, su papel en la nutrición vegetal, los factores que influyen en su eficiencia y el efecto del establecimiento de la simbiosis sobre la optimización del suministro de nutrientes. Por último, se brindan algunas consideraciones acerca de la inoculación micorrízica y rotación con abonos verdes, y algunos resultados con el maíz. El empleo de alternativas nutricionales para los cultivos, como las dos mencionadas en este trabajo, es una necesidad impostergable, dada la importancia de la conservación del medio ambiente, obtener alimentos saludables y el precio cada vez más alto de los fertilizantes en el mercado mundial.

Key words: mycorrhizae, plant nutrition

Palabras clave: micorrizas, nutrición de las plantas

INTRODUCCIÓN

La adopción de técnicas agroecológicas para la producción agrícola tiene como uno de sus

Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), gaveta postal 1, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, CP 32700.

✉ gloriam@inca.edu.cu

objetivos reducir la dependencia de insumos externos y favorecer los procesos biológicos de fijación del nitrógeno (N) y el ciclo de los nutrientes. Mediante el empleo de los abonos verdes se favorecen las medidas de control de la erosión del

suelo y se disminuye la incidencia de plantas arvenses (1).

De ese modo, el valor de los abonos verdes como vía para el suministro de nitrógeno ha sido el más reconocido durante siglos por los agricultores. Este efecto consiste, fundamentalmente, en

el aporte de N de las leguminosas, en simbiosis con bacterias del género *Rhizobium*, a través de la fijación biológica del nitrógeno (FBN) y posterior mineralización del N en el suelo, lo que reduce los requerimientos de fertilizantes nitrogenados de los cultivos (2).

Otro beneficio asociado a la utilización de los abonos verdes es que incrementan la actividad y diversidad de los microorganismos del suelo, como los fijadores de N y los hongos micorrízicos arbusculares (HMA).

Los hongos micorrízicos arbusculares son organismos biotróficos obligatorios, que se asocian con raíces de plantas vasculares terrestres, epífitas, acuáticas y también con rizoides y talos de briofitas y otros vegetales basales, formando una relación simbiótica mutualista denominada micorriza arbuscular y micotalia para vegetales con y sin raíces, respectivamente. En las últimas décadas se les ha prestado una gran atención debido al papel que tienen en la adquisición de nutrientes por las plantas (3).

La efectividad micorrízica es la capacidad de un simbionte de influir positivamente sobre el crecimiento de la planta, aumentar el número de propágulos en el suelo o mejorar la transferencia de nutrientes a la planta (4). Con la inoculación de cepas eficientes de HMA la fertilización se hace más eficiente, se reducen las dosis de fertilizantes a aplicar a las plantas micorrizadas y de esta forma se disminuyen los efectos de la contaminación de los suelos y las aguas (5).

Inherente al uso de los abonos verdes se encuentra la asociación de estos con las poblaciones nativas de HMA y así provocar modificaciones cualitativas y cuantitativas en la población de estos hongos del suelo y en la colonización de los cultivos posteriores^A (6); aunque por lo general, esta micorrización no llega a ser totalmente efectiva y los

cultivos responden a la inoculación con cepas eficientes de HMA (7).

En Cuba se han efectuado algunos trabajos recientes que abordan, tanto el efecto de diferentes especies de abonos verdes en la multiplicación de propágulos de HMA en el suelo y el establecimiento de la simbiosis en el cultivo posterior (8, 9, 10, 11), como, la inoculación micorrízica de especies de leguminosas, lo que trae por consecuencia no solo una estimulación del crecimiento y desarrollo de este tipo de plantas, sino también un beneficio directo al cultivo principal sembrado en secuencia (12).

Precisamente, uno de los retos dentro de la agricultura sostenible, es garantizar un suministro adecuado de nutrientes para asegurar altos rendimientos, por lo que el empleo de los abonos verdes, su inoculación con cepas eficientes y su integración con el manejo efectivo de la simbiosis micorrízica, se destacan por sus posibilidades y beneficios. En la presente revisión bibliográfica se resumen algunos resultados obtenidos en el mundo y en Cuba en relación con estos aspectos.

ABONOS VERDES. DEFINICIÓN E IMPORTANCIA

Los abonos verdes constituyen una práctica agronómica que consiste en la incorporación de una masa vegetal no descompuesta de plantas cultivadas con la finalidad de mejorar la disponibilidad de nutrientes y las propiedades del suelo. En la actualidad se ha ampliado la definición a las plantas que se siembran para la cobertura del suelo, protegerlo de la erosión, controlar las arvenses y uso como alimento animal y humano.

Las leguminosas tienen gran valor como abonos verdes debido al aporte de N por el proceso de FBN en asociación con bacterias del género *Rhizobium*, aunque se pueden cultivar otras especies de crecimiento rápido y de buena producción de masa verde, como las gramíneas y las combinaciones de algunas de ellas en forma de mezcla (13).

Las funciones de los abonos verdes están asociadas a la protección del suelo contra la erosión y reducción de la temperatura y de la evaporación del agua. Mejoran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; incrementan su contenido en materia orgánica, así como el aporte, reciclaje y movilización de nutrientes; ayudan en el control natural contra los nematodos, las plagas, y controlan las arvenses^B.

Entre los principales beneficios en el uso de los abonos verdes están la reducción del empleo de herbicidas y plaguicidas, aumento del rendimiento y calidad de los cultivos, conservación de la humedad y la materia orgánica del suelo, disminución de los costos de fertilización y elevación de los ingresos con la venta de semillas^B (14).

La selección de especies y la forma de uso de los abonos verdes debe cumplir algunos requisitos, entre los que se encuentran: adecuarse al sistema de producción utilizado por el agricultor; con bajo costo de implantación y conducción; ser resistentes a plagas; ser de rápido crecimiento; producir un efecto favorable al aumentar el rendimiento de los cultivos y tener una mayor rentabilidad en relación al sistema tradicional (15).

^A Sánchez, C. Manejo de las asociaciones micorrízicas arbusculares y abonos verdes en la producción de posturas de café en algunos tipos de suelo. Tesis de Doctorado, INCA, La Habana, Cuba, 2001, 105 p.

^B Florentín, M. A.; Peñalva, M.; Calegari, A. y Derpsch, R. Abonos verdes y rotación de cultivos en siembra directa. Pequeñas propiedades. (ser. Conservación de suelos), Inst. MAG-GTZ San Lorenzo, Paraguay, 2001, 84 p.

La principal limitante en la adopción del empleo de los abonos verdes es que, según algunos productores, para producir suficiente masa verde, deben recibir nutrientes y atenciones culturales, mientras que en esa etapa el área ocupada no produce alimentos. Esta es una concepción errónea de su uso. El análisis correcto debe ser que al mejorarse el suelo, se podrán obtener cosechas mayores, con ahorros de fertilizantes y se conserva el principal recurso natural con que se cuenta, el suelo^C.

Otra limitante de la utilización de los abonos verdes a gran escala son los problemas relacionados con el alto costo de las semillas y la dificultad de obtener una sincronía entre la liberación de los nutrientes contenidos en estas plantas y la demanda del cultivo principal (16).

Entre las opciones prácticas de su uso está el sembrarlos en sucesión o en bandas dentro de los campos cultivados, o en asociación, tanto con cultivos de ciclo corto o perennes. Si se insertan dentro de las especies presentes en los pastizales cumplirían doble función de mejoradores del suelo y como alimento animal^B.

Para que los abonos verdes sean adoptados, es necesario que los productores perciban que pueden obtener más de un beneficio de su cultivo. De ahí que se fomente la innovación por parte de los agricultores^D.

INFLUENCIA SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO

La aplicación de abonos verdes al suelo mejora sus propiedades, aunque en zonas tropicales no siempre este efecto es cuantificable a corto plazo, debido a que la descomposición de las plantas ocurre rápidamente bajo condiciones de altas temperaturas y humedad (17).

EFFECTOS FÍSICOS

Se ha demostrado que los abonos verdes/cultivos de cobertura influyen directamente en las características físicas de los suelos, debido a la adición de materia orgánica y al aumento y proliferación de las raíces. Las características físicas más influenciadas por los abonos verdes/cultivos de cobertura son agregación, capacidad de retención del agua, densidad, velocidad de infiltración y aireación (18). Estos efectos dependen de la calidad, la cantidad y el tipo de manejo, dado al material adicionado, de los factores climáticos y de las propiedades de los suelos.

La preparación biológica del suelo a través de las raíces de los abonos verdes, contribuye a la descompactación del suelo, aumentando su porosidad, la aireación, el índice de infiltración de agua, mejorando el drenaje y facilitando la penetración del sistema radicular de los cultivos comerciales que le suceden.

En la Tabla I se muestran los resultados de la evaluación de la densidad de volumen de un suelo Nitisol Ródico Éutrico al inicio de un experimento y posterior siembra de la especie de abono verde *Canavalia ensiformis*, crecida durante nueve meses^E. Al comienzo de la investigación el suelo presentaba compactación a partir de los 20 cm de profundidad, con valores de 1,28 hasta 1,40 Mg m⁻³. Al sembrarse

el abono verde, los valores de la compactación del suelo disminuyeron hasta los 70 cm de profundidad y los autores informaron que pudo deberse a que la raíz pivotante de *Canavalia ensiformis* alcanza de 50 a 60 cm de profundidad, teniendo un efecto muy fuerte de laboreo biológico descompactador en el suelo.

Numerosos estudios han demostrado que con la incorporación de los abonos verdes/cultivos de cobertura al suelo se logran apreciables incrementos en el número y tamaño de los agregados bajo diferentes ecosistemas. En ese sentido, al utilizar la rotación *Vicia villosa*-maíz (*Zea mays*) se observó que esta asociación fue la más efectiva en la estabilización de los agregados y se reflejó en el aumento de la productividad del maíz (19).

Al respecto, se informa que la descomposición de las raíces y tallos del centeno (*Secale cereale*) y las sustancias liberadas de dicho proceso contribuyen de forma efectiva al ciclado de nutrientes en el suelo y la formación y estabilización de los agregados. Estos últimos tienen importancia en mantener la estructura del suelo y la productividad, debido a que mejoran las características del suelo como la retención de humedad, difusión de los gases, conductividad hidráulica y disminuyen la erodabilidad (20).

La preparación biológica del suelo a través de las raíces de los abonos verdes/cultivos de cobertura contribuye a la formación de los agregados del suelo^F.

^C Martín, G. M. Manejo de la inoculación micorrizica arbuscular, la *Canavalia ensiformis* y la fertilización nitrogenada en plantas de maíz (*Zea mays*) cultivadas sobre suelos Ferralíticos Rojos de La Habana. Tesis de Doctorado, Universidad Agraria de la Habana, La Habana, Cuba, 2009, 101 p.

^D CIDICCO. Catálogo de abonos verdes/cultivos de cobertura (AVCC) empleados por pequeños productores de los trópicos. Informe Final del Proyecto 2000 FS 125 "Catálogo de sistemas de cultivos de cobertura y abonos verdes (CCAV) empleados por pequeños agricultores de los trópicos, Inst. CIDICCO, Honduras, 2003, 17 p.

