

UN PRODUCTO



www.corpoica.org.co



MANUAL DE USO Y APLICACIÓN DE HONGOS FORMADORES DE MICORRIZAS ARBUSCULARES EN ESPECIES FORESTALES





MANUAL DE USO Y APLICACIÓN DE HONGOS FORMADORES DE MICORRIZAS ARBUSCULARES EN ESPECIES FORESTALES

C. I. Tibaitatá, Julio de 2010



PIZANO SA
Calidad total...siempre!



Libertad y Orden

Ministerio de Agricultura
y Desarrollo Rural



Manual de uso y aplicación de hongos formadores de micorrizas arbusculares en especies forestales

EQUIPO DE INVESTIGACIÓN

*María Margarita Ramírez Gómez, Diana Paola Serralde Ordóñez, Gabriel Roveda Hoyos
Alberto Ariel Rosero Laspriella, Sandra Tatiana Rivero Espitia, César Elías Baquero Maestre
Judith del Carmen Martínez Atencia, Braulio A. Gutiérrez Vanegas, John Jairo Zuluaga Peláez
Diana Pérez Hincapié, Miguel Rodríguez, Gloria Amparo Corredor H.*

Ramírez Gómez, María Margarita; Serralde Ordóñez, Diana Paola; Roveda Hoyos, Gabriel; Rosero Laspriella, Alberto Ariel; Rivero Espitia, Sandra Tatiana; Baquero Maestre, César Elías; Martínez Atencia, Judith del Carmen; Gutiérrez Vanegas, Braulio A.; Zuluaga Peláez, John Jairo; Pérez Hincapié, Diana; Rodríguez, Miguel; Corredor H., Gloria Amparo / Manual de uso y aplicación de hongos formadores de micorrizas arbusculares en especies forestales. Colombia. Corpoica. 2011. 52 p.

Palabras clave: MICORRIZAS ARBUSCULARES, HONGOS, *Gmelina arborea*, *Pachira quinata*, ÁRBOLES FORESTALES, REGIÓN CARIBE – COLOMBIA.



El contenido de esta publicación es producto de los resultados de investigación del proyecto financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural M.A.D.R., el cual fue desarrollado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA en colaboración con la empresa privada PIZANO S.A. en los años 2006–2009, titulado: “Reducción de pérdidas de producción de plántulas en vivero y trasplante por medio del uso de micorrizas arbusculares en dos especies forestales (*Gmelina arborea* y *Pachira quinata*) de alto potencial en el Caribe colombiano”.



© Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA

Línea de atención al cliente: 018000121515
atencionalcliente@corpoica.org.co
www.corpoica.org.co

ISBN: 978-958-740-055-7
CA: PN22100037
CUI: 1258
Primera edición: Mayo de 2011
Tiraje: 750 ejemplares

Producción editorial:
Diagramación, impresión y encuadernación



www.produmédios.org

Diseño: HERNANDO MEJÍA OSORIO

Impreso en Colombia
Printed in Colombia

El contenido de esta publicación es producto de los resultados de investigación del proyecto financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural M.A.D.R., el cual fue desarrollado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA en colaboración con la empresa privada PIZANO S.A. en los años 2006–2009, titulado:

‘Reducción de pérdidas de producción de plántulas en vivero y trasplante por medio del uso de micorrizas arbusculares en dos especies forestales (*Gmelina arborea* y *Pachira quinata*) de alto potencial en el Caribe colombiano’

MANUAL DE USO Y APLICACIÓN DE HONGOS FORMADORES DE MICORRIZAS ARBUSCULARES EN ESPECIES FORESTALES

EQUIPO DE INVESTIGACIÓN

- María Margarita Ramírez Gómez
- Diana Paola Serralde Ordóñez
- Gabriel Roveda Hoyos
- Alberto Ariel Rosero Laspriella
- Sandra Tatiana Rivero Espitia
- César Elías Baquero Maestre
- Judith del Carmen Martínez Atencia
- Braulio A. Gutiérrez Vanegas
- John Jairo Zuluaga Peláez
- Diana Pérez Hincapié

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA
CONVENIO CORPOICA – IICA/M.A.D.R. No. 002/2006
C. I. TIBAITATÁ, Julio de 2010



Contenido

GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	8
PRESENTACIÓN.....	11
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	15
Generalidades y beneficios de los HFMA	16
Especies forestales en el Caribe colombiano.....	19
Ceiba roja (<i>Pachira quinata</i>)	20
Teca blanca (<i>Gmelina arborea</i>)	21
HFMA asociados a especies forestales	22
CAPÍTULO II	
Especies nativas de HFMA asociadas a <i>G. arborea</i> y <i>P. quinata</i>	25
Muestreo de suelos	25
Análisis simbiótico	26
Identificación y análisis de diversidad de morfotipos de HFMA	29
Aislamiento y multiplicación de cepas nativas de HFMA.....	33
CAPÍTULO III	
Evaluación y selección de las mejores asociaciones de HFMA con <i>G. arborea</i> y <i>P. quinata</i>	35
Selección de cepas promisorias a nivel de vivero	38
Dosis y formas de aplicación de HFMA en vivero y campo.....	42
Vivero	44
Trasplante	48
CAPÍTULO IV	
Análisis económico del uso de la tecnología de biofertilización con HFMA en cultivos forestales de <i>G. arborea</i> y <i>P. quinata</i>	52
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
BIBLIOGRAFÍA	58

Lista de figuras

Figura 1.	Proceso de infección de la raíz de la planta por parte del HFMA..	18
Figura 2.	Principales beneficios de la asociación de especies vegetales con HFMA.....	18
Figura 3.	Clasificación taxonómica de los HFMA. Fuente: www.invam.caf.wvu.edu	19
Figura 4.	<i>Pachira quinata</i> – ceiba roja.....	21
Figura 5.	<i>Gmelina arborea</i> – teca.....	22
Figura 6.	Área de muestreo en el Caribe colombiano para análisis de poblaciones nativas de HFMA	26
Figura 7.	Esquemas de los procesos para análisis simbiótico	27
Figura 8.	Resultados promedio obtenidos del análisis de las variables simbióticas en cada uno de los departamentos muestreados y la especie forestal asociada	28
Figura 9.	Cantidad de morfotipos encontrados en el área de estudio por cada uno de los géneros	29
Figura 10.	Morfotipos de <i>Glomus</i> identificados a nivel de especie	30
Figura 11.	Índice de diversidad de Shannon-Wiener de la población de micorrizas arbusculares en cada departamento muestreado en el área de estudio	31
Figura 12.	Relación variables químicas del suelo y número de esporas por gramo	32
Figura 13.	Ilustración del proceso de multiplicación de HFMA.....	33
Figura 14.	Siembra de ensayo a nivel de vivero para evaluación de cepas de HFMA.....	37
Figura 15.	Análisis de variables simbióticas en etapa de vivero con <i>G. arborea</i> y <i>P. quinata</i>	38
Figura 16.	Porcentaje de supervivencia de plántulas de <i>G. arborea</i> en etapa de vivero.....	39
Figura 17.	Variables agronómicas evaluadas en etapa de vivero	40

Figura 18. Diferencias entre los tratamientos inoculados con HFMA y los testigos en relación con el desarrollo de las plantas de <i>Gmelina arborea</i> en el momento previo al trasplante a campo.....	41
Figura 19. Variables simbióticas y agronómicas evaluadas a nivel de vivero para determinar dosis de aplicación en plantas de <i>Gmelina arborea</i>	44
Figura 20. Variables simbióticas y agronómicas evaluadas a nivel de vivero para determinar dosis de aplicación en plantas de <i>P. quinata</i>	45
Figura 21. Diferencias entre los variados tratamientos establecidos en vivero (<i>Pachira quinata</i>)	47
Figura 22. Proceso de siembra de ensayos en campo	48
Figura 23. Ensayos establecidos en C. I. Turipaná y en E. E. Caribia.....	50
Figura 24. Respuesta de las plantas de <i>G. arborea</i> a la inoculación con HFMA en condiciones de campo en el C. I. Turipaná.....	51

Lista de tablas

- Tabla 1.** Características micorrízicas de los aislamientos o cepas evaluadas en las especies bajo estudio 34
- Tabla 2.** Descripción de los tratamientos evaluados a nivel de vivero..... 36
- Tabla 3.** Descripción de los tratamientos establecidos para la determinación de la forma y dosis de aplicación en vivero y campo 43
- Tabla 4.** Cepas o aislamientos seleccionados en vivero por el desarrollo de las plantas para ser trasplantadas a campo 46
- Tabla 5.** Cepas o aislamientos seleccionados por su mejor respuesta a la inoculación con HFMA 49
- Tabla 6.** Costos de producción de plántulas de las dos especies forestales bajo estudio para los diferentes tratamientos 53
- Tabla 7.** Reducción de costos por hectárea en plantaciones de *G. arborea* y *P. quinata* con el uso de la tecnología de biofertilización con HFMA..... 54

Glosario de términos

Adaptación: proceso por el cual un organismo sufre modificaciones fisiológicas-morfológicas que favorecen su supervivencia en el medio en el que se desarrolla. En las plantas, como producto de su interacción con el entorno, se generan mecanismos que les permiten desarrollar raíces más fuertes para adquirir agua y nutrientes.

Biofertilizantes: productos que contienen células vivas de microorganismos capaces de transformar importantes elementos nutricionales de estados no disponibles a formas disponibles a través de procesos biológicos o que participan en procesos de absorción y transporte de nutrientes. Son considerados como un componente fundamental del manejo integrado de cultivos y ayudan a incrementar la productividad de los mismos (Hegde et al., 1999).

Clasificación taxonómica: clasificación de las especies basada en sus relaciones de proximidad evolutiva.

Ecosistema: el CDB (Convenio sobre Diversidad Biológica) define un ecosistema como un complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos y su medio no viviente que interactúan como una unidad funcional.

Ecosistema sostenible: ecosistema que se caracteriza por mantener la base de los recursos de la cual depende. Requiere un mínimo de insumos artificiales o naturales externos al sistema, maneja plagas a través de mecanismos de regulación internos y se recobra frente a alteraciones causadas por actividades antrópicas.

Espora: célula reproductora asexual que permite la supervivencia de un organismo o grupo de organismos por largo tiempo y durante condiciones adversas. Es parte fundamental del ciclo biológico de plantas, hongos y algas.

Fertilizante: sustancia o mezcla química, natural o sintética, utilizada para enriquecer nutricionalmente el suelo y favorecer el crecimiento vegetal.

Gmelina arborea: el género *Gmelina* hace referencia a 58 especies perte-

necientes a la familia Verbenaceae. *Gmelina arborea* es una especie forestal exótica de gran interés económico debido a su rápido crecimiento y gran variedad de usos. Se desarrolla entre los 750 y los 4.500 msnm (metros sobre el nivel del mar).

Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA): organismos pertenecientes a la división Glomeromycota, que se caracterizan por su capacidad de asociarse simbióticamente con el 95% de las especies vegetales terrestres y una de cuyas funciones es la absorción y transporte de nutrientes. El intercambio bidireccional de los nutrientes se realiza en la interfase planta-hongo en las células de la corteza de la raíz.

Micorriza: la micorriza arbuscular es el resultado de la asociación de hifas fúngicas con las raíces de las plantas y cuya característica principal es el establecimiento de una relación simbiótica (ICA, Normas del ICA en materia de insumos agrícolas, 1995).

Inóculo: grupo (suspensión) de microorganismos vivos confinados en un medio específico para su posterior reproducción.

Microorganismo: ser vivo que solo puede ser visualizado con la ayuda de un microscopio. A diferencia de plantas y animales, presentan una organización biológica elemental, siendo la mayoría unicelulares (ej. bacterias, protozoos, algas y hongos).

Nutrientes: elementos o compuestos químicos provenientes del exterior de la célula y necesarios para que ésta pueda cumplir sus funciones vitales. Son tomados y transformados por la célula a través de un proceso metabólico.

Pachira quinata: el género *Pachira* hace referencia a 83 especies pertenecientes a la familia de las Bombaceas.

Propágulo infectivo: en HFMA, es cualquier estructura del hongo presente en el suelo (esporas o micelio del hongo) o en raíces colonizadas que pueda generar una infección en la raíz de la planta hospedera.

Raíz: órgano de la planta que normalmente se encuentra por debajo de la superficie de la tierra, cuya principal función es la absorción de agua y nutrientes, y el anclaje del cuerpo de la planta al suelo.



Región Caribe colombiana: región natural colombiana que comprende la extensa llanura al norte de los Andes que termina en la Sierra Nevada de Santa Marta para dar paso a la Península de La Guajira. La región está dominada por el delta del río Magdalena y posee un litoral no muy accidentado desde el Golfo de Urabá en dirección suroccidentonoriente hasta el Golfo de Venezuela. Aunque la región Caribe es predominantemente plana, se caracteriza por su variedad ecológica, cuyos ecosistemas van desde el bosque seco de La Guajira hasta la selva húmeda de la región del Golfo de Urabá. En ella se encuentran las mayores alturas del territorio colombiano, ubicadas en la Sierra Nevada de Santa Marta (picos Colón y Bolívar).

Rizósfera: porción del suelo en la que se encuentran las raíces de las plantas y donde tiene lugar una relación dinámica entre éstas y los microorganismos del suelo. La rizósfera provee un complejo y dinámico microambiente, donde bacterias y hongos, en asociación con las raíces, forman comunidades únicas.

Simbiosis: relación estrecha que se establece entre organismos de distintas especies y de la cual ambos se benefician.

Sistemas agroforestales: sistemas en los que se combinan diversas especies vegetales, entre ellos árboles y arbustos, especies herbáceas y/o ganado. En ellos se mezcla la tecnología de la silvicultura y la agricultura para crear sistemas de uso de la tierra más productivos.

Sistemas forestales: sistemas en los que se establecen únicamente especies forestales.