^E Borges, M. Influencia de la *Canavalia ensiformis* (L) en algunas propiedades de un suelo Ferralítico Rojo. Tesis de Maestría, Universidad Agraria de La Habana, La Habana, Cuba, 2009, 60 p.

^F Vallejos, F.; Kliever, I.; Florentín, M. A.; Casaccia, J.; Calegari, A. y Derpsch, R. Abonos verdes y rotación de cultivos en siembra directa. Sistemas de producción tractorizados. (ser. conservación de suelos), Inst. MAG-GTZ San Lorenzo, Paraguay, 2001, p. 92.

Tabla I. Comportamiento de la densidad de volumen (Mg m⁻³) en un suelo Nitisol Ródico Éutrico al inicio del experimento y después de nueve meses de sembrada *Canavalia ensiformis*^E

Tratamientos	Profundidad (cm)				
	0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
Testigo (inicio del experimento)	1,23	1,25	1,28	1,35	1,40
<i>Canavalia ensiformis</i>	0,94	1,04	1,18	1,22	1,26
Canavalia + HMA	1,03	1,14	1,23	1,20	1,27
Canavalia + estiércol vacuno	1,00	1,10	1,20	1,18	1,30
Canavalia + HMA + estiércol vacuno	1,06	1,11	1,23	1,21	1,28

HMA: hongos micorrizógenos arbusculares del género *Glomus*.

Por ejemplo la utilización en Paraguay del nabo forrajero (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*), de raíces pivotantes profundas, capaces de romper capas compactas de suelo; después de su descomposición, estas raíces dejan canales que favorecen la infiltración de agua y la penetración de raíces de cultivos posteriores^B.

Otros estudios han demostrado la positiva influencia que tienen las especies *Crotalaria juncea* y *Sesbania rostrata* sobre los índices de materia orgánica, humedad natural, distribución y estabilidad de los agregados del suelo. El comportamiento más efectivo de estas dos especies en la mejora del suelo con relación al resto de las especies evaluadas estuvo en correspondencia con el alto volumen de fitomasa (verde y seca) que estas especies incorporan, así como por la calidad de este material (alta relación C:N). Estos altos volúmenes provocaron variación significativa de la materia orgánica del suelo, la cual mejoró la capacidad de retención del agua de este suelo, así como las características físicas del suelo (21).

Además, el empleo de los abonos verdes/cultivos de cobertura impiden el impacto directo de las gotas de lluvia sobre el suelo, evitando su desagregación y la formación del sellamiento superficial del mismo, aumentando la infiltración

y evitando la erosión, se atenúa la velocidad del escurrimiento superficial del agua, disminuyendo el arrastre de las partículas del suelo^F.

EFFECTOS QUÍMICOS

Los abonos verdes/cultivos de cobertura en crecimiento, así como sus residuos (parte aérea y raíces) promueven importantes efectos sobre la fertilidad química del suelo. Los principales efectos químicos esperados con la utilización de los abonos verdes/cultivos de cobertura son^F:

- ◆ Acrecenta el contenido y disponibilidad de nutrientes en el suelo, por el aumento en la formación de ácidos orgánicos que favorecen el proceso de meteorización de los minerales del suelo y el incremento de la solubilización de nutrientes poco disponibles, principalmente del fósforo. También aumentan el contenido de nitrógeno por la fijación biológica a través de las leguminosas empleadas como abono verde y se acentúa el reciclaje de elementos lavados (nitrógeno, calcio, magnesio, potasio, entre otros) por medio de la biomasa de especies con raíces profundas.
- ◆ Neutralización de elementos tóxicos como el aluminio, a través de la formación de complejos orgánicos.

- ◆ Mejora la capacidad de adsorción y almacenamiento de nutrientes por acumulación de materia orgánica.
- ◆ Mejora la distribución de nutrientes en el perfil de suelo, favoreciendo el transporte de calcio y magnesio y la liberación de nutrientes, principalmente de fósforo, durante la descomposición de los sistemas radiculares.
- ◆ Elevación del pH del suelo, por la mineralización de aniones orgánicos a CO₂ y H₂O.

La influencia de los abonos verdes en el contenido de nitrógeno de los suelos es atribuida a la incorporación del N derivado de la FBN, si se utilizan plantas de la familia de las leguminosas, que aumentan su disponibilidad para los cultivos en sucesión y toman positivo el balance del nutriente en el sistema suelo-planta^G.

Con la rápida mineralización de las leguminosas, se liberan significativas cantidades de N y otros elementos, que favorecen el crecimiento de las plantas y la fracción no aprovechada queda como efecto residual (22).

En Filipinas se evaluaron ocho especies de leguminosas como sustitutas de la fertilización nitrogenada, obteniendo como resultado que en dos años *Sesbania rostrata* y *Crotalaria juncea* acumularon nitrógeno en exceso del requerido por el cultivo del arroz; además, aumentaron el carbono orgánico del suelo y el nitrógeno total (23).

Los abonos verdes reducen la adsorción de P, efecto asociado al incremento del tenor de materia orgánica del suelo, lo que conlleva a la formación de complejos que bloquean los sitios de adsorción en la superficie de óxidos e hidróxidos de Fe y Al (24).

^G Pozzi, C. Estudio de sistemas de uso de solo en rotaciones de culturas en sistemas agrícolas brasileiros: dinámica de nitrógeno e carbono no sistema solo – planta – atmosfera. Tesis de Doutorado, Universidad Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2005, 120 p.

También se ha comprobado que el sistema radical de las leguminosas posee facilidad para extraer del suelo elementos nutritivos poco solubles en especial el fósforo. Entre las plantas más eficientes en este aspecto se encuentran *Lupinus albus*, *Fagopyrum esculentum*, *Eucalyptus gummifera*, *Brassica napus*, *Cajanus cajan* y *Arachis hypogaea* (25).

En relación a este tema, se ha renovado el interés en el uso de plantas movilizadoras de P disponible, empleadas como abono verde, para incrementar la disponibilidad de este elemento en el cultivo principal. Estas especies de plantas, como *Tithonia diversifolia*, muestran habilidad para obtener fosfatos menos lábiles del suelo y acumularlos en su biomasa, incluso en niveles superiores a sus propias necesidades o requerimientos del elemento (26).

Algunas de estas especies, bajo condiciones de déficit de P, en suelos de pH neutro o ligeramente alcalino, pueden autoabastecerse del elemento y dejar disponible una fracción para otros cultivos, debido a sus exudados radicales que provocan descensos de pH en la rizosfera y movilizan al P presente en esta zona del suelo (27).

Un efecto benéfico de los abonos verdes es el reciclaje de nutrientes, si se utilizan plantas que expanden su sistema radical a horizontes profundos del suelo y absorben nutrientes de estas capas. Después del corte y mineralización de las plantas, ocurre la liberación gradual de los nutrientes disponibles para los cultivos en el horizonte superficial (24).

En Cuba, al realizar estudios acerca de la influencia que sobre algunas propiedades químicas del suelo tiene la incorporación de abonos verdes, se ha encontrado un efecto positivo de estas plantas sobre el contenido de cationes intercambiables y P asimilable en el suelo^H.

En el contenido de K del suelo, las especies que ejercieron los mayores incrementos en este índice fueron *Mucuna aterrimum*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lablab* y *Crotalaria juncea*. Los abonos verdes incorporados incrementaron los contenidos de Ca, Mg y P asimilable del suelo (Tabla II).

Coincidiendo con esto, se plantea que el fósforo proveniente de la descomposición de los abonos verdes/cultivos de cobertura o de la materia orgánica del suelo, constituye una cantidad importante que alimenta gradualmente al fósforo de la solución del suelo, aumentando la eficiencia de absorción por las plantas. Además, los abonos verdes/cultivos de cobertura reciclan gran cantidad de potasio a través de su biomasa, al igual que calcio y magnesio, ayudando a mantener niveles satisfactorios de estos nutrientes en forma disponible para las plantas^F.

EVALUACIÓN DEL APROVECHAMIENTO DEL NITRÓGENO DE LOS ABONOS VERDES

El uso eficiente de nutrientes ha ganado más atención con el incremento de los costos de fertilización y la continua preocupación por el impacto ambiental (28). Para cuantificar el aprovechamiento de los nutrientes se han desarrollado diversas metodologías. Entre estas, el método de las diferencias se basa en la suposición que la cantidad de nutrientes del suelo que toma el cultivo es independiente de la cantidad del nutriente aplicado.

El método de las diferencias se ejecuta a través de la evaluación de la absorción del N en dos parcelas, una sin fertilizante nitrogenado (o fuente orgánica nitrogenada), donde se estima la cantidad de N que aporta el suelo y otra parcela, a la que se le adiciona fertilizante o abono orgánico, en la que se evalúa la cantidad de N que el cultivo absorbe, del suelo y de la fuente añadida, y por cálculo de la diferencia de N absorbido por las plantas de la parcela con la adición de nutrientes, menos la parcela sin esta aplicación, se estima la cantidad del N derivado de la fuente aplicada, que fue absorbida por el cultivo (28).

Es un método muy representativo, de fácil aplicación en condiciones de parcelas experimentales o áreas de producción y en el cual se logra calcular con rapidez los efectos de la aplicación de nutrientes. Sin embargo, tiene como desventaja que en experimentos con respuesta a la fertilización, las plantas de las parcelas fertilizadas toman más N del suelo que las no fertilizadas (efecto *primming*), lo cual se atribuye a un efecto de la fuente de N aplicada sobre la disponibilidad del elemento en el suelo (29).

Las plantas fertilizadas crecen más vigorosas, desarrollan mejor sus raíces y exploran así un mayor volumen de suelo (30). Los abonos verdes parecen provocar el efecto *primming*, al liberar N del suelo como consecuencia de su incorporación (31).

La eficiencia del N incorporado con los abonos verdes depende, además, del volumen y calidad del material incorporado, de efectos alelopáticos, control de arvenses y patógenos, conocidos en su conjunto como efecto de rotación (32).

^H García, M. Contribución al estudio y utilización de los abonos verdes en cultivos económicos desarrollados sobre un suelo Ferralítico Rojo de la Habana. Tesis de Doctorado, INCA, La Habana, Cuba, 1997, 100 p.

Tabla II. Efecto de diferentes especies de abonos verdes incorporados sobre las características químicas de un suelo Ferralítico Rojo

Tratamiento	Cationes intercambiables (cmol 100 g ⁻¹)			P (mg kg ⁻¹)	pH	MO (%)
	K	Ca	Mg			
Testigo	0,42	11,8	2,55	255	6,77	2,31
<i>Crotalaria juncea</i>	0,56	12,9	3,55	297	6,87	2,25
<i>Sesbania rostrata</i>	0,45	12,25	3,37	269	6,95	2,15
<i>Mucuna aterrimum</i>	0,64	12,3	3,9	279	6,6	2,31
<i>Canavalia ensiformis</i>	0,67	12,1	2,92	272	6,45	2,17
<i>Sorghum vulgare</i>	0,49	12	3,5	269	6,56	2,32

Adaptado de García (1997^o).

UTILIZACIÓN DEL ISÓTOPO ¹⁵N EN LOS ESTUDIOS SOBRE LOS ABONOS VERDES

El ¹⁵N se utiliza en la investigación agrícola para la cuantificación de la FBN, eficiencia y aprovechamiento de las fuentes nitrogenadas y el estudio de la dinámica del N en el suelo, agua y plantas (22).