Sistemas silvopastoriles: son aquellos sistemas de producción que incluyen pastos mejorados con alto vigor y productividad, como por ejemplo los pastos Estrella, Guinea o Brachiaria, asociados con arbustos y/o árboles forrajeros.

Suelo: parte superficial de la corteza terrestre biológicamente activa, que tiende a desarrollarse en la superficie de las tierras emergidas por la influencia de la intemperie y de los seres vivos.

Presentación

Margarita Ramírez G.
Diana P. Serralde O.

Este manual es producto de la labor de investigación realizada por un equipo interdisciplinario de profesionales comprometidos con el desarrollo agrícola del país y con un manejo sostenible de los recursos naturales, especialmente del suelo. Actualmente, la capa productiva del suelo está siendo sometida –en diversos niveles y escalas de degradación– a procesos de deforestación y mal manejo, lo que conlleva tanto a la pérdida de calidad y productividad, así como a la de biodiversidad, lo cual se traduce en sistemas de producción poco sostenibles y competitivos.

Por esta razón y durante aproximadamente tres años (2006-2009), la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria –CORPOICA–, en alianza con la empresa privada PIZANO S.A., financiados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural –MADR–, realizó un estudio de las poblaciones nativas de Hongos Formadores de Micorriza Arbuscular (HFMA) asociados a *Gmelina arborea* y *Pachira quinata*, y los beneficios que esta asociación produce en la etapa inicial de vivero y establecimiento del cultivo de estas dos especies forestales en tres zonas de la región Caribe.

Todo esto en el marco del proyecto de investigación titulado ‘Reducción de pérdidas de producción de plántulas en etapa de vivero y campo a partir del uso de biofertilizantes en dos especies forestales (*Gmelina arborea* y *Pachira quinata*) de alto potencial en el Caribe colombiano’, el cual fue planteado con el fin de proponer una tecnología que aporte en la solución de los principales limitantes en la etapa inicial de la producción forestal, como son el poco desarrollo radicular de las plantas y la poca eficiencia que tienen en la captación de nutrientes en etapa de vivero, lo que lleva a una baja supervivencia y adaptación a condiciones de campo, factores ecofisiológicos que se traducen en pérdidas para el productor forestal, tanto en dinero como en tiempo de producción y calidad de los productos.

Así pues, este proyecto tuvo como objetivo principal incrementar la supervivencia, calidad y producción de plantas en vivero y trasplante a través del

uso de biofertilizantes tipo micorriza en dos especies forestales en el Caribe colombiano, para lo cual se establecieron dos fases de desarrollo dentro de la propuesta de investigación: una primera fase que consistió en determinar la capacidad natural que tienen estas dos especies forestales para asociarse con Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) nativos, determinando cuáles son los géneros de HFMA predominantes en esta asociación y multiplicándolos para obtener inóculos que permitan al productor forestal obtener los beneficios de la simbiosis; y una segunda fase donde se evaluó la eficiencia de estos inóculos en etapa de vivero y en la fase inicial de trasplante a campo, todo esto acompañado de un estudio económico que permite determinar las ventajas que produce la inoculación de especies forestales con HFMA y de la socialización de los resultados obtenidos con técnicos y productores, para de esta manera aportar al sector forestal –a través de trabajos de investigación básica y aplicada– estrategias que promuevan un buen manejo de los suelos y de la nutrición de los cultivos, permitiendo establecer sistemas forestales sostenibles y altamente competitivos.

En Colombia se han considerado algunas razones por las cuales se cuenta con un escaso establecimiento de plantaciones forestales, entre ellas un bajo margen de ganancia para los productores debido a aspectos tecnológicos y a un gran número de intermediarios; cultivos con ciclos de producción extensos que varían dependiendo de la especie entre 15 y 20 años; y adicionalmente, los altos costos de producción concentrados especialmente en las primeras etapas de establecimiento del cultivo (Espinel et al., 2005). No obstante, existe en el país un alto potencial de establecimiento de sistemas silvopastoriles, agroforestales y forestales, principalmente en la región Caribe, la que en las últimas décadas ha sido ampliamente impactada por procesos de deforestación y requiere de una priorización en sistemas de producción que permitan recuperar la calidad y sostenibilidad de sus recursos naturales a través de actividades de reforestación productivas.

Teniendo en cuenta la demanda de oportunidades que ofrece dicho sector, este trabajo de investigación se realizó con el fin de profundizar en el conocimiento con respecto al manejo y recuperación de suelos degradados a través de la evaluación de prácticas de biofertilización que admitan optimizar la toma de nutrientes y lograr así, además de un adecuado manejo de los recursos naturales, rendimientos competitivos y sostenibles de este tipo de cultivos.

El conocimiento y uso de la tecnología de biofertilización en especies forestales permitirá al agricultor hacer un manejo adecuado de la nutrición y toma de agua de las especies arbóreas, garantizando el suministro adecuado de nutrientes durante el período de crecimiento y por tanto la reducción de costos de producción, de pérdidas por mortalidad o descarte de plantas a nivel de vivero y trasplante, e incrementando la producción de madera (cantidad y calidad); así mismo, esta tecnología puede reducir tiempos de producción de biomasa en vivero y campo, lo cual se reflejará en mayores ingresos para los productores.

Desde la perspectiva tecnológica, estudios relacionados con la optimización de estos cultivos permitirán una mejor aproximación a la silvicultura de precisión, puesto que ésta requiere de un preciso diagnóstico y manejo de la condición árbol-suelo-ambiente. Esto se reflejará en la reducción de costos a nivel de vivero y trasplante por incremento en supervivencia de plantas, a la vez que en una reducción de descarte en las primeras etapas del trasplante y una sustitución parcial de fertilización química. Igualmente, con este tipo de estudios se espera incrementar la producción de madera debido al establecimiento de protocolos de fertilización del cultivo y manejo de suelos.



Capítulo I

INTRODUCCIÓN

Margarita Ramírez G.
Gabriel Roveda H.
Diana P. Serralde O.

El suelo es considerado un complejo ecosistema donde factores bióticos y abióticos convergen para hacer de éste un recurso natural esencial para la vida. En él habitan, además de invertebrados, una vasta variedad de microorganismos que juegan un papel muy importante en su sostenibilidad y productividad, por lo que un adecuado manejo de este recurso permite un equilibrio entre la producción de alimentos, fibras y productos, con el mantenimiento sostenible del mismo.

La sostenibilidad de este ecosistema depende en gran medida de la disponibilidad y uso eficiente de los recursos que él provee, además de los factores ambientales intrínsecos de cada región; es así como algunos de estos factores como la radiación solar, el ciclaje, y la disponibilidad de nutrientes y de agua constituyen algunos de los elementos que condicionan la productividad en ecosistemas tropicales como los de nuestro país.

Los suelos tropicales se caracterizan por su baja disponibilidad de nutrientes esenciales como el fósforo y el nitrógeno, indispensables para el desarrollo de las especies vegetales. El fósforo, por ejemplo, presenta una alta tasa de fijación en suelo, lo que reduce su disponibilidad para ser captado por las raíces de las plantas. Por su parte, el nitrógeno se encuentra, en su gran mayoría, en formas orgánicas no asimilables para la planta, factores que hacen que la producción de alimentos en ecosistemas tropicales se vea limitada, lo que le implica al agricultor recurrir a prácticas de manejo poco sostenibles ambientalmente entre las que se cuentan el uso indiscriminado de fertilizantes químicos. Una alternativa viable y ambientalmente sostenible para conservar

la productividad de los suelos y mantener o mejorar la disponibilidad de los recursos es el aprovechamiento de organismos y microorganismos, que a través de diversos procesos contribuyen a la obtención, ciclaje y reciclaje de nutrientes, y por ende a la sostenibilidad de los sistemas de producción.

Con la participación de microorganismos benéficos en procesos de nutrición de las plantas se pueden obtener mayores rendimientos agrícolas, pecuarios y forestales. Diversos microorganismos rizosféricos contribuyen a mejorar la calidad y productividad de los cultivos mediante la sustitución total o parcial de fertilizantes químicos; además, tienen la capacidad de proteger las plantas del ataque de organismos patógenos e inciden positivamente en su crecimiento y desarrollo. Tal es el caso de los Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) que son hongos del suelo que viven en estado simbiótico en las raíces de la mayoría de las plantas terrestres, ayudando a su nutrición y a tolerar factores adversos.

GENERALIDADES Y BENEFICIOS DE LOS HFMA

Los microorganismos son componentes importantes del suelo. La diversa cantidad de los que se encuentran en una fracción de suelo cumplen funciones determinantes en la transformación de los componentes orgánicos e inorgánicos que están presentes o se incorporan al suelo al tiempo que participan en los procesos que permiten convertirlos a formas asimilables por las plantas; de ahí su importancia en la nutrición de las plantas.

Dentro los microorganismos benéficos del suelo se destacan algunas asociaciones simbióticas presentes en las raíces de las plantas y ciertos hongos del suelo denominados Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA), que juegan un papel clave en el ciclaje de nutrientes dentro del ecosistema y en la protección de las plantas contra estreses bióticos y abióticos.

Los HFMA pertenecen a la división Glomeromycota, dentro de la cual se organizan en diversas familias, géneros y especies de acuerdo con sus características morfológicas y moleculares. Son microorganismos capaces de establecer relaciones simbióticas con el 90% de las plantas terrestres, lo cual incluye especies herbáceas, arbustivas y arbóreas. Su principal función está

relacionada con el transporte de nutrientes y agua, lo cual hace que las plantas presenten una mayor capacidad de tolerar situaciones de estrés hídrico, nutricional o estreses bióticos generados por presencia de plagas o enfermedades. Igualmente, se ha comprobado un mejor comportamiento y sobrevivencia de plántulas en etapas de semillero y vivero debido al rápido crecimiento del sistema radicular y mejor nutrición en las primeras etapas de desarrollo. Se consideran como los componentes más activos de los órganos de absorción de nutrientes de la planta, la que a su vez provee al hongo simbiote de nutrientes orgánicos y de un nicho protector.

Los HFMA pueden ser utilizados como biofertilizantes, bioprotectores y biorreguladores para la mayoría de cultivos; por esta razón forman parte del manejo integrado de suelos y plagas y así mismo pueden ser utilizados en actividades agropecuarias y forestales como biofertilizantes, que pueden ser aplicados en diferentes estados de desarrollo de los cultivos: a nivel de vivero, durante el enraizamiento de las plántulas, en etapas de trasplante y en cultivos establecidos en campo, constituyéndose así en una alternativa valiosa para solucionar problemas de procesos de micropropagación, aclimatación y establecimiento definitivo. Igualmente, su uso reduce los costos de producción, ya que se requiere una menor aplicación de fertilizantes sintéticos y pesticidas, permitiendo disminuir los volúmenes de agua de riego. De esta forma es posible establecer sistemas de producción más eficientes, precoces y productivos que aumenten la sostenibilidad de los cultivos.

La simbiosis benéfica planta-HFMA se puede promover mediante la aplicación de un inóculo mixto que debe contener una cantidad adecuada de propágulos infectivos (raíces micorrizadas, hifas del hongo y esporas). El proceso de infección de las raíces de las plantas con HFMA se inicia con un reconocimiento, por parte de la planta, de los propágulos infectivos del hongo a través de señales fisicoquímicas y moleculares. Una vez la planta ha reconocido al HFMA, permite que éste entre en contacto con la epidermis de la raíz y forme un apresorio o punto de entrada en dicha raíz; posteriormente, se inicia la colonización inter e intracelular de las células de la epidermis y de la corteza por parte del hongo, el cual forma dentro de la raíz vesículas de almacenamiento y arbusculos. Esta última es una estructura especializada que permite el intercambio bidireccional de nutrientes entre la planta y el hongo. Finalmente, el hongo desarrolla estructuras externas a la raíz que permiten completar su ciclo de vida y se convierten en una exten-

sión de ella para poder explorar una mayor área de la rizósfera y así absorber agua y nutrientes a los que por sí sola la planta no podría acceder (Figura 1).

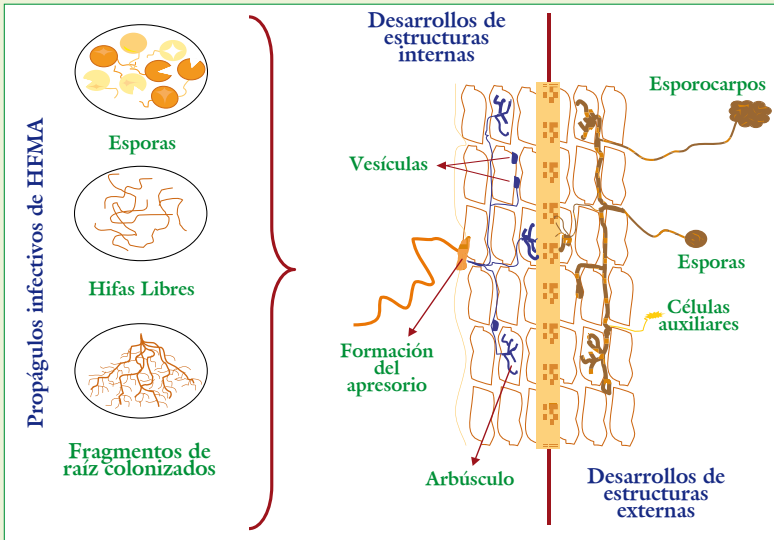


Figura 1. Proceso de infección de la raíz de la planta por parte del HFMA

La práctica de inoculación con micorrizas debe ser tomada en cuenta como una alternativa viable que promueve la sanidad y productividad de los cultivos de importancia agrícola y forestal. Los estudios demuestran una multiplicidad de ventajas, entre las cuales se destacan las presentadas en la Figura 2.



Figura 2. Principales beneficios de la asociación de especies vegetales con HFMA

La mejora en la capacidad de la toma de nutrientes y agua se refleja en la reducción de costos de producción por sustitución parcial de fertilizantes químicos y orgánicos, mayores producciones y menores tiempos en producción de biomasa.

La clasificación taxonómica de estos hongos es bastante compleja y es aún materia de estudio; sin embargo, según el INVAM (International Culture Collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi) actualmente los Glomales se dividen en cinco familias (Glomaceae, Acaulosporaceae, Archaeosporaceae, Paraglomaceae y Gigasporaceae) y siete géneros (*Glomus*, *Entrophospora*, *Acaulospora*, *Archaeospora*, *Paraglomus*, *Gigaspora* y *Scutellospora*). Esta clasificación está basada en las características morfológicas y moleculares de las esporas del hongo y se presenta en la Figura 3.

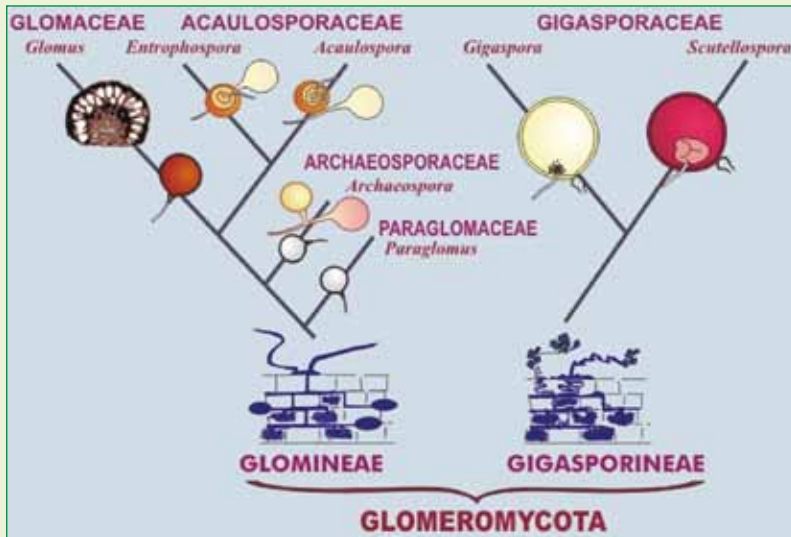


Figura 3. Clasificación taxonómica de los HFMA. Fuente: <http://www.invam.caf.wvu.edu/>

ESPECIES FORESTALES EN EL CARIBE COLOMBIANO

Gmelina arborea Roxb. y *Pachira quinata* Jaq., son las especies forestales más ampliamente difundidas para el establecimiento de plantaciones comerciales en la región Caribe colombiana. Entre las razones que explican tal fenómeno se encuentran, para *Gmelina*, su rápido crecimiento y múltiples usos arte-

sanales, semi industriales e industriales; y para *Pachira*, la calidad de la madera, siendo tal vez la más valiosa en el mercado nacional entre las especies nativas y para la cual se cuenta con un programa de mejoramiento genético que ya alcanza la tercera generación. De acuerdo con la información de SITEP –Sistemas de Información Territorial y Posicionamiento– (1999), hay establecidas más de 10.000 hectáreas con estas dos especies, principalmente en los departamentos de Bolívar y Magdalena, y en los últimos años se ha incrementado su siembra en otras zonas de la misma región, particularmente en el departamento del Cesar. En esta región hay un potencial de expansión forestal con estas especies de 770.000 hectáreas, de las cuales 400.000 son óptimas por oferta de suelos y ambiente, mientras que las 370.000 restantes tienen restricción por tipo de suelo.

Estas dos especies se adaptan y crecen dentro de límites aceptables para la producción forestal en plantaciones comerciales, tanto a las condiciones del Caribe seco como del Caribe húmedo. Dada la amplia oferta medioambiental del Caribe y el potencial de expansión para el establecimiento de plantaciones con dichas especies, es recomendable implementar un proceso de ajuste de los paquetes tecnológicos desarrollados para ellas, los cuales hasta ahora se han aplicado en áreas con una relativa baja diversidad ambiental en el Caribe seco.

CEIBA ROJA (*PACHIRA QUINATA*)

Árbol de la familia Bombacaceae, comúnmente conocido como cedro espiño, ceiba roja o cedro espinoso, que alcanza de 20 a 40 m de altura y de 1 a 2 m de diámetro. Tiene un tronco recto y cilíndrico, con espinas cónicas, caducas, con puntas agudas y ligeramente curvadas y con copa redondeada y follaje disperso. En plantas jóvenes el tronco se bifurca en tres ramas. La corteza del tronco es de color grisáceo, algunas veces marrón. Presenta hojas caducas, palmeadas, con 5-7 foliolos de 8 a 14 cm de largo y de 3 a 8 cm de ancho, bordes enteros o dentados, peciolo largo y ligeramente acanalado. Las flores son blancas y el fruto es una cápsula verde que se torna amarilla con la madurez, dehiscente con un gran número de semillas recubiertas por pelos algodonosos que se dispersan con el viento. Se encuentra ampliamente distribuido en zonas tropicales bajas, tanto en climas secos como en húmedos. Su madera es de excelente calidad y es empleada en industrias de muebles, ebanistería, construcción, cajas, chapas, puertas y tableros (Figura 4).



Figura 4. Pachira quinata – ceiba roja

Debido a la fuerte explotación de la ceiba roja en el país, ésta fue categorizada como especie en peligro en la Lista Roja de Especies Amenazadas (*Red List of Threatened Species*) en 1998 (www.redlist.org), por lo que a partir de esta fecha se ha prestado un gran interés en la explotación sostenible de este cultivo y en el establecimiento de sistemas de reforestación desarrollados con *Pachira*.

TECA BLANCA (*GMELINA ARBOREA*)

Árbol originario del sudeste asiático que ha sido introducido con éxito en muchos países tropicales como Costa Rica, Colombia, Brasil, Venezuela, Trinidad, Cuba y Belice, especialmente en zonas de bosque muy húmedo tropical, bosque húmedo tropical y bosque seco tropical, en zonas con temperaturas entre 24 y 35°C y en altitudes entre los 0 y 900 msnm. Las primeras plantaciones en Colombia se iniciaron en la Costa Atlántica en la década de los 60 y actualmente existen más de 14.000 ha plantadas, principalmente en Bolívar, Magdalena, Llanos Orientales y Cundinamarca.

Pertenece a la familia Verbenaceae y se conoce con los nombres de gmelina, gemelita, melina yemará, gumhar, gomor o teca blanca. Se considera un árbol de corta vida que generalmente no sobrepasa los 30 años; no obs-

tante, presenta un alto potencial en la industria forestal debido a su rápido crecimiento durante los primeros 6 años de plantación. Alcanza hasta 30 m de altura y 60-100 cm de diámetro. La corteza es lisa o escamosa, de color marrón pálido o grisáceo. La copa es amplia y con abundantes ramas gruesas y bajas. Las hojas son grandes, simples, opuestas, acorazonadas, de 10-20 cm de largo y 5-18 cm de ancho. Su madera es liviana, de alto lustre y de apariencia suave y sedosa. Es fácil de trabajar y responde muy bien a los tintes, lo que la hace muy versátil (Figura 5).



Figura 5. Gmelina arborea - teca

Esta especie tiene un amplio uso en la producción de pulpa para papel y en la industria maderera para fabricación de muebles rústicos y finos, chapas, puertas, tableros y aglomerados, entre otros. Sus hojas se consideran como un buen alimento para el ganado, ya que tienen un contenido de proteína cruda cercano al 12%; por otro lado, sus raíces y corteza tienen amplios usos medicinales para el tratamiento de dolencias estomacales, hemorroides, es un excelente diurético y elimina la sensación de ardor y fiebre. Adicionalmente, la pasta de las hojas es utilizada para aliviar dolores de cabeza y el jugo se utiliza para el lavado de las úlceras.

HFMA ASOCIADOS A ESPECIES FORESTALES

La mayoría de las especies tropicales se encuentran asociadas a HFMA y este tipo de asociación simbiótica está ampliamente difundida en ecosistemas naturales del trópico (Janos, 1980; Gianinazzi and Gianninazzi, 1983 y Varma

and Hock, 1995). Los beneficios de esta simbiosis han sido bien documentados por sus múltiples efectos benéficos (Menge, 1983; Sieverding, 1986; Hamel, 1996 y Ramírez, 2003). En el caso de especies arbóreas se han reportado que pocas especies de árboles son incapaces de formar micorrizas.

Estudios realizados en la Guyana Francesa mostraron que de 75 especies arbóreas estudiadas, todas eran capaces de asociarse con micorrizas (Kuyper et al., 2004). En Camerún (Parque Nacional Korup), 55 de 56 especies arbóreas evaluadas formaban micorrizas; y en el sur de Camerún, todas las 97 especies forestales evaluadas presentaron asociación micorrízica (Onguene, 2000).

Otros estudios, realizados por la Universidad Nacional de Costa Rica, reportan evidencias del beneficio obtenido por el uso de micorrizas en transporte y absorción de P, Zn, Cu, N y K en diversas especies forestales, encontrándose mayor contenido de estos nutrientes en la planta, mayor resistencia al ataque de hongos y nemátodos, y mayor resistencia a altas concentraciones de sales en el suelo, al estrés por altas temperaturas y al desbalance nutricional.

Más recientemente estudios muestran los efectos benéficos de las micorrizas en el mejoramiento de la aclimatación de plantas micropropagadas con una reducción en la mortalidad de plantas en el momento del transplante (Rivas, 1997; Kuyper et al., 2004 y Alvarado, 2005).

Habte et al. (2001) mostraron el efecto benéfico de las micorrizas (*Glomus aggregatum*) en el establecimiento de semilleros de Acacia koa, debido a la mayor capacidad de las plantas en la toma del fósforo en etapas tempranas de crecimiento, lo cual se reflejó en biomasa de plantas y en contenido de fósforo en parte aérea, favoreciendo la capacidad de establecimiento de las plantas en campo.

Plantas de *Leucaena leucocephala* fueron capaces de absorber entre 27 y 38 veces más fósforo de la solución cuando estaban micorrizadas que cuando no lo estaban (Habte and Manjunth, 1897). La inoculación de *Gmelina arborea* con *Glomus intraradices* mostró efectos benéficos en etapa de vivero, con mayor desarrollo de las plantas (Sanon et al., 2005). Por otra parte, investigaciones realizadas por Gadea (2004) permitieron determinar que el uso de micorrizas (*Glomus fasciculatum* y *Glomus clarum*) incrementó el número de hojas en pilón (*Hyeronima alchorneoides*) y teca (*Tectonis grandis*).

La teca fue la especie más sensible a la inoculación con micorrizas, mostrando un aumento en altura, número de hojas y diámetro de la base del cuello. Similar efecto fue reportado para laurel (*Cordia alliodora*) cuando se adicionó fertilizante químico y cuando no se aplicó fertilizante.

Muchos aislamientos de micorrizas han mostrado efectos positivos en crecimiento de especies arbóreas en suelos con bajos contenidos de nutrientes. Entre ellos *Gigaspora rosea*, *Glomus etunicatum* y *Acaulospora scrobiculata* promovieron el crecimiento de *Paraserianthes falcataria* y *Acacia mangium* en suelos pobres en nutrientes y erosionados. De otro lado, *Scutellospora weresubiae*, *Glomus manihotis* y *Glomus mosseae* incrementaron el crecimiento entre 1.5 y 3 veces con relación al testigo en *Pterocarpus indicus*, *P. vidalianus* y *Albizia saman*. (Prematuri, 1995; Setiadi, 1996 y Prematuri and Dood, 1997).

Así pues, las investigaciones a nivel mundial dilucidan que los HFMA pueden ser utilizados en especies arbóreas o arbustivas en forma de biofertilizantes, tanto en vivero como en plantas producidas *in vitro*, y constituyen una alternativa valiosa para solucionar problemas de propagación, aclimatación y nutrición de las especies porque reducen costos de producción, permitiendo sistemas de producción más eficientes, precoces y productivos que contribuyen con la sostenibilidad ya que requieren una menor aplicación de insumos fertilizantes, riego y pesticidas.

Esta tecnología puede ser fácilmente transferible a técnicos y agricultores (Godara *et al.*, 1996 y Azcón y Barea, 1997), aunque hay que tener en cuenta que las prácticas culturales y los procesos de degradación de suelos afectan las poblaciones de micorrizas, especialmente en especies perennes. La tala y quema de bosques (con fines comerciales o no) puede reducir e incluso eliminar los hongos micorrízicos. Esta reducción es menos drástica cuando se realiza una tala selectiva, pues se ha encontrado una reducción del 95% en las poblaciones de micorrizas cuando se realizan talas severas en suelos compactados. De igual manera, la intensificación de las prácticas agronómicas y la alta fertilización pueden causar la reducción del inóculo natural de micorrizas (Alexander *et al.*, 1992; Onguene, 2000 y Kuyper *et al.*, 2004).

En condiciones adversas de suelo y clima se recomienda inocular las especies arbóreas en etapa de vivero y realizar una reinoculación cuando son trasplantadas a sitio definitivo, con el fin de garantizar la inoculación y el establecimiento eficiente si tienen que competir con especies de micorrizas nativas (Godbold and Sharrock, 2003).

Capítulo II

ESPECIES NATIVAS DE HFMA ASOCIADAS A *G. ARBOREA* Y *P. QUINATA* EN EL CARIBE COLOMBIANO.

María Margarita Ramírez G.
Diana Paola Serralde O.
Andrea María Peñaranda R.
César Baquero
Judith Martínez
Gabriel Roveda H.

MUESTREO DE SUELOS

Los géneros y especies de HFMA no presentan especificidad por algún hospedero en particular; sin embargo, se reconoce la existencia de diferentes grados de preferencia de la asociación entre una planta determinada y un género, especie o morfotipo de HFMA, razón por la que la producción de un inóculo con especies asociadas de forma natural con un cultivo específico constituye una herramienta ideal para garantizar la efectividad del mismo.