En los estudios sobre la dinámica del N, es difícil distinguir el origen de este elemento. El uso del ¹⁵N puede estimar con precisión las rutas que el N sigue en el sistema (33). Es un método muy exacto; sin embargo, su empleo es costoso y requiere de equipamiento y condiciones especiales de aplicación, por lo que casi siempre se emplea en ambientes controlados, no representativos de las condiciones de producción.

El método de dilución isotópica se basa en las diferencias en composición isotópica de las diferentes fuentes de N disponible para el crecimiento de las plantas. Así es posible estudiar y cuantificar la absorción que realiza la planta con independencia de la fuente de nutrientes que se emplee (29).

Para la determinación de la eficiencia de la fertilización nitrogenada se utilizan dos

parámetros muy relacionados; el primer es el porcentaje de N derivado del fertilizante (% Nddf), que es una cuantificación isotópica, independiente del rendimiento y sensible para detectar diferencias entre los tratamientos de fertilización. El segundo es la eficiencia de recuperación del N-fertilizante (ERNF), que es dependiente del rendimiento y se basa en el balance de masas, obtenido por cálculo en cadena y, por consiguiente, sujeto a mayor error experimental (22).

La aplicación del método de las diferencias presenta resultados más similares a los obtenidos con el método isotópico en la medida que el suelo tenga menores contenidos de materia orgánica y N total¹.

En algunas investigaciones conducidas con el objetivo de evaluar el aprovechamiento del N de los abonos verdes, tanto por el método isotópico como por el de las diferencias, se ha demostrado que en términos de suministro de nutrientes, *Crotalaria juncea* y *Mucuna pruriens* aportaron al cultivo del arroz (*Oryza sativa*) entre 25-38 % del N total absorbido (31).

¹Álvarez, M. Los abonos verdes: una alternativa para la producción sostenible de maíz en las condiciones de los suelos Ferralíticos Rojos de la Habana. Tesis de Maestría, INCA-UNAH, La Habana, Cuba, 2000, 69 p.

Por su parte, otros autores han encontrado que del 5 al 17 % del N recuperado por el cultivo del trigo (*Triticum aestivum*) en sucesión, del 7 al 12 % del N se pierde por lavado o volatilización y del 50 al 78 % es retenido en el suelo (34).

En estudios desarrollados en Cuba en el cultivo del arroz, empleando técnicas isotópicas, se obtuvo mediante análisis de ¹⁵N, que el abono verde *Sesbania rostrata* no contribuyó directamente al N total contenido en las plantas, al menos en su primer ciclo, a pesar de haber estimulado significativamente la acumulación de N por el cultivo, que siempre presentó similar proporción de ¹⁵N en exceso (semejante dilución isotópica) con y sin la incorporación del abono verde. La baja disponibilidad de N derivado de la leguminosa, pudo estar asociada con la baja tasa de mineralización del N orgánico, debido a las condiciones reductoras existentes por la rápida inundación del suelo tras la incorporación de las plantas; además, el efecto de este abono verde en las condiciones del estudio sugiere que este material estimuló la actividad microbiana, causando un efecto *priming* proporcional a la disponibilidad del N nativo del suelo y del fertilizante (35).

Diversos autores han estudiado el efecto de los abonos verdes en la nutrición del maíz (*Zea mays*) y han encontrado coeficientes de aprovechamiento que varían entre 30 y 72 %. Las causas de la baja eficiencia pudieran ser por lavado, desnitrificación, volatilización e inmovilización del N por los microorganismos del suelo (22, 36).

En resultados de Cuba, se han informado coeficientes de aprovechamiento del N derivado de los abonos verdes que fluctuaron entre 20 al 50 %, las oscilaciones dependieron de la especie de abono verde evaluada, o su combinación con dosis complementarias de fertilizante

mineral, que pueden acelerar el proceso de mineralización de los abonos verdes incorporados y aumentar el coeficiente de aprovechamiento del N (37).

SUSTITUCIÓN DE OTRAS FUENTES NITROGENADAS POR LOS ABONOS VERDES EN LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

La sustitución de fertilizantes minerales por orgánicos se ha visto limitada por la necesidad de producirlos en el mismo lugar donde van a ser utilizados (38). En ese sentido, los abonos verdes tienen cierta ventaja sobre otros abonos orgánicos.

En la India, se ha indicado que con la incorporación de *Sesbania rostrata* se puede suplir el 50 % del fertilizante nitrogenado en el arroz (*Oryza sativa*) (39, 40). Los rendimientos de este cultivo, después de la incorporación de 20 t ha⁻¹ de *Vigna unguiculata* como abono verde, fueron superiores al testigo sin N. El tratamiento combinado de *Vigna* más 60 kg N ha⁻¹ de fertilizante mineral rindió el doble de arroz que el testigo y un 24 % superior al tratamiento con la dosis óptima de fertilización de 120 kg N ha⁻¹ (41).

En estudios realizados en Cuba en este mismo cultivo (arroz), se ha encontrado que la aplicación del 50 % de la dosis óptima de fertilizante mineral, unida a la incorporación de *Sesbania rostrata*, posibilitó, durante dos cosechas consecutivas, incrementar el rendimiento agrícola en más de 1 t ha⁻¹ de arroz cáscara.

Al estudiar el coeficiente de aprovechamiento del N de los abonos verdes, determinado por el método isotópico, se ha encontrado un 42 % del N-*Mucuna pruriens* por el arroz y un 20 % del N-*Crotalaria juncea* por el maíz. Al combinar fertilizantes nitrogenados y abonos verdes, el efecto fue

aditivo con un incremento de los rendimientos, que superó al tratamiento de mayor dosis de fertilizante mineral (31).

La contribución de los abonos verdes al rendimiento del maíz fue equivalente a la aplicación de 97, 91, 89 y 78 kg N ha⁻¹ para *Mucuna pruriens*, *Crotalaria juncea*, *Cajanus cajan* y *Arachys hypogaea* respectivamente (42). El maíz tuvo una mayor respuesta en el aumento de los rendimientos y contenido foliar de N y fósforo (P) en sucesión con leguminosas empleadas como abono verde, en comparación a la sucesión con gramíneas (43).

En el maíz, el empleo combinado de *Canavalia ensiformis*, junto a la inoculación micorrízica del cultivo principal, permitió que este cultivo alcanzara rendimientos en masa seca similares a los obtenidos con el control de producción, en condiciones de microparcels, con una reducción del 50 % de la dosis del fertilizante mineral aplicado (44).

En el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en Cuba, la canavalia sustituyó hasta el 50 % de sus necesidades de fertilizante N. Los más altos rendimientos se obtuvieron al combinar la canavalia y 40 kg N ha⁻¹, al sustituir hasta el 75 % de la dosis recomendada de fertilizante mineral (38).

El uso combinado de abonos verdes y fertilizantes minerales promovieron el aumento de los tenores de nutrientes, con disminución de la acidez potencial del suelo y aumento de los contenidos de calcio y magnesio en la parte aérea de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) (33).

En China, en un sistema de cultivo intensivo, se determinó que el empleo de los cultivos de cobertura maíz (*Zea mays*), crisantemo (*Chrysanthemum seguetum*) y amaranto comestible (*Amaranthus mangostanus*), en rotación con el pepino (*Cucumis sativus*) reducen el riesgo de

pérdidas de N y favorecen la disponibilidad de P y K. Además, incrementan la población y la diversidad de la biomasa microbiana del suelo, lo que contribuye al aumento del rendimiento de cultivo principal (45).

En Chile, el uso de la mezcla de los cultivos de cobertura *Trifolium subterraneum*, *Medicago polymorpha* y *T. michelianum* en el cultivo de la vid (*Vitis vinifera* L.) cv. Cabernet Sauvignon, en suelos de baja fertilidad, presentó claras ventajas sobre la fertilización empleada tradicionalmente, en términos de mejora de la nutrición nitrogenada del cultivo. El estudio demostró que los abonos verdes tienen una incidencia positiva sobre el incremento de la masa seca y contenido de N, como consecuencia del elevado aporte de este elemento que realizan las leguminosas, semejante a la contribución realizada por la fertilización nitrogenada. Mediante técnicas isotópicas se pudo comprobar que alrededor del 20 % del N total acumulado por el cultivo provino de las leguminosas (46).

En Brasil, al estudiar diferentes abonos verdes en sucesión con cultivos hortícolas, se encontró que este sistema de cultivo contribuyó al aumento de la productividad de lechuga (*Lactuca sativa*) y zanahoria (*Daucus carota*), con incrementos en la masa fresca y seca de ambas especies hortícolas, obteniéndose resultados superiores a los 200 g de masa fresca por planta, destacándose las rotaciones con *Canavalia ensiformis* y la mezcla de *Mucuna aterrimum* y *Zea mays*, que fueron superiores a las producciones obtenidas en presencia de *Cajanus cajan*, estiércol vacuno y abono orgánico tipo bocashi¹.

¹de Almeida, K. Adubos verdes na produção de alface e cenoura, sob sistema organico. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Brasil, 2009, 114 p.

HONGOS MICORRIZÓGENOS ARBUSCULARES (HMA)

Las micorrizas son asociaciones simbióticas mutualistas existentes entre ciertos hongos del suelo y las raíces de las plantas superiores. Los hongos se benefician con el suministro de fuentes carbonadas provenientes de la planta y esta se beneficia por la mayor exploración del suelo, lo que aumenta la capacidad de absorción de agua, nutrientes minerales y el crecimiento y desarrollo de las plantas^A.

CARACTERÍSTICAS Y BENEFICIOS

Entre las funciones y beneficios que las micorrizas le brindan a las plantas están el incremento de la capacidad de absorción de agua y nutrientes, por lo que ayudan al hospedante a resistir mejor las condiciones adversas de suelo y clima, favorecen el aumento de la biomasa y producción de los cultivos, así como también contribuyen a la formación de agregados estables en el suelo (6, 47, 48).

Se han definido tres tipos de asociaciones micorrízicas, al tomar en consideración sus características morfoanatómicas y ultraestructurales: Ectomicorrizas, Ectendomicorrizas y Endomicorrizas. Las endomicorrizas no son detectadas visiblemente, forman una red externa de hifas y penetran el interior de las células corticales sin llegar a colonizar el endodermo. Es el grupo más difundido en el planeta y se divide en varios subtipos, de los cuales el más representativo es el arbuscular, que es el más importante en los ecosistemas tropicales.

La extensa red de hifas extrarradicales juega un importante papel en la conservación del suelo, al mejorar la agregación del mismo. La producción de componentes

orgánicos por las hifas de HMA y otros microorganismos en la micorrizosfera puede ayudar a unir los microagregados en macroagregados (49).

La propagación de los HMA se da a través de esporas, micelio y fragmentos de raíces colonizadas, que de manera conjunta constituyen los propágulos y colonizan las raíces de las plantas hospedantes para desarrollarse y dar origen a nuevos propágulos (50). La mayor cantidad de propágulos en el suelo se encuentra en los primeros 15-20 cm de profundidad, en relación directa con la aireación y contenido de materia orgánica (51).