La etapa inicial del desarrollo de este trabajo de investigación consistió en hacer un amplio sondeo de las condiciones naturales de la población micorrízica en plantaciones ya establecidas de *G. arborea* y *P. quinata* en el Caribe colombiano, con el fin de determinar los géneros nativos predominantes asociados a estos cultivos forestales. En total se tomaron 122 muestras por duplicado en 5 departamentos, 10 municipios y 20 fincas, y en 46 cultivos establecidos de *Pachira* y 76 de *Gmelina* (Figura 6).

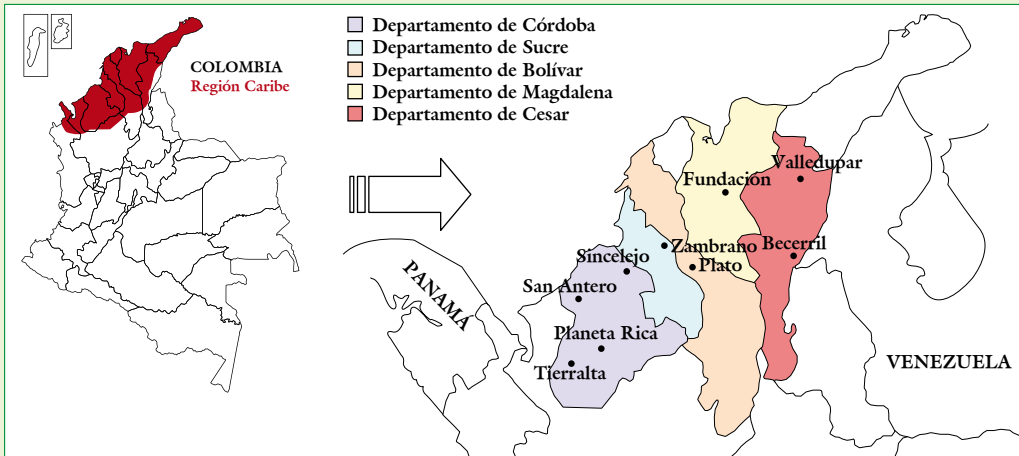


Figura 6. Área de muestreo en el Caribe colombiano para análisis de poblaciones nativas de HFMA.

ANÁLISIS SIMBIÓTICO

El análisis de las poblaciones de HFMA se basa en tres componentes principales: el primero, determinar el número de esporas encontradas por gramo de suelo; el segundo, determinar el género al que pertenecen cada una de estas esporas; y el último, determinar en una muestra de la raíz qué porcentaje de la misma se encuentra colonizada por HFMA. Para esto existen algunas técnicas de laboratorio estandarizadas que permiten obtener resultados confiables:

- Cuantificación del número de esporas por gramo de suelo. Método de Gerderman and Nicholson (Figura 7a.)
- Determinación del porcentaje de colonización. Tinción diferencial de raíces. Phillips and Hayman (1970) (Figura 7b.)
- Clasificación taxonómica. Clave de clasificación de INVAM y de Schenk and Pérez (1988).

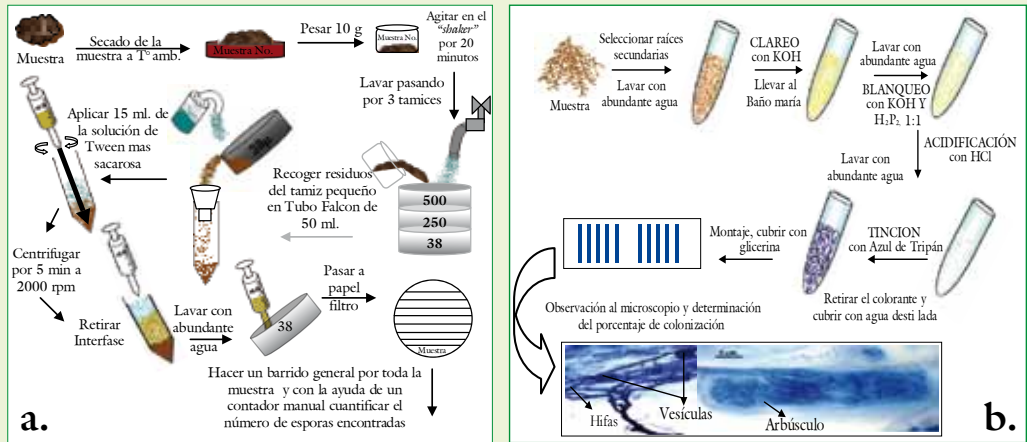


Figura 7. Esquemas de los procesos para análisis simbiótico.

- Esquema del proceso de aislamiento y cuantificación del número de esporas en una muestra de suelo.
- Esquema del proceso para la determinación del porcentaje de colonización de raíces colonizadas por HFMA.

En términos generales, el análisis de las variables simbióticas permite establecer que los suelos de la región Caribe asociados a cultivos de las dos especies forestales bajo estudio tienen en promedio 31 esporas nativas por gramo y el 95% de las raíces analizadas presentaron colonización por parte del HFMA con un promedio de 19% (Figura 8a), siendo Sucre el departamento con mayores valores tanto en número de esporas como en porcentaje de colonización. En cuanto al análisis de estas variables, de acuerdo a la especie forestal asociada (Figura 8b), los resultados no reflejan una clara diferencia entre *Pachira quinata* y *Gmelina arborea* en ninguno de los dos casos.

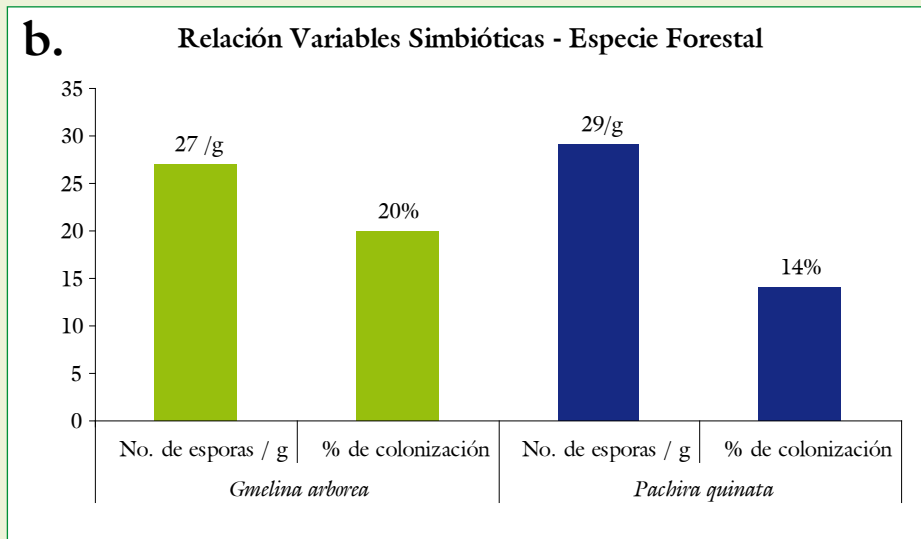
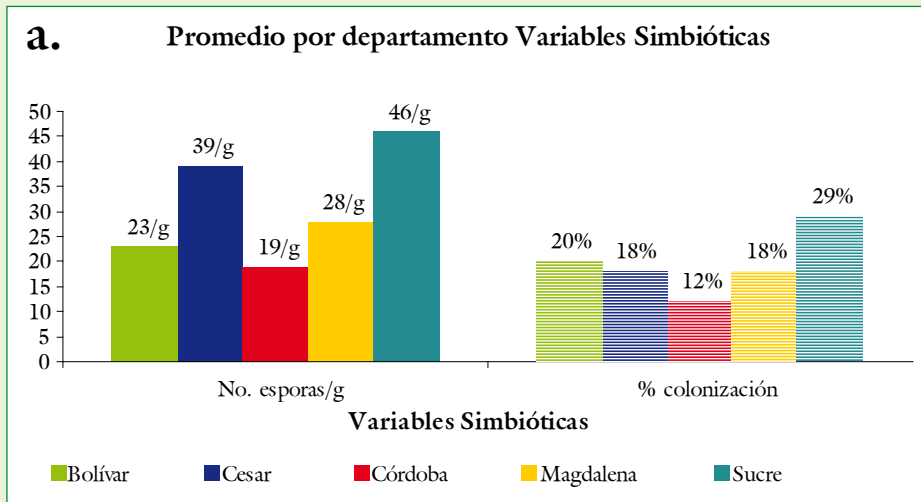


Figura 8. Resultado promedio obtenido del análisis de las variables simbióticas en cada uno de los departamentos muestreados y la especie forestal asociada.

- a. Resultado promedio obtenido del análisis de las variables simbióticas en cada uno de los departamentos muestreados.
- b. Relación de las variables simbióticas analizadas con la especie forestal asociadas.

IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE DIVERSIDAD DE MORFOTIPOS DE HFMA

En cuanto a la identificación a nivel de género de los morfotipos presentes en cada una de las muestras (Figura 9), los resultados reflejan que el género *Glomus* presenta la mayor diversidad en el área de estudio, lo cual demuestra su alta flexibilidad para adaptarse a distintas condiciones edafoclimáticas, característica que es atribuida principalmente a que las esporas de dicho género presentan paredes fuertes que les permiten mantenerse en latencia por largos periodos de tiempo y al gran número de fenotipos existentes (INVAM).

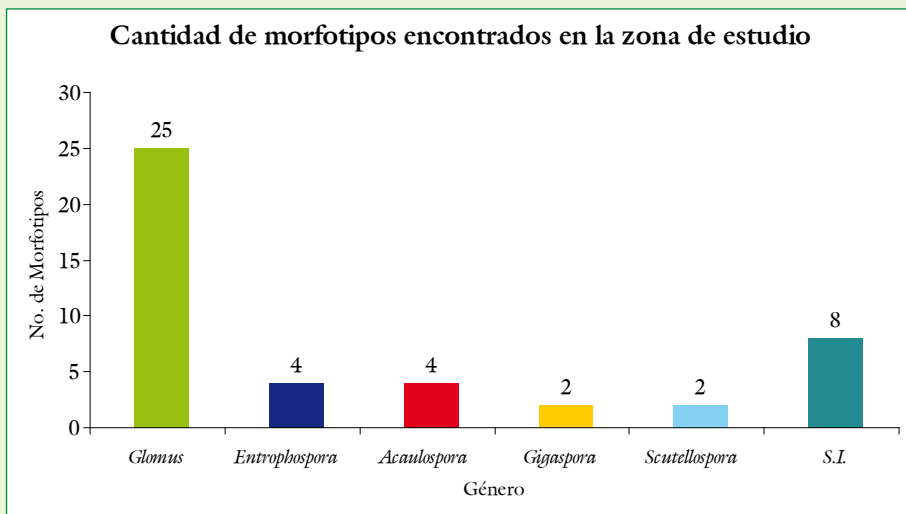


Figura 9. Cantidad de morfotipos encontrados en el área de estudio por cada uno de los géneros (S. I.: morfotipos sin identificar).

Dentro de los géneros de HFMA identificados en los diferentes suelos muestreados, el género *Glomus* mostró mayor cantidad de morfotipos. De acuerdo con las claves taxonómicas de Schenk y Pérez (1988) y la información disponible en el INVAM (**I**nternational **C**ulture **C**ollection of (**V**esicular) **A**rbuscular **M**ycorrhizal **F**ungi), se identificaron a nivel de especie algunos de los morfotipos encontrados (Figura 10). De todas formas, es

importante aclarar que esta identificación requiere de una confirmación a través de técnicas moleculares más precisas, ya que como se mencionó anteriormente la identificación de estos microorganismos es bastante compleja. Así pues, este es un primer acercamiento al conocimiento de la alta diversidad interespecífica que presentan los HFMA en esta zona del país.














Morfotipo	Posible especie		Morfotipo	Posible especie	
2	<i>G. etunicatum</i>		13	<i>G. coronatum</i>	
6	<i>G. luteum</i>		21	<i>G. mos seae</i>	
7	<i>G. luteum</i>		22	<i>G. mos seae</i>	
9	<i>G. coronatum</i>		23	<i>G. etunicatum</i>	
10	<i>G. claroideum</i>		25	<i>G. oscuro</i>	
11	<i>G. coronatum</i>				

Figura 10. Morfotipos de *Glomus* identificados a nivel de especie siguiendo las claves taxonómicas de Schenk and Pérez (1988).

El análisis de la diversidad de HFMA asociados a plantaciones forestales de las dos especies en estudio, se realizó de acuerdo al índice de diversidad de Shannon-Wiener (H'), el cual tiene en cuenta la riqueza (morfotipos presentes en el área de estudio) y la abundancia de especies (cantidad relativa de cada uno de los morfotipos) dentro de una población infinita muestreada al azar.

El resultado de este análisis para el área de estudio muestra un índice de diversidad H' de 2.89, lo que permite catalogar a esta región dentro de un rango medio-alto en términos de biodiversidad de HFMA, teniendo en cuenta que este índice toma valores entre 1 y 5. En la Figura 11 se presenta el valor de H' para cada uno de los departamentos muestreados en cuanto a la diversidad micorrízica, mostrando que el Cesar es el departamento que presenta un mayor valor de H' y Bolívar el menor valor para diversidad. Es importante observar que para todos los departamentos el valor de la diversidad es medio-alto.

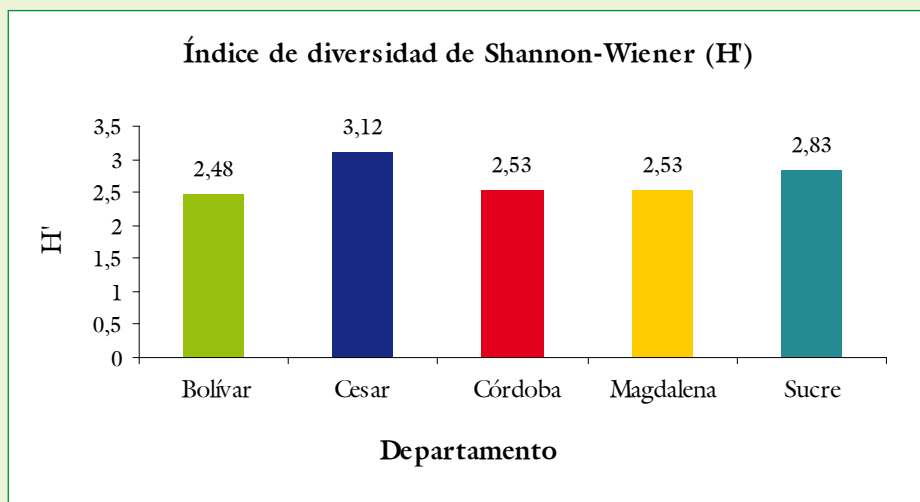


Figura 11. Índice de diversidad de Shannon-Wiener de la población de micorrizas arbusculares en cada departamento muestreado en el área de estudio.

Las poblaciones de HFMA se caracterizan por ser capaces de soportar condiciones adversas –por ejemplo sequía o grandes concentraciones de aluminio– por lo que es posible encontrar esporas de HFMA en todo tipo de suelos independientemente de las características que estos presenten. No obstante, se ha establecido que algunas características químicas del suelo como son la concentración de fósforo, el pH y el porcentaje de materia orgánica, pueden ser factores que modulen el comportamiento de las comunidades y poblaciones de HFMA; por ello se realizó una correlación entre la presencia y tamaño de las comunidades de HFMA (número de esporas por gramo de suelo) y las características químicas del suelo, considerando

variables como la concentración de fósforo, el pH y la materia orgánica (Figura 12).

Esta correlación permite concluir que el fósforo disponible es uno de los factores que modula la estructura de las poblaciones de HFMA, ya que suelos con bajos contenidos de P disponible presentan mayor número de esporas que suelos con mayores contenidos de este elemento. Sin embargo, el pH y la materia orgánica importante en la modulación de comunidades de HFMA en otras regiones del país como los Llanos Orientales (Serralde y Ramírez, 2004) o la sabana de Bogotá (Santana y Ramírez, 2005), no mostraron en el Caribe influencia sobre el número de esporas.

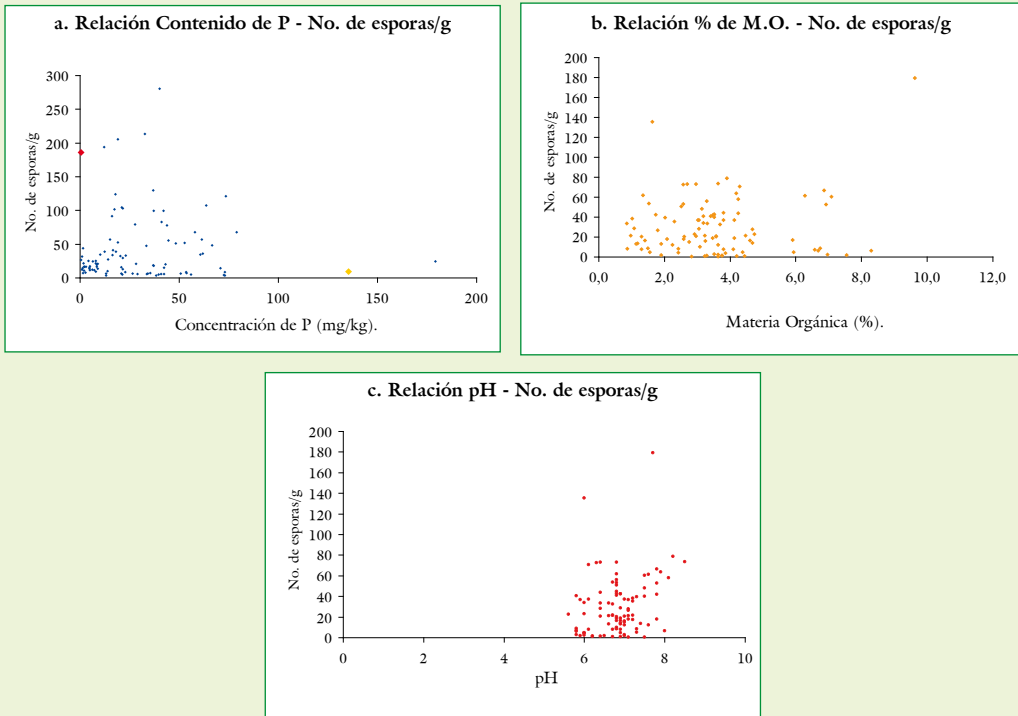


Figura 12. Relación variables químicas del suelo y número de esporas por gramo

AISLAMIENTO Y MULTIPLICACIÓN DE CEPAS NATIVAS DE HFMA

Los HFMA son simbiontes obligados, lo cual exige la presencia de una planta hospedera para lograr la multiplicación del hongo y obtención del inóculo. Para esto, se establece una serie de ensayos de multiplicación a nivel de invernadero en los que de forma escalonada se van multiplicando los inóculos iniciales hasta obtener la cantidad de biofertilizante requerida.

En la Figura 13 se ilustra el proceso de multiplicación, que consiste básicamente en la inoculación de una planta hospedera que se mantiene en invernadero durante aproximadamente 3-4 meses, momento en el cual se somete a estrés hídrico para aumentar la esporulación del hongo. Finalmente se recoge todo el sustrato, se incorporan las raíces de la planta hospedera, se realiza un control de calidad del inóculo obtenido (± 50 esporas/g) y se inicia nuevamente el ciclo, aumentando el volumen del sustrato.



Figura 13. Ilustración del proceso de multiplicación de HFMA

Para el desarrollo de este trabajo de investigación, la obtención del inóculo final –que se evaluó en plantas de *G. arborea* y con *P. quinata* tanto a nivel de vivero como en trasplante a campo– inició con la multiplicación de algunas de las muestras tomadas en la en la región Caribe, esto con el fin de multiplicar propágulos infectivos que fueran nativos y estuvieran asociados de forma natural con las dos especies bajo estudio.

En la primera etapa de multiplicación se seleccionaron 28 muestras de acuerdo a características contrastantes, tales como la presencia de diversos géneros de HFMA, el tamaño de la población encontrada (número de esporas) y el porcentaje de colonización de las muestras de la raíz. Una vez finalizada esta etapa de multiplicación, los inóculos obtenidos se mezclaron buscando obtener solamente cuatro cepas o aislamientos de HFMA para ser evaluados directamente en las especies bajo estudio. En la Tabla 1 se presentan las características de cada uno de estos aislamientos.

En los ensayos se incluyeron dos aislamientos adicionales de HFMA: el aislamiento 5, proveniente de suelos de Cundinamarca cultivados con uchuva, el cual contenía esporas de los géneros *Glomus*, *Entrophospora* y *Acaulospora*; y el aislamiento 6, correspondiente al producto comercial de Corpoica ‘Mycobiol®’, que contiene esporas de los géneros *Acaulospora*, *Entrophospora* y *Glomus*, provenientes de suelos del Caribe colombiano. Los anteriores aislamientos contenían aproximadamente 50 esporas/g de biofertilizante.

Tabla 1. Características micorrízicas de los aislamientos o cepas evaluadas en las especies bajo estudio.

Cepa o Aislamiento	Géneros predominantes (Cantidad de morfotipos)	Nº esporas/g de suelo
1	<i>Glomus</i> (5)	39
2	<i>Glomus</i> (6) <i>Acaulospora</i> (1) Sin identificar (1)	53
3	<i>Glomus</i> (8) <i>Acaulospora</i> (2) <i>Scutellospora</i> (1) Sin identificar (1)	47
4	<i>Glomus</i> (5) <i>Gigaspora</i> (1) Sin identificar (1)	62

Capítulo III

EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS MEJORES ASOCIACIONES DE HFMA CON *G. ARBOREA* Y *P. QUINATA*.

Margarita Ramírez G.
Alberto Rosero L.
Diana P. Serralde O.
César E. Baquero M.
Sandra T. Rivero E.
Judith Martínez
Diana Pérez H.

Algunos de los limitantes en la producción de especies arbóreas están relacionados con los procesos de multiplicación, aclimatación y adaptación de los cultivos en diversas condiciones agroecológicas. Los biofertilizantes con base en HFMA son una alternativa para reducir pérdidas en estos procesos, ya que se ha demostrado en un alto número de cultivos (semestrales y perennes) el efecto benéfico relacionado con mayor supervivencia de plantas a nivel de vivero, debido al incremento en el crecimiento de raíces y a una mejor nutrición en estados tempranos de desarrollo, reducción de tiempos en vivero por las mayores tasas de crecimiento y acumulación de biomasa, y mejor adaptación a condiciones de estrés hídrico y nutricional bajo condiciones de campo.

Estos efectos se ven reflejados en la capacidad de producción de biomasa y en la calidad del producto final, que para el productor forestal se convierten en mayor competitividad y sostenibilidad, con reducciones de costos de producción y mejora en los ingresos (Sánchez, 1999; Sieverding, 1986; Ramírez, 2003; Oberson y Joner, 2003 y Kuyper et al., 2004).

La evaluación y selección de las mejores asociaciones de HFMA y especies forestales (*Gmelina arborea* y *Pachira quinata*) es de gran relevancia para obtener los mayores beneficios de esta asociación simbiótica. Para este proceso de evaluación a nivel de vivero, se utilizaron aislamientos nativos de HFMA provenientes de suelos del Caribe (Capítulo II), cuatro cepas en total (Tabla 1), los cuales sugieren una adecuada adaptación a las condiciones edáficas y climáticas de esta región. Adicionalmente, se evaluó el comportamiento de dos aislamientos más de HFMA, uno proveniente de suelos de Cundinamarca, que demostró una alta eficiencia en frutales de clima frío, y otro que constituye la base del producto comercial de CORPOICA (Mycobiol®).

Dado que los HFMA no proporcionan nutrientes a la planta sino que mejoran su eficiencia en los procesos de absorción, estos tratamientos fueron fertilizados con dosis medias de la fertilización convencional, la cual fue definida de acuerdo con los análisis químicos de suelos. Estos tratamientos micorrizados fueron confrontados con tres testigos sin inocular: uno con el 100% de fertilización convencional y otro con el 50% y un testigo absoluto, para así determinar el potencial de los aislamientos nativos de HFMA como posibles inoculantes y para el posterior desarrollo de biofertilizantes altamente eficientes para las especies forestales bajo estudio (Tabla 2)

Tabla 2. Descripción de los tratamientos evaluados a nivel de vivero

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	FERTILIZACIÓN	OBSERVACIONES
1	Cepa o Aislamiento 1 (nativa del Caribe)	50%	0.5 g de 10-30-10/planta
2	Cepa o Aislamiento 2 (nativa del Caribe)		
3	Cepa o Aislamiento 3 (nativa del Caribe)		
4	Cepa o Aislamiento 4 (nativa del Caribe)		
5	Cepa o Aislamiento 5 (nativa de C/marca)		
6	Cepa o Aislamiento 6 (Mycobiol®)		
7	Testigo absoluto	0%	
8	Testigo 50%	50%	0.5 g de 10-30-10/planta
9	Testigo 100%	100%	1.0 g de 10-30-10/planta

El diseño experimental de estos ensayos fue de Bloques Completos al Azar (BCA), con 30 unidades experimentales por tratamiento y 3 repeticiones. La semilla empleada para *Gmelina* fue de carácter asexual a partir de yemas vegetales, mientras que en el caso de la ceiba se usó semilla sexual, cuyo crecimiento es más lento. Las plántulas fueron inoculadas con 5 g de biofertilizante tipo micorriza y se realizaron muestreos cada 15 días alternando un muestreo de observación y uno destructivo, en cada uno de los cuales se tomaron datos de supervivencia de plantas, altura de la planta, número de hojas y diámetro del cuello de la raíz. Adicionalmente, en los muestreos destructivos se evaluó peso fresco y seco de la parte aérea y la raíz, volumen de la raíz, longitud de la raíz, número de esporas/g y porcentaje de colonización. Estas lecturas se realizaron durante el tiempo de permanencia de las plántulas en vivero, considerando que, de acuerdo con la recomendación de los profesionales de Monterrey Forestal-PIZANO, las plántulas están en condiciones de trasplante cuando alcanzan 5 mm de diámetro del cuello de la raíz (entre 3-4 meses) (Figura 14).



Figura 14. Siembra de ensayo a nivel de vivero para evaluación de cepas de HFMA

- a. Inoculación
- b y c. Siembra de plántulas
- d y e. Vista general del ensayo de *Gmelina*

SELECCIÓN DE CEPAS PROMISORIAS A NIVEL DE VVERO

En las dos especies forestales bajo estudio se presentó un adecuado establecimiento de la simbiosis con los aislamientos de HFMA seleccionados. En el caso de *G. arborea*, el mejor resultado se dio con una cepa proveniente de una zona agroecológica diferente, aunque dos de las cepas nativas mostraron un buen comportamiento; en el caso de *P. quinata*, los mejores resultados –en cuanto a establecimiento de la simbiosis– se presentaron con las cepas nativas (2, 3 y 4). La cepa 2 mostró buenos resultados con ambas especies, lo cual refleja una posible mayor flexibilidad en cuanto a preferencia de hospederos de los HFMA que forman parte de este aislamiento (Figura 15).