La simbiosis micorrízica en cultivos de ciclo corto se desarrolla de manera secuencial, al pasar por diferentes fases de crecimiento, tanto microbianas (latencia, exponencial, estabilización o meseta y muerte o esporulación total), como vegetal, de acuerdo a las fases fenológicas de la planta hospedante. En el inicio de la fructificación de las plantas, siempre se encuentran mayores valores de porcentaje de colonización y micelio y menores de esporas, que al finalizar la cosecha, lo que evidencia una relación estrecha con el suministro de carbono hacia las raíces (52).

PAPEL DE LOS HMA EN LA NUTRICIÓN VEGETAL

La inoculación de las plantas con especies efectivas de HMA provoca un marcado incremento en los procesos de absorción y traslocación de nutrientes, ya sea por interceptación, flujo de masa o difusión.

Este beneficio es complejo 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, amortización de los efectos adversos del pH del suelo, aluminio, manganeso, otros metales pesados, salinidad, estrés hídrico y ataque de patógenos (53, 54, 55).

El principal mecanismo de absorción de N es por flujo de masa, que es el transporte de la solución del suelo a lo largo del gradiente de potencial de agua, regulado por la transpiración (56).

El aumento en la absorción de N en forma de NH_4^+ y NO_3^- , se facilita por los HMA en simbiosis efectiva con el hospedante y provoca la toma de los nutrientes, necesarios para la estimulación del crecimiento vegetal. En condiciones de bajos niveles, los HMA propician la absorción de los nutrientes menos disponibles (57).

Los HMA juegan un papel vital en la toma del P presente en los suelos, principalmente en las zonas tropicales donde las cantidades asimilables de este elemento son bajas. El mecanismo para incrementar la absorción vía HMA se desarrolla a partir de la capacidad de explorar un mayor volumen de sustrato y aumentar la capacidad absorbente de las raíces (interceptación) y por difusión, que es el transporte de nutrientes a lo largo de un gradiente de concentración (57).

Además, las micorrizas pueden acelerar la absorción de P no disponible para las plantas por la interacción entre los exudados radicales de algunas especies de plantas que son capaces de solubilizar P (25).

El K y Mg son encontrados en altas concentraciones, tanto en las plantas micorrizadas como en las que no lo están. Estos elementos se mueven en la solución del suelo con mayor facilidad que el P. En algunos casos la elevada absorción de estos nutrientes coincide con un efecto indirecto para eliminar deficiencias de P (52); aunque, algunos trabajos

experimentales sugirieron que la participación de los HMA en la adquisición de K representa una vía importante con que las plantas cuentan para obtener este elemento.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA DE LOS HMA

Numerosos factores bióticos y abióticos influyen sobre el establecimiento y funcionamiento de la simbiosis micorrízica.

Luz: en las zonas con alta radiación solar, los niveles de colonización son generalmente elevados; sin embargo, si se ve atenuada, la respuesta de las plantas a esta simbiosis disminuye. La alta colonización depende, entre otros factores, del incremento de la tasa fotosintética, lo que implica una mayor producción e intercambio de metabolitos (52).

Temperatura: los HMA se forman bajo rangos de temperatura que oscilan entre 18 y 40 °C, con el óptimo para la mayoría de las especies, cercano a los 30 °C. La influencia de la temperatura en las plantas micorrizadas con HMA es variable y está relacionada con la combinación exacta de especie de hongo-hospedante, así como la fase de desarrollo de las plantas (54).

pH: la respuesta de los HMA al pH ha sido estudiada debido a su efecto en la productividad de las plantas, el efecto directo en la fisiología del endófito y la planta hospedante y el efecto indirecto vía cambios en la Capacidad de Cambio de Bases (CCB). Las diferentes especies de HMA toleran diversos rangos de pH (58).

En los estudios de selección de especies de HMA con alta eficiencia simbiótica, hay que tener en cuenta el efecto del pH, ya sea sobre la productividad de la asociación o sobre los mecanismos de reproducción fúngicos (52). Algunas especies de

HMA no se adaptan a condiciones de pH diferentes al suelo nativo de donde fueron aisladas, por eso se considera al pH esencial en el establecimiento de especies de HMA por tipo de suelo (54).

Estacionalidad: en regiones geográficas donde sea posible contrastar al menos dos épocas climáticas como lluviosa y seca, la diversidad de especies nativas de HMA y su funcionalidad pueden variar (51). Factores externos como la estacionalidad y el manejo influyen en la propagación de los HMA y pueden afectar las simbiosis en condiciones de campo (59).

En varios trabajos realizados por diferentes autores se pudo comprobar la influencia del tipo de suelo sobre el funcionamiento micorrízico y la estacionalidad, pues en suelos con mal drenaje y alta retención de humedad, los mayores porcentajes de colonización se encuentran durante la estación seca (60), mientras que en suelos con buen drenaje, los mayores porcentajes de colonización se encuentran en la estación lluviosa (61, 62, 63).

Cobertura del suelo: Como los HMA son simbiosis obligatorias, su distribución en suelos cultivados está fuertemente influenciada por la vegetación (6).

En barbecho, la micorrización natural de las plantas está pobremente desarrollada y no se ha encontrado correlación entre la población de esporas y la duración del barbecho (64), pero el número de esporas de HMA se incrementó significativamente con el aumento del número de especies (diversidad) de arvenses presentes en el barbecho (65).

Mientras el suelo se mantenga al desnudo durante su preparación, la viabilidad de las hifas decrece bruscamente, por ausencia de plantas hospedantes o si en el esquema de rotación de cultivos, se introducen plantas no micótrofas (49).

Al realizar análisis de frecuencia de aparición de esporas nativas de HMA por tipo de cobertura, se ha encontrado que los sistemas agroforestales, seguidos por el bosque natural, presentaron los mayores promedios de colonización radical, por encima del 30 %. Por el contrario, las coberturas de parcelas, monocultivo y potrero presentaron los valores de porcentaje de colonización radical más bajos (51).

En otros estudios, se ha demostrado que la simbiosis micorrízica arbuscular nativa fue más efectiva en ecosistemas con coberturas altamente heterogéneas, de allí la importancia que tiene promover sistemas de producción agrícola agrobiodiversos (66).

Dependencia micorrízica de las plantas (DM): está dada por el grado de relación existente entre la planta y el hongo para obtener la máxima productividad en un nivel de fertilidad de suelo dado y es una propiedad intrínseca de las plantas (4, 53).

El cálculo de la DM no se puede extrapolar a condiciones naturales donde se desarrolla la micorrización nativa (52). Los requerimientos de nutrientes y una baja capacidad de absorción, si no hay micorrizas, se correlacionan con una alta DM, que no es igual a una elevada respuesta del cultivo ante la inoculación (47).

Las plantas pueden ser agrupadas según el grado de la DM en plantas micorrizadas obligadas; presentan un crecimiento muy reducido en ausencia de la simbiosis con HMA, las tasas de colonización son superiores al 60 %. Plantas micorrizadas facultativas; tienen un sistema radical más profuso y desarrollado, aunque bajo condiciones edáficas adversas responden a la micorrización. Las tasas de colonización son inferiores al 50 %. Plantas no micorrizadas; no forman la asociación (4).

Efectividad micorrízica: es la capacidad de un endófito de influir positivamente sobre el crecimiento de la planta, aumentar el número de propágulos o mejorar la transferencia de nutrientes. Es resultado de la interacción fisiológica entre los simbioses (4).

Está determinada por el tipo de hongo micorrizógeno, la planta hospedante, la interfase simbiótica y el tipo específico de suelo o sustrato, su grado de fertilidad y disponibilidad de agua (39). La principal forma de cuantificar la efectividad micorrízica es mediante la evaluación de la respuesta de la planta hospedante en su crecimiento (4).

Las cepas nativas en ocasiones no originan la mayor efectividad, lo cual puede estar relacionado con una baja concentración de propágulos nativos, o que presentan una mayor adaptabilidad y posible funcionalidad microbiana, pero esto no siempre significa una mayor eficiencia micorrízica (52, 67).

Especificidad suelo-cepa: la respuesta positiva a la inoculación con HMA depende de tres factores; la especie inoculada, cantidad de propágulos micorrizicos presentes y el tipo de suelo y su fertilidad. Este último define cuáles son las especies eficientes para una condición edafoclimática, aunque la efectividad alcanzada por la inoculación depende del manejo dado a la planta y al suelo (67).

Uno de los resultados más importantes encontrados en Cuba fue que, con independencia de los cultivos estudiados, existió para cada suelo una cepa de HMA altamente eficiente, con cuya inoculación se obtuvieron las mayores respuestas. Es decir se encontró una alta especificidad suelo-cepa eficiente y este efecto fue completamente reproducible en los diferentes años en que se repitieron los experimentos^A.

Lo anterior indudablemente es un elemento positivo y de alta

repercusión para el manejo de las asociaciones micorrizicas en los cultivos, ya que facilita la selección de las cepas eficientes para una determinada condición.

La mayoría de los HMA no presentan una alta especificidad con el hospedante, lo cual es una de las bases del manejo de la inoculación en secuencias de cultivos. Normalmente ocurre una selectividad entre las especies de una población de HMA y la planta, por influencia de las condiciones edáficas (50, 68).

Las especies del género *Glomus* tienen un amplio rango de distribución funcional con predominio en ecosistemas de alta y media fertilidad, donde resultan extremadamente eficientes y competitivas. Los resultados obtenidos en Cuba permitieron extender dicho rango a las condiciones de baja fertilidad y establecer que la especie *Glomus cubense* es la de mejores resultados en suelos Ferralíticos Rojos, al estudiarse la efectividad de esta cepa en la inoculación de diferentes cultivos (67, 69, 70).

Al analizar los datos de más de 100 experimentos conducidos en suelos con historiales de agricultura de altos y bajos insumos y con diferentes cultivos, se observó que la respuesta de la planta a la inoculación con diferentes cepas de HMA en suelos con agricultura de bajos insumos, estuvo relacionada con las propiedades asociadas con los tipos de suelos. Las cepas *Glomus fasciculatum*-like y *G. etunicatum*-like tuvieron una alta eficiencia en suelos relativamente ricos en nutrientes y materia orgánica; *Paraglomus occultum* y *G. mosseae*-like se comportaron mejor en suelos relativamente pobres en nutrientes y *G. mosseae* y *G. manihotis*, en suelos de mediana fertilidad (71).

Estos autores no encontraron relación significativa entre la respuesta de la planta a la inoculación de las cepas de HMA

y las propiedades del suelo en los sitios donde se practicó una agricultura de altos insumos, debido probablemente a la variación inducida por el uso de diferentes especies de plantas hospederas y a la modificación de las propiedades del suelo por la historia de la producción intensiva. Concluyeron que el conocimiento del comportamiento de las cepas de HMA en ambientes determinados, puede ser la clave para el manejo eficiente de la simbiosis micorrízica, vía inoculación, en los agroecosistemas.

Disponibilidad de nutrientes: depende del tipo de suelo y de los suministros de nutrientes necesarios para complementar los requerimientos de los cultivos. Con muy alta disponibilidad de nutrientes se obtienen los menores efectos de la inoculación con cepas eficientes y se alcanza la mayor efectividad con disponibilidad media. Si esta es baja o nula, tampoco funciona adecuadamente la simbiosis y se obtienen plantas con menor crecimiento y baja efectividad de la inoculación (47, 72, 73).

Se estima que la asociación entre el hospedante y los HMA consume entre 5-10 % de los productos de la fotosíntesis, costo que será compensado si la planta se encuentra en condiciones subóptimas de suministro de nutrientes (53).

Para que la simbiosis sea eficiente, la disponibilidad de nutrientes en el sistema debe ser inferior a la comúnmente utilizada para las plantas no micorrizadas. La obtención de plantas con óptimo crecimiento en presencia de cantidades menores de nutrientes se debe al incremento en eficiencia del proceso de absorción de estos por las plantas micorrizadas y, por tanto, al aumento del coeficiente de aprovechamiento de los nutrientes (67). La alta disponibilidad de nutrientes hace decrecer la presencia de

estructuras micorrízicas en el interior de las raíces, lo que indica que la disminución en la efectividad micorrízica es consecuencia de un mal funcionamiento o de la inhibición de la simbiosis. En suelos de baja fertilidad se hace necesaria una mayor cantidad de estructuras fúngicas para garantizar el funcionamiento adecuado de la simbiosis (57).

EFFECTO DE LA MICORRIZACIÓN SOBRE LA OPTIMIZACIÓN DEL SUMINISTRO DE NUTRIENTES

La aplicación conjunta de la inoculación y dosis bajas de fertilizantes minerales aumentan la efectividad de la simbiosis, lo cual se expresa en el incremento de la colonización micorrízica y el rendimiento y se obtiene una dosis óptima de fertilizantes menor que la recomendada para obtener volúmenes de producción similares, en ausencia de inoculación (48, 67).

La aplicación de dosis superiores a las óptimas para las plantas micorrizadas reduce la simbiosis micorrízica hasta casi inhibirla; sin embargo, los rendimientos no disminuyen, lo que indica que las plantas garantizan sus requerimientos nutricionales pero no a través de la micorrización. Las dosis óptimas de fertilizantes para las plantas micorrizadas dependen de los cultivos en cuestión y de la fertilidad del suelo (53, 74).

La disminución de las dosis de nutrientes con el empleo de HMA oscila entre 25–50 % de la dosis de fertilizante mineral recomendada para cada cultivo (75), lo que se logra a expensas de incrementos en la absorción de los nutrientes provenientes del suelo y de los fertilizantes y conduce a incrementos en los coeficientes

de aprovechamiento de estos, así como a una disminución de los índices críticos de los elementos en el suelo (67).

INOCULACIÓN MICORRÍZICA Y ROTACIÓN CON ABONOS VERDES

A través de la rotación de cultivos, las plantas eficientes en la multiplicación de los HMA, como *Helianthus annuus*, *Crotalaria juncea*, *Canavalia ensiformis*, *Cajanus cajan* y *Stizolobium aterrimum*, aumentan la cantidad de inóculo en el suelo, lo que favorece la colonización de los cultivos siguientes y mejora su nutrición y producción (6, 76).

La inoculación con cepas eficientes de HMA eleva el número de esporas en cualquier tipo de secuencia, aunque depende del número de inoculaciones, del cultivo en cuestión y hasta del cultivo precedente (67).

Así, en estudios realizados en condiciones de microparcels, se ha encontrado una multiplicación de los propágulos iniciales de HMA, desde 83 esporas en 50 g de suelo, al inicio de la secuencia, hasta llegar a valores entre 731 y 1594 esporas en 50 g de suelo, dependiendo los valores encontrados, de las especies que intervinieron en las secuencias evaluadas y en su inoculación micorrízica o no (Tabla III)^c.

El crecimiento de los abonos verdes micótrofos origina, en ausencia de la inoculación micorrízica, una elevación del porcentaje de colonización nativa en el cultivo sucesor (6).

Este efecto está directamente relacionado con la elevación del número de propágulos nativos que se produce con el crecimiento de este tipo de plantas (49), aunque en ocasiones, este desarrollo no logra una reproducción adecuada de los HMA del suelo o una respuesta positiva de las plantas, porque los propágulos se encuentran en muy bajas cantidades o las especies presentes no son efectivas (67).

Si los abonos verdes son inoculados con una cepa efectiva de HMA, incrementan el contenido de inóculos micorrízicos en el suelo y el crecimiento de los cultivos posteriores (77).

El uso de los abonos verdes no se debe circunscribir a la aplicación conjunta con cepas de HMA al sembrarlos, sino que su mayor importancia debe estar dada por la inoculación inicial de las especies de abonos verdes con cepas eficientes de HMA. De esta manera se lograría la reproducción de la micorriza en el suelo, el crecimiento más vigoroso del abono verde y la conformación de un sustrato con muy alta concentración de propágulos eficientes que facilite una efectiva y más económica micorrización de las plantas (67, 78).

Tabla III. Variación en el número de esporas de HMA en dos secuencias de cultivos y en presencia de inoculación micorrízica

Inicio de la secuencia	Primer cultivo de la secuencia		Segundo cultivo de la secuencia	
	83	Barbecho	454 b	Canavalia
Canavalia - HMA				1077 b
<i>Brachiaria</i>		832 a	Canavalia	854 bc
			Canavalia - HMA	1594 a
Es χ		0,14 *		0,08 *

Adaptado de Martín, 2009^c

*Medias con letras distintas en la misma columna difieren entre sí, según prueba de Duncan (p<0,05).

Barbecho: suelo en descanso por tres meses.

En ciertos tipos de suelo y sistemas agroproductivos el empleo de los abonos verdes no garantiza totalmente los requerimientos nutricionales para una micorrización efectiva, en estos casos es necesario suplementar con algunas cantidades de abono orgánico o mineral, las cuales son muy inferiores a las que se aplican en sistemas productivos intensivos o en presencia de cultivos no micorrizados (67).

En función de esto, se ha demostrado que en la rotación canavalia-maíz y en presencia de la inoculación micorrízica, se reducen las dosis de N necesarias para alcanzar un rendimiento máximo estable en hasta un 75 % de la dosis recomendada para ese tipo de suelo, y esa disminución está en función directa del N que fue capaz de aportar el abono verde, derivado del proceso de fijación biológica del N (11).

Otro efecto de los HMA sobre las leguminosas está en la simbiosis tripartita con bacterias del género *Rhizobium*. La simbiosis con las bacterias provee de N fijado biológicamente, mientras que los HMA aumentan la absorción de P, que favorece la FBN. Las leguminosas proveen a las bacterias y a los HMA de fotosintatos (73).

Canavalia ensiformis es una planta de alto potencial de colonización por HMA, y es capaz de propiciar la colonización del cultivo siguiente en la sucesión (50).

En Cuba se ha encontrado que la canavalia multiplica en grandes cantidades los propágulos micorrízicos nativos en el suelo^A, por lo que se hace interesante el estudio de la introducción y multiplicación de cepas eficientes a través de la inoculación de esta planta.

En relación con esto, estudios recientes han demostrado que la canavalia inoculada con cepas eficientes según el tipo de suelo, es capaz de multiplicar los propágulos micorrízicos y favorecer la

colonización micorrízica efectiva del cultivo posterior (12).

SISTEMAS AGRÍCOLAS MICORRIZADOS EFICIENTEMENTE

Los sistemas agrícolas micorrizados eficientemente son aquellos donde, a través de la inoculación de cepas eficientes de HMA, las plantas logran un mejor funcionamiento de la simbiosis micorrízica, reflejado en un mayor crecimiento, absorción de nutrientes y rendimientos, en comparación a aquellas plantas que no fueron inoculadas (7).

Por lo tanto, el uso de estos microorganismos edáficos en la agricultura constituye una alternativa frente a los fertilizantes minerales. Desde el punto de vista ecológico, su utilización permite reducir el uso de energía, la degradación del agroecosistema y las pérdidas de nutrientes de los suelos agrícolas. En adición, se mantiene la capacidad productiva del sistema, se preserva la biodiversidad y se contribuye con una producción más estable y sostenida a largo plazo en equilibrio con el entorno.

Estos sistemas son válidos para condiciones de bajos insumos y para una agricultura tecnificada que permita obtener altos rendimientos y se potencie la vida del suelo. Al mismo tiempo se disminuyen las contaminaciones por aplicaciones excesivas de fertilizantes y los efectos negativos de la sequía (67).

Aquellos suelos dominados por hongos nativos con elevada efectividad no son indicados para la inoculación. En este caso los HMA precisan ser manejados para mantener su población en niveles altos, lo que permitirá ser utilizados en programas de inoculación (53).

El mayor número de especies e inóculos de HMA se encuentra en los sistemas de bajos insumos (80). Muchas prácticas agrícolas

empleadas en los sistemas de altos insumos tienen relativamente poca población de HMA nativos, mientras que los sistemas orgánicos aumentan su población pues evitan el uso de agroquímicos y favorecen la biodiversidad (81).

La utilización de las micorizas como biofertilizantes no implica que se pueda dejar de fertilizar, sino que la fertilización se hace más eficiente y puede disminuirse la dosis a aplicar en rangos de 50-80 %.

En estos momentos, se hace necesaria la compatibilidad entre la simbiosis micorrízica y el manejo adecuado de la fertilización y la necesidad de redefinir para los cultivos micorrizados con cepas eficientes, los requerimientos de fertilizantes e índices críticos de los nutrientes en el suelo, esto se debe introducir de forma consciente como base para la explotación agrícola.

ROTACIÓN DEL MAÍZ CON ABONOS VERDES E INOCULACIÓN MICORRÍZICA

Con la introducción de las rotaciones leguminosas-maíz, disminuye la dependencia de los agricultores a los insumos externos, aumenta la rentabilidad del sistema, el balance de nutrientes se hace positivo y mejora la calidad de los suelos (82). El empleo de canavalia en sucesión con el cultivo del maíz hace que este eleve sus rendimientos hasta 6,3 t ha⁻¹ y tenga un aprovechamiento de 40-60 % del N-abonos verdes. Los rendimientos obtenidos en maíz son equivalentes a los obtenidos con 200 kg N ha⁻¹ de fertilizante mineral (83).

La incorporación de abonos verdes promueve la absorción de NPK por el cultivo del maíz, debido a la mayor disponibilidad de los elementos estimulada por el abono verde (84). El uso de fertilizantes

minerales en dosis bajas aumenta el impacto benéfico de los abonos verdes sobre el cultivo^c.

El incremento de los rendimientos de maíz, sembrado después de incorporar leguminosas fue de 1,1-3,2 t ha⁻¹ y de 1,4-3,8 t ha⁻¹ en zonas de bajas y altas precipitaciones, respectivamente y recomiendan que junto a la incorporación de leguminosas, se deben aplicar dosis menores de fertilizantes minerales para aumentar el coeficiente de aprovechamiento del N (85).

En las condiciones de Cuba, los abonos verdes tienen una influencia positiva sobre el rendimiento del maíz. Este, sembrado en sucesión con canavalia, tuvo rendimientos similares a la variante con fertilización mineral y superior al testigo absoluto en 1 t ha⁻¹. Este tipo de respuesta tiene muy buenos resultados con independencia de la época del año en que se emplee (38).