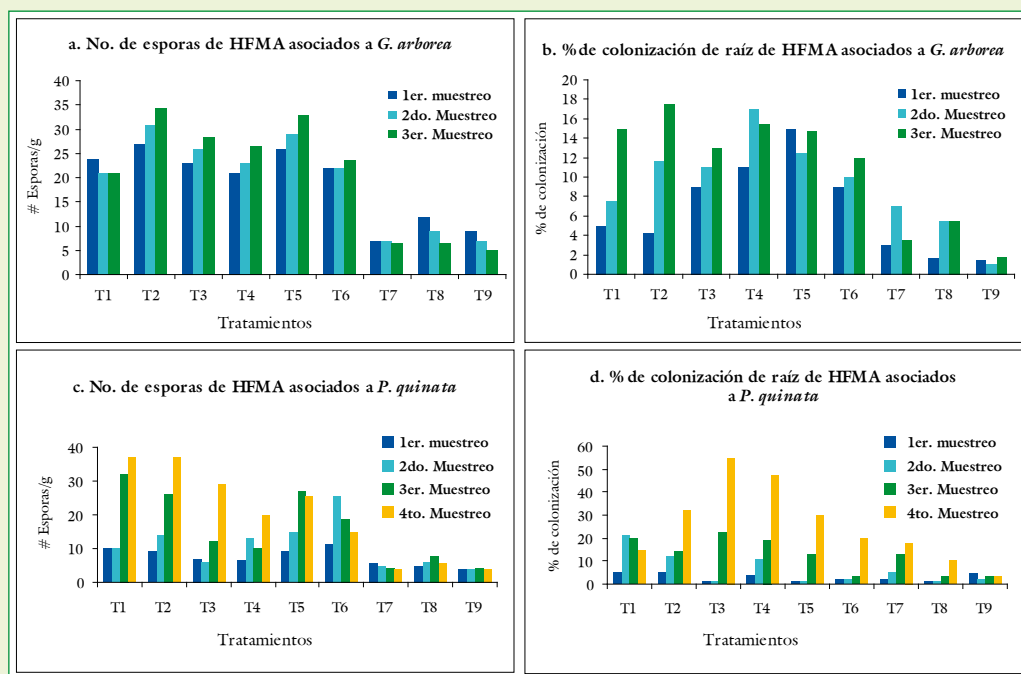


Figura 15. a. y b. Análisis de variables simbióticas en etapa de vivero con *Gmelina arborea*
c. y d. Análisis de variables simbióticas en etapa de vivero con *Pachira quinata*

Las especies forestales bajo estudio mostraron un comportamiento diferencial en cuanto a su capacidad de supervivencia. Mientras *P. quinata* no presentó pérdidas de plantas en ningún tratamiento en condiciones de vivero,

las plantas de *G. arborea* presentaron serias dificultades de supervivencia en vivero (independientemente del tratamiento) por la alta susceptibilidad de las plantas a enfermedades como el mildew, que se incrementa por las altas temperaturas y humedad en la primera fase de multiplicación a partir de microestacas. No obstante, la multiplicación de *G. arborea* a partir de semilla sexual presenta un mayor porcentaje de supervivencia, pero permanecen pérdidas importantes a nivel de vivero (Figura 16).

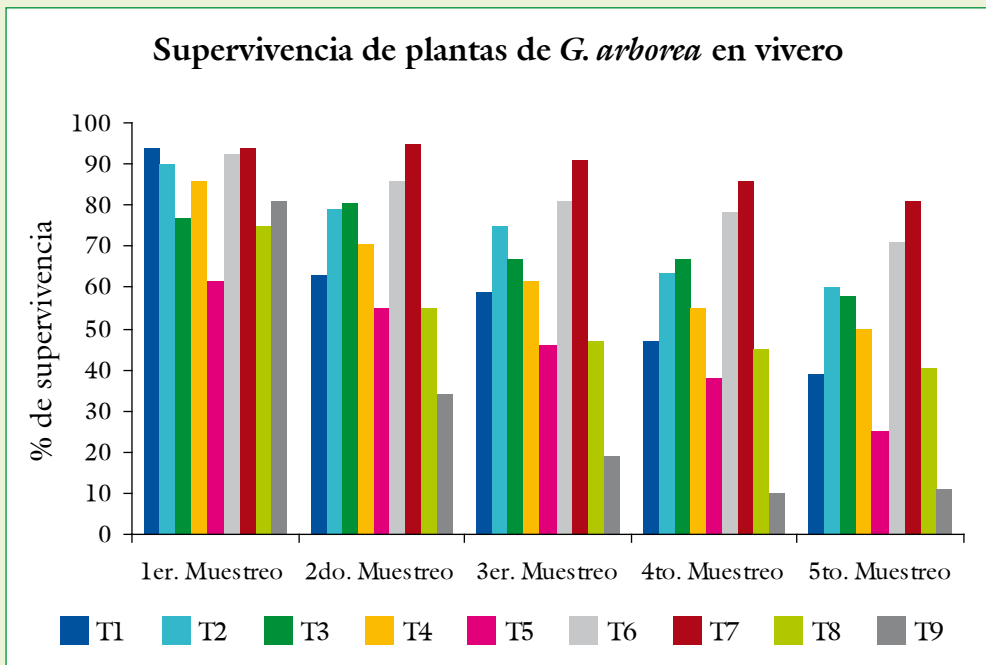


Figura 16. Porcentaje de supervivencia de plántulas de *G. arborea* en etapa de vivero

El diámetro del cuello de la raíz y la altura de la planta son las variables que permiten determinar el tiempo de trasplante al sitio definitivo de las plantas. En ambos casos, tanto en *P. quinata* como en *G. arborea* la diferencia más importante se evidenció en el tiempo que tardaron las plantas en alcanzar el diámetro del cuello de la raíz y la altura para el trasplante. En general, las plantas micorrizadas alcanzaron los valores adecuados cerca de un mes antes que los testigos con fertilización química (Figura 17).

En la Figura 18 se presenta un conjunto de fotografías donde se pueden observar las diferencias en el desarrollo de las plantas entre los tratamientos inoculados (T1 a T6) y el testigo, con el 100% de fertilización química (T9) de *Gmelina arborea*.

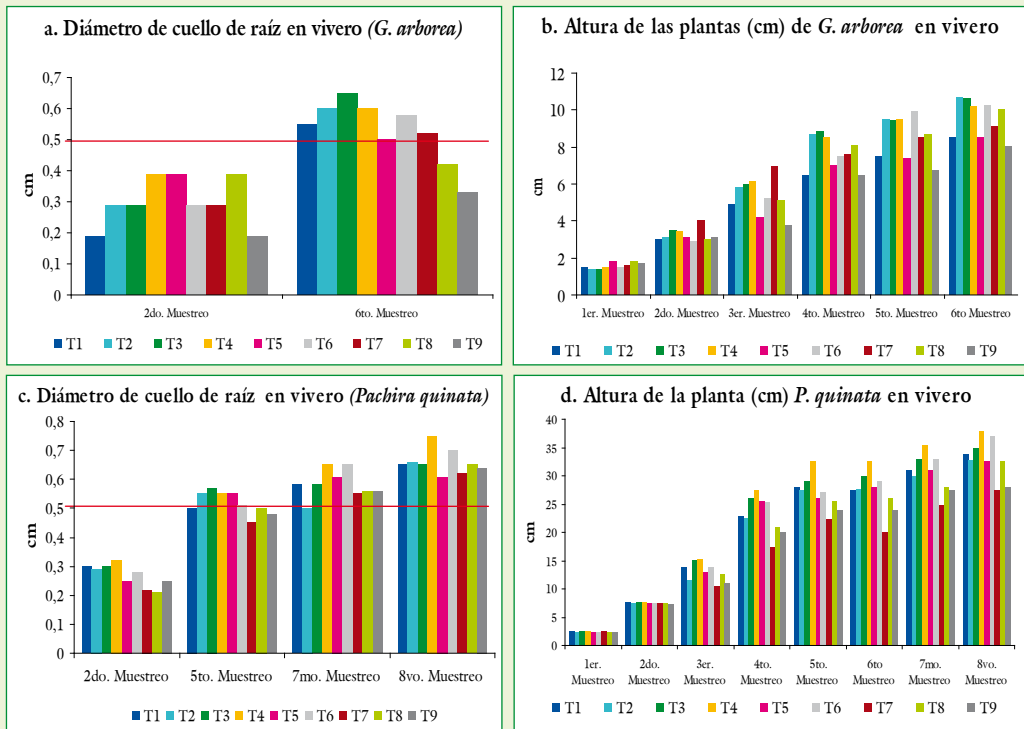


Figura 17. Variables agronómicas evaluadas en etapa de vivero
a. y c. Diámetro del cuello de la raíz de *G. arborea* y *P. quinata* respectivamente
b. y d. Altura de la planta de *G. arborea* y *P. quinata* respectivamente

En términos generales, el análisis de las variables simbióticas y agronómicas evaluadas durante la etapa de vivero permitió seleccionar los aislamientos de HFMA más eficientes en esta etapa para ser evaluados en campo. Así pues, las respuestas obtenidas en los ensayos de *G. arborea* a partir de microestacas o de semilla permitieron seleccionar las cepas 1 (*Glomus*), 2 (*Glomus* y *Acaulospora*) y 5 (*Glomus*, *Acaulospora* y *Entrophospora*) (T1, T2 y T5) como las más promisorias, ya que aunque se presentaron algunas diferencias en respuesta –posiblemente debidas al efecto del genotipo de la planta– el resultado global de respuesta fue similar en todos los casos. Para el caso de *P.*

quinata, los resultados obtenidos reflejan una mayor eficiencia de los aislamientos 2 (*Glomus* y *Acaulospora*), 3 (*Glomus*, *Acaulospora* y *Scutellospora*), 4 (*Glomus*, *Gigaspora*) y Mycobiol® (T2, T3, T4 y T6).

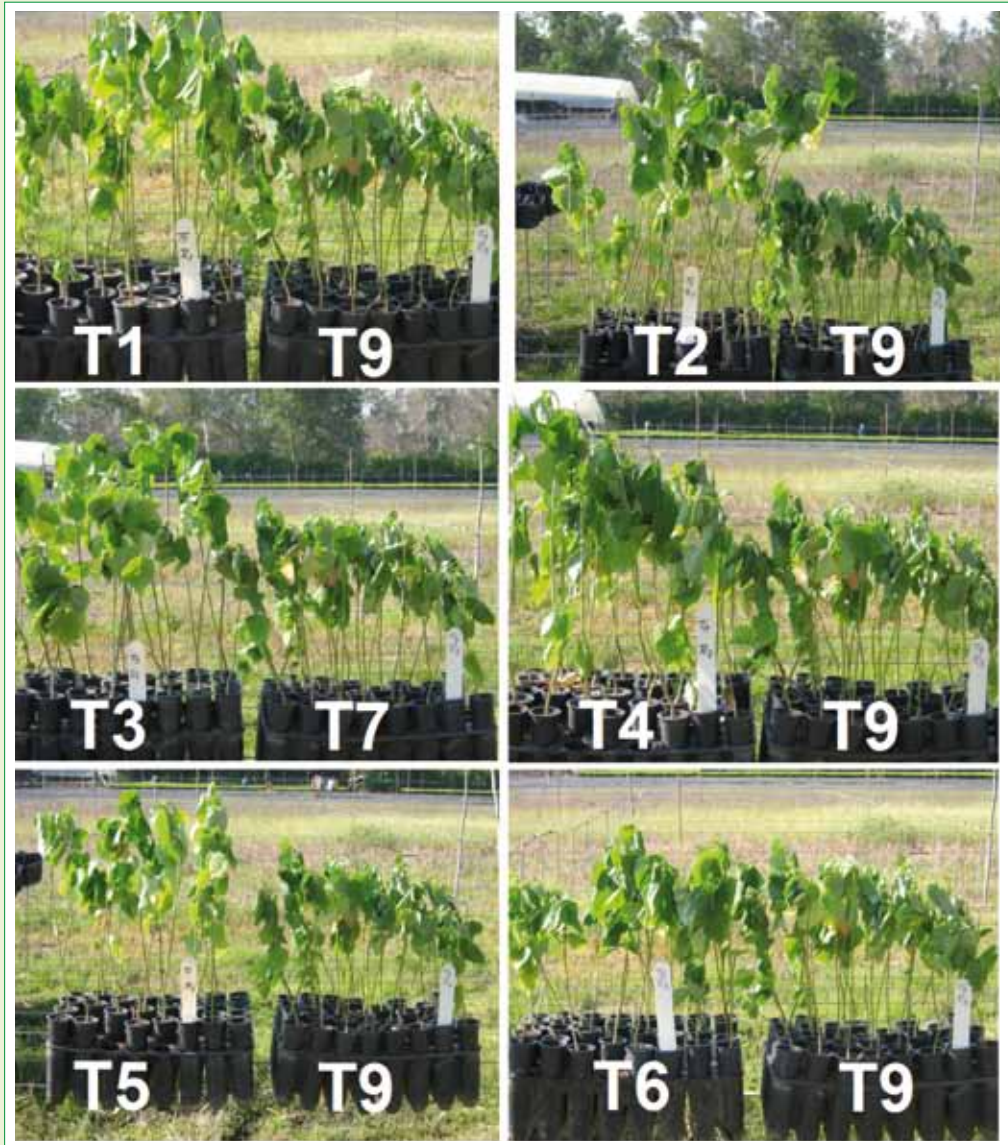


Figura 18. Diferencias entre los tratamientos inoculados con HFMA y los testigos en relación con el desarrollo de las plantas de Gmelina arborea en el momento previo al trasplante a campo. (T1= Glomus; T2= Glomus, Acaulospora; T3= Glomus, Acaulospora y Scutellospora; T4=Glomus, Gigaspora; T5= Glomus, Acaulospora, Scutellospora; T6= Mycobiol®, T7= 10% fertilización química; T8= 50% de fertilización química y T9= 100% fertilización química).

DOSIS Y FORMAS DE APLICACIÓN DE HFMA EN VIVERO Y CAMPO

Para el manejo de las tecnologías de biofertilización es necesario determinar la dosis y forma de aplicación de los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA), de forma tal que se obtengan los mayores beneficios de la asociación simbiótica. Este proyecto de investigación contempló las diversas fases para el desarrollo de un producto tecnológico y su aplicación en sistemas forestales. Es así como las fases consideradas incluyeron desde el aislamiento de microorganismos de HFMA con potencial como biofertilizantes, adaptados a los diversos ecosistemas de la región Caribe, hasta la multiplicación de estos endosimbiontes para la evaluación de la interacción planta-hongo-ambiente buscando optimizar la mejor interacción simbiótica en términos de beneficios expresados en la planta.