En estudios realizados para evaluar la respuesta del maíz a la inoculación micorrízica, se ha informado que las plantas inoculadas con HMA acumularon un 40 % más de masa seca y N que las no inoculadas, al crecer en un suelo con residuos de alfalfa (*Medicago sativa*) (86). El empleo de la cepa *Glomus fasciculatum* en maíz permitió un incremento de los rendimientos que osciló entre 21-77 %, según el tipo de suelo (87).

Por otra parte, el maíz presentó una alta colonización con cepas nativas de HMA, al ser sembrado en sucesión con un pastizal o un barbecho con plantas micótrofas, que facilitaron la propagación de los endófitos micorrízicos nativos (88).

El efecto del cultivo precedente en el crecimiento del maíz es debido, en parte, al aumento del número de propágulos de HMA causado por el cultivo precedente. Al respecto, se ha informado que el maíz en sucesión con girasol

(*Helianthus annuus*) aumentó en un 49 % de masa seca en comparación con tratamientos sin inocular y aumentó la colonización radical del cultivo (76).

El manejo de los HMA a través de los abonos verdes puede ser una práctica útil dentro de la agricultura sostenible. Los abonos verdes de invierno multiplicaron los inóculos nativos de HMA en el suelo, con alta colonización del maíz sucesor y aumento de la densidad de las hifas extrarradicales. El grado de micorrización del maíz (% de colonización) fue correlacionado con el crecimiento y los rendimientos del maíz (89).

Los abonos verdes elevan significativamente la colonización por HMA del cultivo posterior y su empleo combinado con fertilizantes minerales complementa las necesidades de N del cultivo, con una disminución significativa de las dosis a emplear, debido a la promoción de la absorción por los HMA (90).

CONSIDERACIONES GENERALES

Los abonos verdes, aunque se conocen desde hace milenios, no se emplean muy frecuentemente en la agricultura convencional y la altamente tecnificada. Muchos productores hacen rechazo a su empleo, dado fundamentalmente, porque no dominan sus diferentes formas de uso, no se trata de que el productor se adapte al abono verde, es que los abonos verdes se adaptan a las condiciones agroproductivas donde serán empleados.

Si se emplean de forma conjunta con biofertilizantes como los HMA, no solo se estará potenciando su crecimiento y desarrollo, sino que además, se aumentarán los beneficios ofrecidos al cultivo principal. Mediante la inoculación de los abonos verdes, plantas que en su mayoría se reproducen mediante semilla botánica, se facilita la

inoculación de plantaciones establecidas o de cultivos que se reproducen por vía agámica y que son más difíciles de inocular.

El empleo de alternativas nutricionales para los cultivos, como las dos mencionadas en este trabajo, es una necesidad impostergable, dada la importancia de la conservación del medio ambiente, obtener alimentos saludables y el precio cada vez más alto de los fertilizantes en el mercado mundial.

BIBLIOGRAFÍA

1. Barroso, G. R. P.; Carvalho, J. O. M.; dos Santos, M. R. A.; Ferreira, M. G. R. y Marcolan, A. L. "Teor de macronutrientes em plantas utilizadas como adubo verde". *Saber Científico*, vol. 2, no. 1, 2009, pp. 37-42, ISSN 1982-792X.
2. Oberson, A.; Nanzer, S.; Bosshard, C.; Dubois, D.; Mäder, P. y Frossard, E. "Symbiotic N₂ fixation by soybean in organic and conventional cropping systems estimated by ¹⁵N dilution and ¹⁵N natural abundance". *Plant and Soil*, vol. 290, no. 1-2, 6 de enero de 2007, pp. 69-83, ISSN 0032-079X, 1573-5036, DOI 10.1007/s11104-006-9122-3.
3. de Souza, F. A.; Stürmer, S. L.; Carrenho, R. y Trufem, T. S. F. B. "Classificação e taxonomia de fungos micorrízicos arbusculares e sua diversidade e ocorrência no Brasil". En: eds. Siqueira J. O., Souza F. A., Cardoso E. J. B. N., y Tsai S. M., *Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil*, edit. Lavras: UFLA, Brasil, 2010, pp. 15-73, ISBN 85-87692-90-9.
4. Janos, D. P. "Plant responsiveness to mycorrhizas differs from dependence upon mycorrhizas". *Mycorrhiza*, vol. 17, no. 2, 2007, pp. 75-91, ISSN 0940-6360, 1432-1890, DOI 10.1007/s00572-006-0094-1.
5. de Miranda, J. C. C. y de Miranda, L. N. "Micorriza arbuscular e uso de adubos verdes em solos de Cerrado". En: de Carvalho A. M. y Amabile R. F., *Cerrado: adubação verde*, edit. Embrapa, Planaltina, DF, 2006, pp. 211-236, ISBN 85-7075-027-8.

6. Espindola, J. A. A.; Almeida, D. L. de; Guerra, J. G. M.; Silva, E. M. R. da y Souza, F. A. de. "Influência da adubação verde na colonização micorrízica e na produção da batata-doce". *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 33, no. 3, 1998, pp. 339-347, ISSN 1678-3921.
7. Rivera, R.; Fernández, F.; Fernández, K.; Ruiz, L.; Sánchez, C. y Riera, M. "Advances in the management of effective Arbuscular mycorrhizal symbiosis in tropical ecosystems". En: *Mycorrhizae in Crop Production*, edit. Haworth Food & Agricultural Products Press, Binghamton, 10 de julio de 2006, pp. 151-196, ISBN 978-1-56022-307-8.
8. Sánchez, C.; Caballero, D.; Cupull, R.; González, C.; Rivera, R. y Urquiaga, S. "Los abonos verdes y la inoculación micorrízica de plántulas de *Coffea arabica* sobre suelos Cambisoles Gléyicos". *Cultivos Tropicales*, vol. 30, no. 1, marzo de 2009, pp. 00-00, ISSN 0258-5936.
9. Rivera, R. "Abonos verdes e inoculación micorrízica de posturas de café sobre suelos Ferralíticos Rojos Lixiviados". *Cultivos Tropicales*, vol. 31, no. 3, septiembre de 2010, pp. 75-81, ISSN 0258-5936.
10. Sánchez, C.; Rivera, R.; Caballero, D.; Cupull, R.; González, C. y Urquiaga, S. "Abonos verdes e inoculación micorrízica de posturas de café sobre suelos Ferralíticos Rojos Lixiviados". *Cultivos Tropicales*, vol. 32, no. 3, 2011, pp. 11-17, ISSN 0258-5936.
11. Martín, G. M.; Rivera, R.; Arias, L. y Rentería, M. "Effect of Canavalia ensiformis and arbuscular mycorrhizae on corn crops". *Cuban Journal of Agricultural Science*, vol. 43, no. 2, 2009, pp. 185-192, ISSN 0864-0408.
12. Martín, A. G. M.; Rivera, E. R.; Arias, P. L. y Pérez, D. A. "Respuesta de la Canavalia ensiformis a la inoculación micorrízica con *Glomus cubense* (cepa INCAM-4), su efecto de permanencia en el cultivo del maíz". *Cultivos Tropicales*, vol. 33, no. 2, 2012, pp. 20-28, ISSN 0258-5936.
13. Álvarez, M.; García, M. y Treto, E. "Revisión bibliográfica: Los abonos verdes: una alternativa natural y económica para la agricultura". *Cultivos Tropicales*, vol. 16, no. 3, 1995, pp. 9-24, ISSN 0258-5936.
14. Marinho, G. J. G.; Ndiaye, A.; Linhares, de A. R. y Azevedo, E. J. A. "Cultivos de cobertura como indicadores de procesos ecológicos". *LEISA Revista de Agroecología*, vol. 22, no. 4, 2007, pp. 20-22, ISSN 1729-7419.
15. Sodré, F. J.; Cardoso, A. N.; Carmona, R. y Carvalho, A. M. de. "Fitomassa e cobertura do solo de culturas de sucessão ao milho na Região do Cerrado". *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 39, no. 4, abril de 2004, pp. 327-334, ISSN 0100-204X, DOI 10.1590/S0100-204X2004000400005.
16. de Resende, A. S.; Quesada, D. M.; Xavier, R. P.; Guerra, J. G. M.; Boddey, R.; Alves, B. J. R. y Urquiaga, S. "Uso de leguminosas para adubación verde: importância da relação talo/folha". *Agronomia*, vol. 35, no. 1-2, 2001, pp. 77-82, ISSN 0365-2718.
17. Sangakkara, U. R.; Liedgens, M.; Soldati, A. y Stamp, P. "Root and Shoot Growth of Maize (*Zea mays*) as Affected by Incorporation of *Crotalaria juncea* and *Tithonia diversifolia* as Green Manures". *Journal of Agronomy and Crop Science*, vol. 190, no. 5, 2004, pp. 339-346, ISSN 1439-037X, DOI 10.1111/j.1439-037X.2004.00111.x.
18. Breland, T. "Green manuring with clover and ryegrass catch crops undersown in spring wheat: effects on soil structure". *Soil Use and Management*, vol. 11, no. 4, 1995, pp. 163-167, ISSN 1475-2743, DOI 10.1111/j.1475-2743.1995.tb00950.x.
19. Calegari, A. y Pavan, M. "Effects of corn winter green manure rotation on soil aggregation". *Arquivos de Biología e Tecnologia*, vol. 38, no. 1, 1995, pp. 45-53, ISSN 1678-4324.
20. Kavdir, Y. y Smucker, A. J. M. "Soil aggregate sequestration of cover crop root and shoot-derived nitrogen". *Plant and Soil*, vol. 272, no. 1-2, 2005, pp. 263-276, ISSN 0032-079X, 1573-5036, DOI 10.1007/s11104-004-5294-x.
21. García, M.; Álvarez, M. y Treto, E. "Estudio comparativo de diferentes especies de abonos verdes y su influencia en el cultivo del maíz". *Cultivos Tropicales*, vol. 23, no. 3, 2002, pp. 19-30, ISSN 0258-5936.
22. Urquiaga, S. y Zapata, F. *Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos anuales en América Latina y el Caribe*. edit. Embrapa Agrobiología, Río de Janeiro, Brasil, 2000, 110 p., ISBN 85-87578-02-2.
23. Lehmann, J.; Poidy, N.; Schroth, G. y Zech, W. "Short-term effects of soil amendment with tree legume biomass on carbon and nitrogen in particle size separates in Central Togo". *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 30, no. 12, 1998, pp. 1545-1552, ISSN 0038-0717, DOI 10.1016/S0038-0717(97)00153-3.
24. Espindola, J. A.; de Almeida, D. L. y Guerra, J. G. M. "Estratégias para utilização de leguminosas para adubação verde em unidades de produção agroecológica.". *Embrapa Agrobiologia*, no. 174, 2004, p. 24, ISSN 1517-8498.
25. Shibata, R. y Yano, K. "Phosphorus acquisition from non-labile sources in peanut and pigeonpea with mycorrhizal interaction". *Applied Soil Ecology*, vol. 24, no. 2, octubre de 2003, pp. 133-141, ISSN 0929-1393, DOI 10.1016/S0929-1393(03)00093-3.
26. Pypers, P.; Verstraete, S.; Thi, C. P. y Merckx, R. "Changes in mineral nitrogen, phosphorus availability and salt-extractable aluminium following the application of green manure residues in two weathered soils of South Vietnam". *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 37, no. 1, 2005, pp. 163-172, ISSN 0038-0717, DOI 10.1016/j.soilbio.2004.06.018.
27. Cifuentes, A. R.; Escobar, R. N.; Hernández, V. E. y González, G. A. "Asociación lupino-maíz en la nutrición fosfatada en un Andosol". *Terra Latinoamericana*, vol. 19, no. 2, 2001, pp. 141-154, ISSN 2395-8030.
28. Stewart, W. M. "Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes". *Informaciones Agronómicas*, vol. 67, 2007, pp. 1-7, ISSN 2222-0178.

29. Broeshart, H. "Quantitative measurement of fertilizer uptake by crops". *Netherlands Journal of Agricultural Science*, vol. 22, no. 4, 1974, pp. 245–254, ISSN 1573-5214.
30. Kuzyakov, Y.; Friedel, J. K. y Stahr, K. "Review of mechanisms and quantification of priming effects". *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 32, no. 11–12, 2000, pp. 1485-1498, ISSN 0038-0717, DOI 10.1016/S0038-0717(00)00084-5.
31. Muraoka, T.; Ambrosano, E. J.; Zapata, F.; Bortoletto, N.; Martins, A. L. M.; Trivelin, P. C. O.; Boaretto, A. E. y Scivittaro, W. B. "Eficiencia de abonos verdes (crotalaria y mucuna) y urea, aplicados solos o juntamente, como fuentes de N para el cultivo de arroz". *Terra Latinoamericana*, vol. 20, no. 1, 2002, pp. 17–23, ISSN 0187-5779, 2395-8030.
32. Alvarez, M.; García, M. y Treto, E. "Eficiencia del nitrógeno incorporado con los abonos verdes en el cultivo del maíz (*Zea mays*)". *Cultivos Tropicales*, vol. 20, no. 3, 1999, pp. 49–53, ISSN 1819-4087.
33. Ambrosano, E. J.; Trivelin, P. C. O.; Cantarella, H.; Ambrosano, G. M. B.; Schammass, E. A.; Guirado, N.; Rossi, F.; Mendes, P. C. D. y Muraoka, T. "Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane". *Scientia Agricola*, vol. 62, no. 6, 2005, pp. 534-542, ISSN 0103-9016, DOI 10.1590/S0103-90162005000600004.
34. Hasegawa, H. y Denison, R. F. "Model predictions of winter rainfall effects on N dynamics of winter wheat rotation following legume cover crop or fallow". *Field Crops Research*, vol. 91, no. 2–3, 2005, pp. 251-261, ISSN 0378-4290, DOI 10.1016/j.fcr.2004.07.019.
35. Ugarte, O. M.; Martínez, R. C.; Quesada, M. S.; Montoya, A. N. y Vega, G. D. "La *Sesbania Rostrata* como fuente alternativa de nutrientes en el cultivo del arroz". *Spanish Journal of Soil Science*, vol. 2, no. 3, 2012, pp. 57–62, ISSN 2253-6574, DOI 10.3232/SJSS.2012.V2.N3.06.
36. Crozier, C. R.; King, L. D. y Volk, R. J. "Tracing Nitrogen Movement in Corn Production Systems in the North Carolina Piedmont: A Nitrogen-15 Study". *Agronomy Journal*, vol. 90, no. 2, 1998, p. 171, ISSN 0002-1962, DOI 10.2134/agronj1998.00021962009000020009x.
37. Martín, G. M. y Rivera, R. "Participación del nitrógeno de los abonos verdes en la nutrición nitrogenada del maíz (*Zea mays* L.) cultivado sobre suelo Ferralítico Rojo". *Cultivos Tropicales*, vol. 23, no. 3, 2002, pp. 91–96, ISSN 0258-5936.
38. Treto, E.; García, M.; Martínez, R.; Febles, J. M.; Funes, F.; García, L.; Bourque, M.; Pérez, N. y Rosset, P. "Avances en el manejo de los suelos y la nutrición orgánica". En: *Transformando el campo Cubano: avances de la agricultura sostenible*, edit. Asociación Cubana de Técnicos Agrícolas y Forestales, Cuba, 2001, pp. 167–190, ISBN 978-959-246-032-4.
39. Samasundaram, E.; Srinivasan, G. y Manoharan, M. L. "Effect of green manuring *Sesbania rostrata* and fertilizers application on chemical properties of soil and grain yield in rice–rice crop sequences". *Agricultural Journal*, vol. 83, no. 12, 1996, pp. 758–760, ISSN 0024-9602.
40. Mandal, U. K.; Singh, G.; Victor, U. S. y Sharma, K. L. "Green manuring: its effect on soil properties and crop growth under rice–wheat cropping system". *European Journal of Agronomy*, vol. 19, no. 2, 2003, pp. 225-237, ISSN 1161-0301, DOI 10.1016/S1161-0301(02)00037-0.
41. Aulakh, M. S.; Singh, D. y Sadana, U. S. "Direct and Residual Effects of Green Manure and Fertilizer Nitrogen in a Rice-Rapeseed Production System in the Semiarid Subtropics". *Journal of Sustainable Agriculture*, vol. 25, no. 1, 2005, pp. 97-115, ISSN 1044-0046, DOI 10.1300/J064v25n01_08.
42. Mandimba, G. R. "Contribution of nodulated legumes of the growth of *Zea mays* L. under various cropping systems". *Symbiosis*, vol. 19, no. 2-3, 1995, pp. 213–222, ISSN 0334-5114, 1878-7665.
43. Astier, M.; Maass, J. M.; Etchevers-Barra, J. D.; Peña, J. J. y González, F. de L. "Short-term green manure and tillage management effects on maize yield and soil quality in an Andisol". *Soil and Tillage Research*, vol. 88, no. 1–2, 2006, pp. 153-159, ISSN 0167-1987, DOI 10.1016/j.still.2005.05.003.
44. Martín, A. G. M.; Rivera, E. R. y Pérez, D. A. "Efecto de canavalia, inoculación micorrizica y dosis de fertilizante nitrogenado en el cultivo del maíz". *Cultivos Tropicales*, vol. 34, no. 4, diciembre de 2013, pp. 60-67, ISSN 0258-5936.
45. Tian, Y.; Zhang, X.; Liu, J. y Gao, L. "Effects of summer cover crop and residue management on cucumber growth in intensive Chinese production systems: soil nutrients, microbial properties and nematodes". *Plant and Soil*, vol. 339, no. 1-2, 2010, pp. 299-315, ISSN 0032-079X, 1573-5036, DOI 10.1007/s11104-010-0579-8.
46. Ovalle, C.; Pozo, A. del; Peoples, M. B. y Lavín, A. "Estimating the contribution of nitrogen from legume cover crops to the nitrogen nutrition of grapevines using a ¹⁵N dilution technique". *Plant and Soil*, vol. 334, no. 1-2, 2010, pp. 247-259, ISSN 0032-079X, 1573-5036, DOI 10.1007/s11104-010-0379-1.
47. Sieverding, E.; Friedrichsen, J. y Suden, W. "Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems". *Sonderpublikation der GTZ*, no. 224, 1991, p. 371, ISSN 0930-1070.
48. Arias, N. M. M.; García, V. Q. y Cruz, F. G. "Colonización micorrizica arbuscular y fertilización mineral de genotipos de maíz y trigo cultivados en un Andisol". *Terra Latinoamericana*, vol. 19, no. 4, 2001, pp. 337–344, ISSN 2395-8030.
49. Kabir, Z. y Koide, R. T. "The effect of dandelion or a cover crop on mycorrhiza inoculum potential, soil aggregation and yield of maize". *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 78, no. 2, 2000, pp. 167-174, ISSN 0167-8809, DOI 10.1016/S0167-8809(99)00121-8.