Finalmente, una vez identificada la mejor asociación simbiótica para cada una de las especies forestales evaluadas, fue necesario determinar la dosis y forma de aplicación de los HFMA para 3 diferentes condiciones, para lo cual se estableció en campo un ensayo en el Caribe (E. E. Monterrey Forestal-PIZANO, ubicada en Zambrano-Bolívar), otro en la región del Caribe seco (E. E. Caribia, ubicada en Sevilla-Magdalena) y un tercero en Caribe húmedo (C. I. Turipaná, ubicado en Cereté-Córdoba).

Para lograr esto se establecieron diferentes ensayos a nivel de vivero y campo. Los tratamientos utilizados en cada caso se presentan en la Tabla 3. A nivel de vivero se tomaron dos aislamientos promisorios de HFMA, seleccionados en ensayos previos en condiciones de vivero y para cada una de las especies bajo estudio; a su vez estos tratamientos fueron inoculados con el 50% de la fertilización convencional. Es importante resaltar que todos los ensayos, tanto en campo como en invernadero, se realizaron de acuerdo con las prácticas de manejo utilizadas por PIZANO y Monterrey Forestal. Sumado a lo anterior, se tuvieron en cuenta resultados de investigaciones obtenidos en diferentes proyectos desarrollados por investigadores de CORPOICA, relacionadas con prácticas de manejo de los suelos y manejo nutricional en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* y *Pachira quinata*.

La evaluación en campo consistió básicamente en dos formas de aplicación del inoculante de HFMA: un tratamiento donde se inoculó únicamente en vivero y otro donde además de la inoculación en vivero se reinoculó en el

momento del trasplante a campo para cada una de las especies bajo estudio y para dos aislamientos promisorios de HFMA. Los ensayos, como se mencionó anteriormente, fueron establecidos en tres localidades con condiciones medioambientales contrastantes en parcelas de 25 x 25 m, con un diseño de BCA y tres repeticiones.

Tabla 3. Descripción de los tratamientos establecidos para la determinación de la forma y dosis de aplicación en vivero y campo.

	TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN	FERTILIZACIÓN
VIVERO	T1	Cepa 1 (5 gramos) (seleccionada en vivero de acuerdo a la especie).	N = 0.05; P ₂ O ₅ = 0.15; K ₂ O = 0.1 g/planta
	T2	Cepa 1 (15 gramos) (seleccionada en vivero de acuerdo a la especie).	
	T3	Cepa 1 (25 gramos) (seleccionada en vivero de acuerdo a la especie).	
	T4	Cepa 2 (5 gramos) (seleccionada en vivero de acuerdo a la especie).	
	T5	Cepa 2 (15 gramos) (seleccionada en vivero de acuerdo a la especie).	
	T6	Cepa 2 (25 gramos) (seleccionada en vivero de acuerdo a la especie).	
	T7	Testigo con el 100% de fertilización	N = 0.1; P ₂ O ₅ = 0.3; K ₂ O = 0.1 g/planta
	T8	Testigo con el 50% de fertilización	N = 0.05; P ₂ O ₅ = 0.15; K ₂ O = 0.1 g/planta
CAMPO	T1	Cepa 1 (inoculación únicamente en vivero).	N = 0.05; P ₂ O ₅ = 0.15; K ₂ O = 0.1 g/planta
	T2	Cepa 1 (inoculación en vivero y reinoculación en el momento del trasplante).	
	T3	Cepa 2 (inoculación únicamente en vivero)	
	T4	Cepa 2 (inoculación en vivero y reinoculación en el momento del trasplante).	
	T5	Testigo con el 50% de la fertilización	N = 0.05; P ₂ O ₅ = 0.15; K ₂ O = 0.1 g/planta
	T6	Testigo con el 100% de fertilización	N = 0.1; P ₂ O ₅ = 0.3; K ₂ O = 0.1 g/planta

VIVERO

En las figuras 19 y 20 se presentan los resultados obtenidos para cada una de las variables evaluadas a nivel de vivero en *Gmelina arborea* y *Pachira quinata* respectivamente. Es primordial anotar que las plantas de *Gmelina* presentaron dificultades de establecimiento en etapa de vivero, y aunque algunos tratamientos alcanzaron altos niveles de supervivencia, otros no alcanzaron a culminar esta etapa, por cuanto hubo la necesidad de repetir este ensayo utilizando semilla sexual.

En términos generales, los ensayos a nivel de vivero permitieron concluir que el establecimiento de la simbiosis fue adecuado en las dos especies forestales evaluadas. El número de esporas y los porcentajes de colonización guardaron relación con la dosis aplicada de inoculante, encontrándose en general un incremento en estos parámetros al aumentar las dosis.

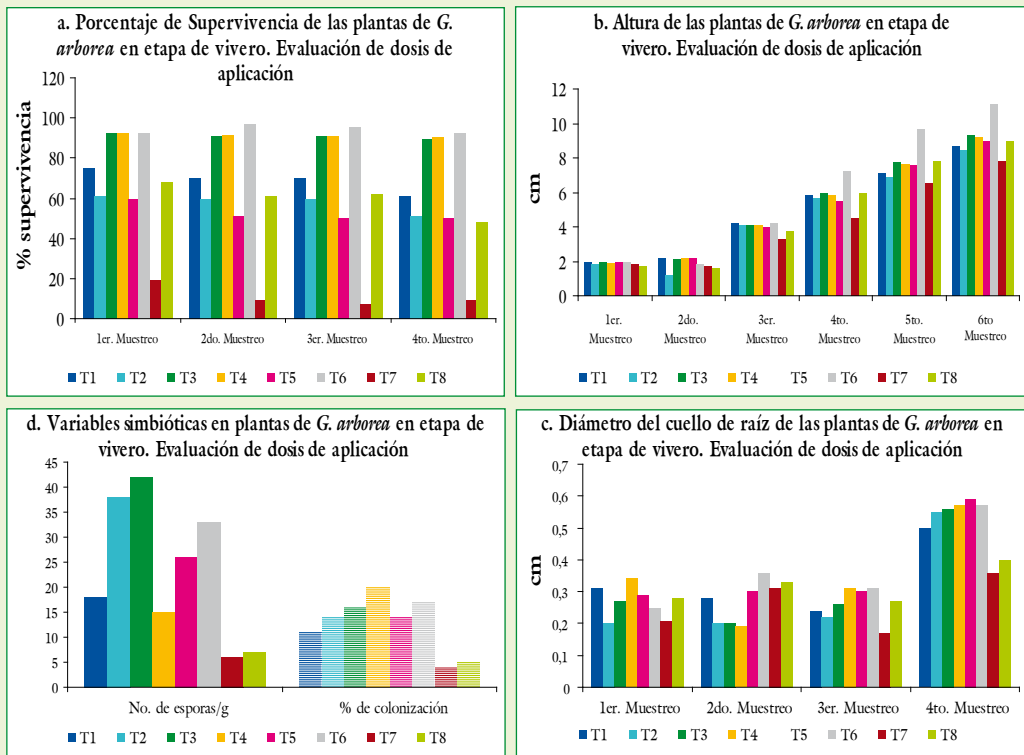


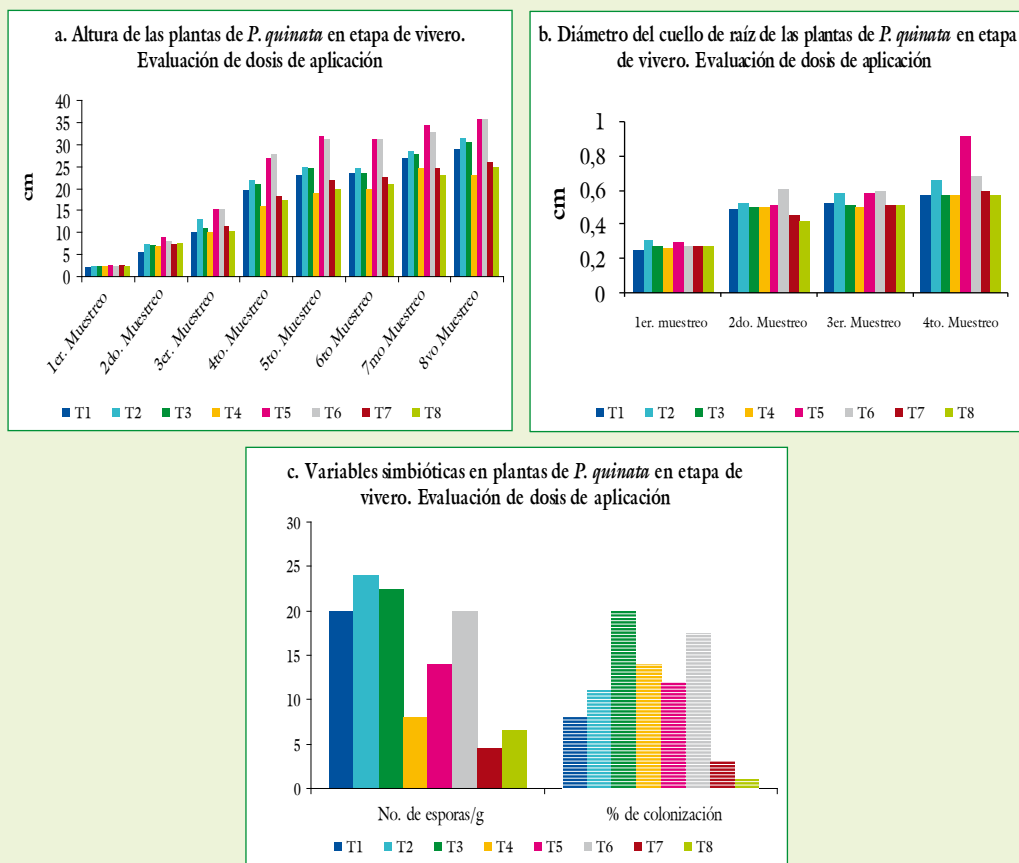
Figura 19. Variables simbióticas y agronómicas evaluadas a nivel de vivero para determinar dosis de aplicación en plantas de *Gmelina arborea*.

a. Porcentaje de supervivencia de las plantas (%)

b. Altura de las plantas (cm)

c. Diámetro del cuello de la raíz (cm)

d. Número de esporas por gramo de suelo (esporas/g) y porcentaje de colonización de la raíz (%)



*Figura 20. Variables simbióticas y agronómicas evaluadas a nivel de vivero para determinar dosis de aplicación en plantas de *P. quinata*.*

a. Altura de las plantas (cm).

b. Diámetro del cuello de la raíz (cm).

c. Número de esporas por gramo de suelo (esporas/g de suelo) y porcentaje de colonización de la raíz (%).

De forma general, los ensayos en vivero permitieron establecer que el proceso de infección y esporulación del hongo se implantó de forma adecuada en las dos especies forestales bajo estudio, encontrando que los valores obtenidos para cada una de las variables simbióticas analizadas (# de esporas/g y % de colonización) guardaron relación con la dosis aplicada de inoculante, mostrando un incremento al aumentar la dosis; así mismo, en todos los casos estos valores fueron superiores con respecto a los testigos.

En el caso de *G. arborea* (Figura 17), se pudo observar que la aplicación de 5 g de inoculante (tratamientos 1 y 4) produce resultados similares o su-

periores a los demás tratamientos y a los testigos, tanto en el diámetro del cuello de la raíz como en la altura de la planta, con excepción de la dosis de 25 g que produce un incremento en la altura de la planta (T6). En el caso de *P. quinata*, las diferencias entre tratamientos no permiten establecer desigualdades entre los distintos tratamientos inoculados, aunque sí de estos con los testigos. Así pues en los dos casos, tanto para *G. melina* como para *P. quinata*, las variables analizadas de crecimiento y desarrollo de las plantas no presentaron diferencias importantes entre los distintos tratamientos, por lo que se consideró pertinente continuar con la dosis de 5 gramos por planta en los experimentos por facilidad de manejo y costos de inoculante.

Los experimentos dieron paso para establecer el importante efecto que tiene la asociación de HFMA con las especies forestales bajo estudio, reflejado esencialmente en que en los dos casos, tanto para *G. arborea* como para *P. quinata*, se requiere aproximadamente un mes menos para alcanzar las condiciones óptimas de trasplante a campo (0.5 cm de diámetro del cuello de la raíz) en relación con las plantas fertilizadas químicamente. Estos resultados son importantes, ya que permiten una reducción de los costos en vivero así como una mayor flexibilidad al productor forestal para la proyección de siembras en áreas donde los limitantes ambientales –especialmente la disponibilidad de recurso hídrico– reducen los tiempos óptimos de siembra en campo.

En consecuencia, se seleccionaron de acuerdo a los resultados obtenidos dos cepas de HFMA para cada especie y cada localidad. En la Tabla 4 se presenta una descripción de los aislamientos seleccionados.

Tabla 4. Cepas o aislamientos seleccionados en vivero por el desarrollo de las plantas para ser trasplantadas a campo.

LOCALIDAD	ESPECIE	CEPAS O AISLAMIENTOS *
E. E. Caribia	<i>Pachira quinata</i>	Cepas 4 y 5
	<i>Gmelina arborea</i>	Cepas 2 y 4
C. I. Turipaná	<i>Pachira quinata</i>	Cepas 3 y 5
	<i>Gmelina arborea</i>	Cepas 2 y 3
E. E. Monterrey Forestal	<i>Pachira quinata</i>	Cepas 4 y 5
	<i>Gmelina arborea</i>	Cepas 2 y 5

* Las cepas o aislamientos fueron seleccionadas por presentar un mejor comportamiento en el desarrollo de las plantas de acuerdo con el análisis de las variables agronómicas y simbióticas. La descripción de cada una de las cepas se encuentra en la Tabla 1

En la Figura 21 se presentan fotografías de cada uno de los tratamientos evaluados. En ellas se pueden observar las diferencias en cuanto al desarrollo de las plantas presentadas a nivel de vivero; en este caso se presentan, a manera de ejemplo, algunas plantas de *Pachira quinata*.