50. Souza, F. A. de; Trufem, S. F. B.; Almeida, D. L. de; Silva, E. M. R. da y Guerra, J. G. M. "Efeito de pré-cultivos sobre o potencial de inóculo de fungos micorrízicos arbusculares e produção da mandioca". *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 34, no. 10, 1999, pp. 1913-1923, ISSN 0100-204X, DOI 10.1590/S0100-204X1999001000019.
51. Peña, C. P.; Vanegas, G. I. C.; Valderrama, A. M.; Cárdenas, J. H. A. y Dorado, A. L. A. *Micorrizas arbusculares de la Amazonia Colombiana. Catalogo Ilustrado*. edit. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas «SINCHI», 14 de junio de 2006, 90 p., ISBN 978-958-97597-6-9.
52. Fernández, F. "La simbiosis micorrízica arbuscular". En: Rivera R. y Fernández K., *Manejo efectivo de la simbiosis micorrízica, una vía hacia la agricultura sostenible. Estudio de caso: el Caribe*, edit. Ediciones INCA, La Habana, Cuba, 2003, p. 166, ISBN 959-7023-24-5.
53. Siqueira, J. O. y Franco, A. A. *Biotechnologia do solo: fundamentos e perspectivas* [en línea]. edit. Ministerio da Educacao e Cultura, Brasilia, Brasil, 1988, 235 p., [Consultado: 29 de noviembre de 2015], Disponible en: <<http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AGB.tidad=1&expresion=mfn=118141>>.
54. Entry, J. A.; Rygielwicz, P. T.; Watrud, L. S. y Donnelly, P. K. "Influence of adverse soil conditions on the formation and function of *Arbuscular mycorrhizas*". *Advances in Environmental Research*, vol. 7, no. 1, 2002, pp. 123-138, ISSN 1093-0191, DOI 10.1016/S1093-0191(01)00109-5.
55. Bucher, M. "Functional biology of plant phosphate uptake at root and mycorrhiza interfaces". *New Phytologist*, vol. 173, no. 1, 1 de enero de 2007, pp. 11-26, ISSN 1469-8137, DOI 10.1111/j.1469-8137.2006.01935.x.
56. Matos, R. M. B.; Silva, E. M. R. y Lima, E. "Fungos micorrízicos e nutrição de plantas". *Embrapa Agrobiologia*, no. 98, 1999, p. 36, ISSN 0104-6187.
57. Azcón, R.; Ambrosano, E. y Charest, C. "Nutrient acquisition in mycorrhizal lettuce plants under different phosphorus and nitrogen concentration". *Plant Science*, vol. 165, no. 5, 2003, pp. 1137-1145, ISSN 0168-9452, DOI 10.1016/S0168-9452(03)00322-4.
58. Alvarado, A.; Chavarría, M.; Guerrero, R.; Boniche, J. y Navarro, J. R. "Características edáficas y presencia de micorrizas en plantaciones de teca (*Tectona grandis* Lf) en Costa Rica". *Agronomía Costarricense*, vol. 28, no. 1, 2004, pp. 89-100, ISSN 0377-9424.
59. Lugo, M. A. y Cabello, M. N. "Native *Arbuscular Mycorrhizal* Fungi (AMF) from Mountain Grassland (Córdoba, Argentina) I. Seasonal Variation of Fungal Spore Diversity". *Mycologia*, vol. 94, no. 4, 2002, pp. 579-586, ISSN 0027-5514, DOI 10.2307/3761709.
60. Adriano, A. M. L.; Solis, D. F.; Gavito, P. M. E. y Salvador, F. M. "Agronomical and Environmental Factors Influence Root Colonization, Sporulation and Diversity of *Arbuscular Mycorrhizal* Fungi at a Specific Phenological Stage of Banana Trees". *Journal of Agronomy*, vol. 5, no. 1, 1 de enero de 2006, pp. 11-15, ISSN 18125379, 18125417, DOI 10.3923/ja.2006.11.15.
61. Apple, M. E.; Thee, C. I.; Smith-Longozo, V. L.; Cogar, C. R.; Wells, C. E. y Nowak, R. S. "Arbuscular mycorrhizal colonization of *Larrea tridentata* and *Ambrosia dumosa* roots varies with precipitation and season in the Mojave Desert". *Symbiosis*, vol. 39, no. 3, 2005, pp. 131-135.
62. Oliveira, A. N. de y Oliveira, L. A. de. "Seasonal dynamics of Arbuscular mycorrhizal fungi in plants of *Theobroma grandiflorum* Schum and *Paullinia cupana* Mart. of an agroforestry system in Central Amazonia, Amazonas State, Brazil". *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 36, no. 3, 2005, pp. 262-270, ISSN 1517-8382, DOI 10.1590/S1517-83822005000300011.
63. Becerra, A. G.; Arrigo, N. M.; Bartoloni, N.; Domínguez, L. S. y Cofré, M. N. "Arbuscular mycorrhizal colonization of *Alnus acuminata* Kunth in Northwestern Argentina in relation to season and soil parameters". *Ciencia del Suelo*, vol. 25, no. 1, 2007, pp. 7-13, ISSN 1850-2067.
64. Duponnois, R.; Plenchette, C.; Thioulouse, J. y Cadet, P. "The mycorrhizal soil infectivity and Arbuscular mycorrhizal fungal spore communities in soils of different aged fallows in Senegal". *Applied Soil Ecology*, vol. 17, no. 3, 2001, pp. 239-251, ISSN 0929-1393, DOI 10.1016/S0929-1393(01)00132-9.
65. Chen, X.; Tang, J.; Fang, Z. y Shimizu, K. "Effects of weed communities with various species numbers on soil features in a subtropical orchard ecosystem". *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 102, no. 3, 2004, pp. 377-388, ISSN 0167-8809, DOI 10.1016/j.agee.2003.08.006.
66. Peña, V. C. P.; Cardona, G. I.; Arguelles, J. H. y Arcos, A. L. "Micorrizas arbusculares del sur de la Amazonia colombiana y su relación con algunos factores fisicoquímicos y biológicos del suelo". *Acta Amazonica*, vol. 37, no. 3, 2007, pp. 327-336, ISSN 0044-5967, DOI 10.1590/S0044-59672007000300003.
67. Fernández, K. y Rivera, R. "Bases científico-técnicas para el manejo de los sistemas agrícolas micorrizados eficientemente". En: Rivera R. y Fernández K., *Manejo efectivo de la simbiosis micorrízica, una vía hacia la agricultura sostenible. Estudio de caso: el Caribe*, edit. Ediciones INCA, La Habana, Cuba, 2003, p. 166, ISBN 959-7023-24-5.
68. Cruz, A. F.; Ishii, T.; Matsumoto, I. y Kadoya, K. "Network Establishment of Vesicular-*Arbuscular Mycorrhizal* Hyphae in the Rhizospheres between *Trifoliate Orange* and Some Plants". *Journal Japanese Society for Horticultural Science*, vol. 71, no. 1, 2002, pp. 19-25, ISSN 1880-358X, 0013-7626, DOI <http://dx.doi.org/10.2503/jjshs.71.19>.

69. González, P. J.; Arzola, J.; Morgan, O.; Rivera, R.; Plana, R. y Fernández, F. "Manejo de las asociaciones micorrízicas en pastos del género *Brachiaria* cultivados en suelos Ferralítico Rojo y Pardo Mullido". En: *XVI Congreso Científico del INCA*, edit. Ediciones INCA, La Habana, Cuba, 2008, ISBN 978-959-16-0953-3.
70. González, M. E. "Respuesta de plantas de *Coffea canephora* a la inoculación con hongos micorrizógenos arbusculares durante la fase de aclimatación". *Cultivos Tropicales*, vol. 25, no. 1, 2013, pp. 13-16, ISSN 0258-5936.
71. Herrera, P. R. A.; Hamel, C.; Fernández, F.; Ferrer, R. L. y Furrázola, E. "Soil-strain compatibility: the key to effective use of Arbuscular mycorrhizal inoculants?". *Mycorrhiza*, vol. 21, no. 3, 16 de junio de 2010, pp. 183-193, ISSN 0940-6360, 1432-1890, DOI 10.1007/s00572-010-0322-6.
72. Mohammad, A.; Mitra, B. y Khan, A. G. "Effects of sheared-root inoculum of *Glomus intraradices* on wheat grown at different phosphorus levels in the field". *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 103, no. 1, 2004, pp. 245-249, ISSN 0167-8809, DOI 10.1016/j.agee.2003.09.017.
73. Gamper, H.; Hartwig, U. A. y Leuchtmann, A. "Mycorrhizas improve nitrogen nutrition of *Trifolium repens* after 8 yr of selection under elevated atmospheric CO₂ partial pressure". *New Phytologist*, vol. 167, no. 2, 1 de agosto de 2005, pp. 531-542, ISSN 1469-8137, DOI 10.1111/j.1469-8137.2005.01440.x.
74. Bittman, S.; Kowalenko, C. G.; Hunt, D. E.; Forge, T. A. y Wu, X. "Starter Phosphorus and Broadcast Nutrients on Corn with Contrasting Colonization by Mycorrhizae". *Agronomy Journal*, vol. 98, no. 2, 2006, p. 394, ISSN 1435-0645, DOI 10.2134/agronj2005.0093.
75. Xoconostle, C. B. y Ruiz, M. R. "Impacto de la biotecnología agrícola en cultivos: el caso de las micorrizas". *Avance y perspectiva*, vol. 21, 2002, pp. 263-266, ISSN 0185-1411.
76. Karasawa, T.; Kasahara, Y. y Takebe, M. "Differences in growth responses of maize to preceding cropping caused by fluctuation in the population of indigenous Arbuscular mycorrhizal fungi". *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 34, no. 6, 2002, pp. 851-857, ISSN 0038-0717, DOI 10.1016/S0038-0717(02)00017-2.
77. Bajwa, R.; Aslam, N. y Javaid, A. "Comparison of Three Green Manures for Growth and VA Mycorrhizal Colonization in Maize (*Zea mays* L.)". *Journal of Biological Sciences*, vol. 2, no. 8, 2002, pp. 512-517, ISSN 17273048, 18125719, DOI 10.3923/jbs.2002.512.517.
78. Trannin, W. S.; Urquiaga, S.; Guerra, G.; Ibjibijen, J. y Cadisch, G. "Interspecies competition and N transfer in a tropical grass-legume mixture". *Biology and Fertility of Soils*, vol. 32, no. 6, 2000, pp. 441-448, ISSN 0178-2762, 1432-0789, DOI 10.1007/s003740000271.
79. Blanco, F. y Salas, E. "Micorrizas en la agricultura: contexto mundial e investigación realizada en Costa Rica". *Agronomía Costarricense*, vol. 21, no. 1, 1997, pp. 55-67, ISSN 0377-9424.
80. Franke, S. M.; Douds, D. D.; Galvez, L.; Phillips, J. G.; Wagoner, P.; Drinkwater, L. y Morton, J. B. "Diversity of communities of Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi present in conventional versus low-input agricultural sites in eastern Pennsylvania, USA". *Applied Soil Ecology*, vol. 16, no. 1, 2001, pp. 35-48, ISSN 0929-1393, DOI 10.1016/S0929-1393(00)00100-1.
81. Gosling, P.; Hodge, A.; Goodlass, G. y Bending, G. D. "Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming". *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 113, no. 1-4, 2006, pp. 17-35, ISSN 0167-8809, DOI 10.1016/j.agee.2005.09.009.
82. Kaizzi, C. K.; Ssali, H. y Vlek, P. L. G. "Differential use and benefits of Velvet bean (*Mucuna pruriens* var. utilis) and N fertilizers in maize production in contrasting agro-ecological zones of E. Uganda". *Agricultural Systems*, vol. 88, no. 1, 2006, pp. 44-60, ISSN 0308-521X, DOI 10.1016/j.agry.2005.06.003.
83. Caudle, N. "Legume green manures: a potential substitute for fertilizers in maize". *International Ag-Sieve*, vol. 3, no. 3, 2006, Disponible en: <1048-2962>.
84. Horst, W. J.; Kamh, M.; Jibrin, J. M. y Chude, V. O. "Agronomic measures for increasing P availability to crops". *Plant and Soil*, vol. 237, no. 2, 2001, pp. 211-223, ISSN 0032-079X, 1573-5036, DOI 10.1023/A:1013353610570.
85. Bajjukya, F. P.; Ridder, N. de y Giller, K. E. "Nitrogen Release from Decomposing Residues of Leguminous Cover Crops and their Effect on Maize Yield on Depleted Soils of Bukoba District, Tanzania". *Plant and Soil*, vol. 279, no. 1-2, 2006, pp. 77-93, ISSN 0032-079X, 1573-5036, DOI 10.1007/s11104-005-2504-0.
86. Paré, T.; Gregorich, E. G. y Nelson, S. D. "Mineralization of nitrogen from crop residues and N recovery by maize inoculated with vesicular-Arbuscular mycorrhizal fungi". *Plant and Soil*, vol. 218, no. 1-2, 2000, pp. 11-20, ISSN 0032-079X, 1573-5036, DOI 10.1023/A:1014958321933.
87. Rivera, R. "Resultados de las campañas de validación". En: Rivera R. y Fernández K., *Manejo efectivo de la simbiosis micorrízica, una vía hacia la agricultura sostenible. Estudio de caso: el Caribe*, edit. Ediciones INCA, La Habana, Cuba, 2003, p. 166, ISBN 959-7023-24-5.
88. Álvarez, S. J. D. y Anzueto, M. M. de J. "Actividad microbiana del suelo bajo diferentes sistemas de producción de maíz en los altos de Chiapas, México". *Agrociencia*, vol. 38, no. 1, 2004, pp. 13-22, ISSN 1405-3195.
89. Boswell, E. P.; Koide, R. T.; Shumway, D. L. y Addy, H. D. "Winter wheat cover cropping, VA mycorrhizal fungi and maize growth and yield". *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 67, no. 1, 1998, pp. 55-65, ISSN 0167-8809, DOI 10.1016/S0167-8809(97)00094-7.
90. Araújo, A. P. de y Almeida, D. L. de. "Adubação verde associada a fosfato de rocha na cultura do milho". *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 28, no. 2, 1993, pp. 245-251, ISSN 1678-3921.

Recibido: 5 de diciembre de 2014

Aceptado: 26 de agosto de 2015