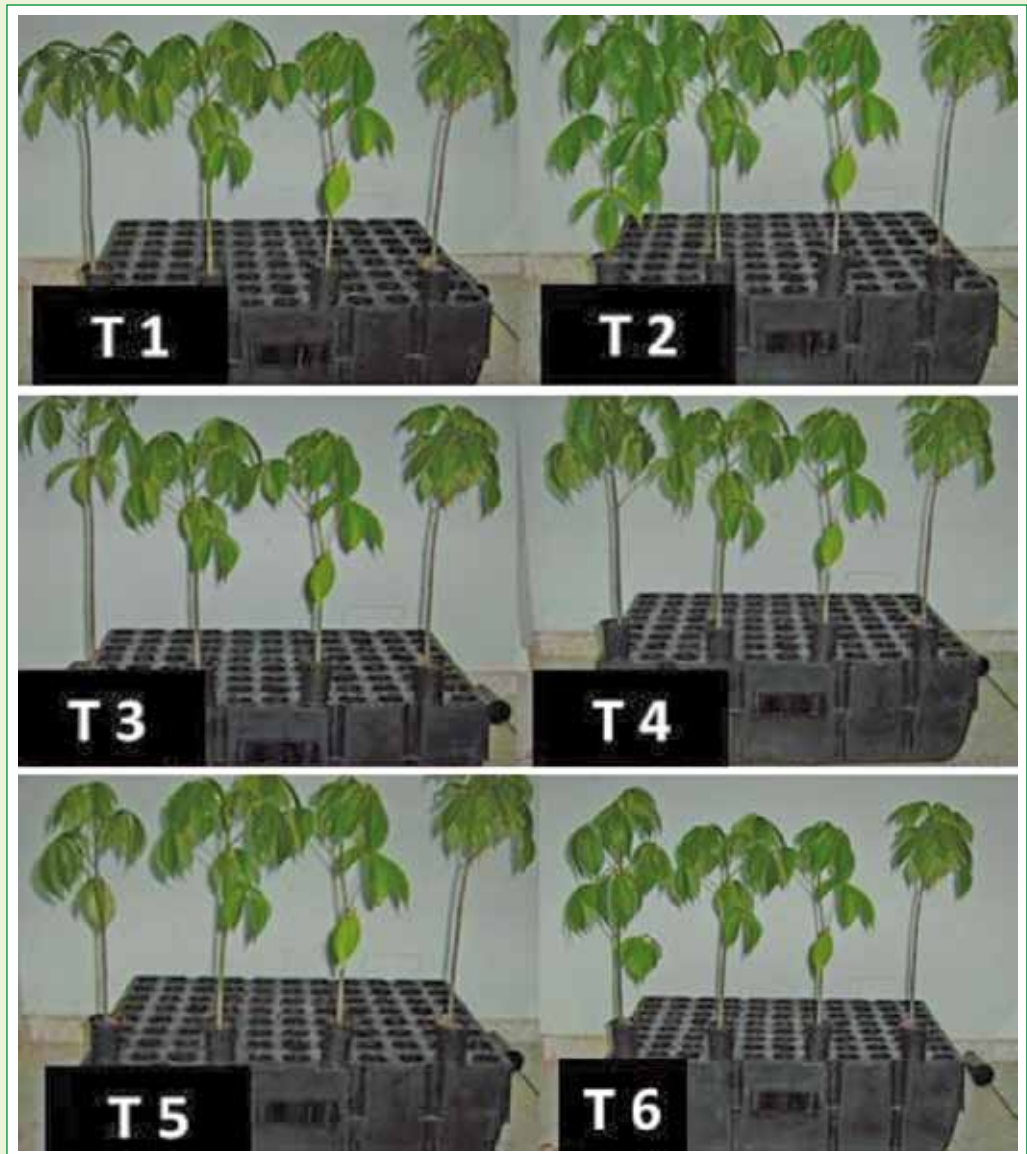


Figura 21. Diferencias entre los variados tratamientos establecidos en vivero (*Pachira quinata*)

TRASPLANTE A CAMPO

El trasplante a campo se realizó de acuerdo con las características de cada una de las localidades. En todos los casos se preparó el terreno, se ahoyó, se enterraron los hidrotenedores, se inoculó de acuerdo a los tratamientos y para terminar se sembraron las plántulas. El diseño experimental en las tres localidades fue de Bloques Completos al Azar, con 6 tratamientos (Tabla 2) y 3 repeticiones. Las unidades experimentales variaron de acuerdo con el área disponible para cada ensayo en cada una de las localidades.

En la Figura 22 se presentan fotografías que ilustran la preparación del terreno y el trasplante a campo. Estos ensayos se llevaron a cabo en localidades del Caribe (C. I. Turipaná, E. E. Caribia y E. E. Monterrey).



Figura 22. Proceso de siembra de ensayos en campo.

a. Preparación del lote. b. Hoyado. c. Aplicación de hidrotenedores. d. Inoculación con HFMA. e. Siembra de plántulas. f. Establecimiento de ensayo

En cada uno de los ensayos se realizaron muestreos de seguimiento que permitieron evaluar el desarrollo de las plantas, para lo cual se midieron variables agronómicas tales como: altura de la planta, diámetro del cuello de la raíz, número de hojas, porcentaje de supervivencia de las plantas y tasas de crecimiento. Adicionalmente se realizó en cada ensayo un muestreo destructivo con el propósito de determinar la concentración de nutrientes en el tejido foliar y el comportamiento de las variables simbióticas (esporas/g y % de colonización). Dichas variables fueron analizadas estadísticamente con la prueba de comparación de rangos múltiples de Duncan ($p < 0.05$).

En términos generales, los resultados obtenidos para las dos especies bajo estudio permiten concluir que tanto *P. quinata* como *G. arborea* presentaron una buena capacidad para asociarse con los diferentes aislamientos de HFMA evaluados en cada localidad. En cuanto a las variables simbióticas, en todos los casos los valores obtenidos fueron superiores a los de los testigos.

La Tabla 5 presenta de forma general los tratamientos y las cepas seleccionadas en cada uno de los casos, de acuerdo con las variables de crecimiento, desarrollo, supervivencia y simbóticas analizadas.

Tabla 5. Cepas o aislamientos seleccionados por su mejor respuesta a la inoculación con HFMA.

LOCALIDAD	ESPECIE	TRATAMIENTO *
CARIBE SECO (Sevilla, Magdalena) E. E. Caribia	<i>Pachira quinata</i>	T4, Cepa 5 de HFMA aplicada tanto en vivero como en el momento del trasplante (Cepa 5C)
	<i>Gmelina arborea</i>	T2, Cepa 2 de HFMA aplicada tanto en vivero como en el momento del trasplante (Cepa 2C)
CARIBE HÚMEDO (Cereté, Córdoba) C. I. Turipaná	<i>Pachira quinata</i>	T2, Cepa 3 de HFMA aplicada tanto en vivero como en el momento del trasplante (Cepa 3C)
	<i>Gmelina arborea</i>	T1, Cepa 2 aplicada en vivero (Cepa 2)
CARIBE SECO (Zambrano, Bolívar) E. E. Monterrey Forestal	<i>Pachira quinata</i>	T1, Cepa 4 aplicada en vivero (Cepa 4)
	<i>Gmelina arborea</i>	T3, Cepa 5 aplicada en vivero (Cepa 5).

* Tratamiento seleccionado para cada una de las localidades por presentar el mejor comportamiento en cuanto a las respuestas dadas por el efecto del uso de la tecnología de biofertilización con HFMA en el desarrollo de las plantas. Las descripciones de cada una de las cepas corresponden a las establecidas en la Tabla 1.

Por otro lado, en la Figura 23 se presentan fotografías que muestran los ensayos ya establecidos en campo y el desarrollo de los mismos. Aquí se presentan, a manera de ejemplo, los experimentos establecidos en el C. I. Turipaná y E. E. Caribia con *Pachira quinata*.

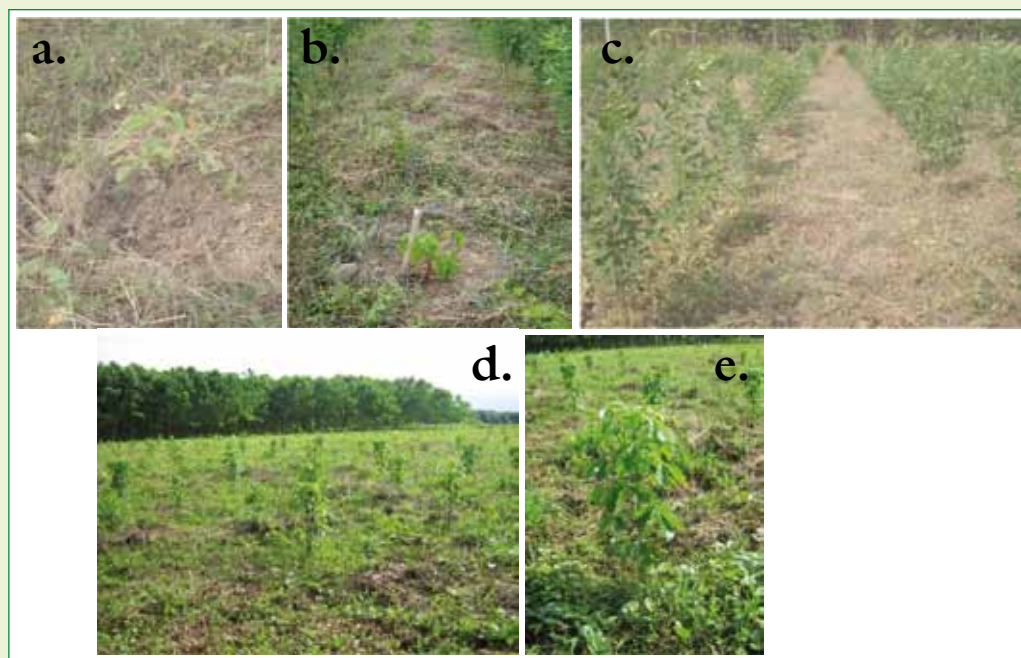


Figura 23. a., b. y c. Ensayos establecidos en C. I. Turipaná.
d. y e. Ensayos en E. E. Caribia.

Así mismo, en la Figura 24 se presenta un conjunto de fotografías que muestra la respuesta de las plantas de *Gmelina arborea* a la inoculación con HFMA en el C. I. Turipaná.

Es fundamental resaltar que el tiempo de duración del proyecto no es suficiente para hacer todas las mediciones hasta el establecimiento definitivo de las plantas (adaptación total a las condiciones de campo) y rendimiento del cultivo, razón por la que estas son solo las primeras aproximaciones para determinar la eficiencia de la asociación de HFMA de las mencionadas especies forestales para el rendimiento del cultivo, que se ve reflejado no solamente en un beneficio económico para los productores sino en una serie de ventajas de tipo ambiental, como la conservación de la diversidad y la recuperación y

conservación de suelos por la disminución en la aplicación de fertilizantes de síntesis. En el capítulo siguiente se analizará de forma detallada todo el componente económico del uso de la tecnología de biofertilización con HFMA.

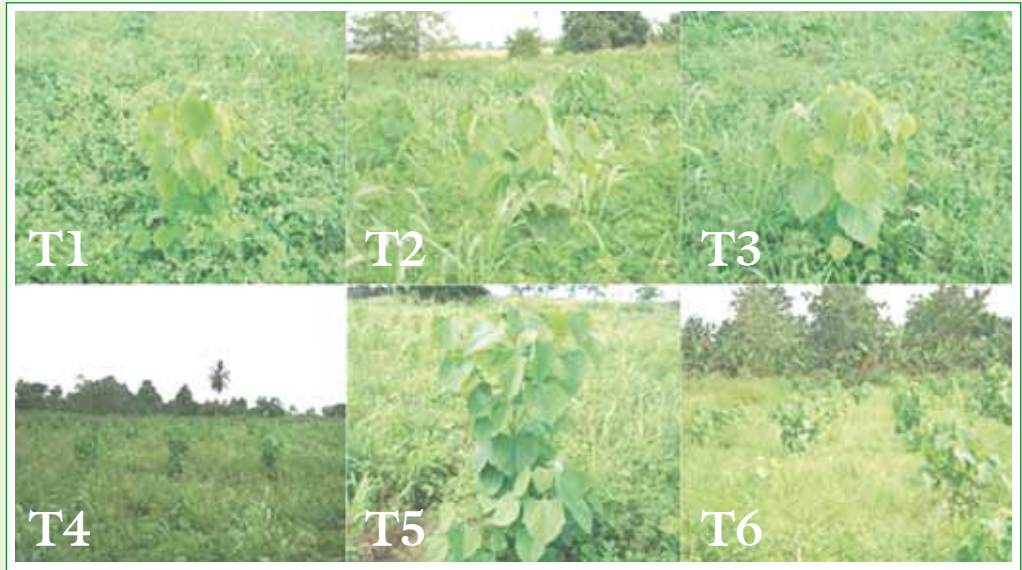


Figura 24. Respuesta de las plantas de G. arborea a la inoculación con HFMA en condiciones de campo en el C. I. Turipaná.

Capítulo IV

ANÁLISIS ECONÓMICO DEL USO DE LA TECNOLOGÍA DE BIOFERTILIZACIÓN CON HFMA EN CULTIVOS FORESTALES DE *G. ARBOREA* Y *P. QUINATA*.

Margarita Ramírez G.
Braulio Gutiérrez

El análisis económico del uso de la tecnología de biofertilización con Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares en las primeras fases de crecimiento de plantas de *Gmelina arborea* y *Pachira quinata* constituyen una herramienta de gran importancia para el desarrollo de los cultivos forestales, puesto que le permite a los productores conocer con claridad los beneficios asociados a la tecnología o innovación que se pretende implementar en su proceso productivo.

Este proceso de análisis económico permitió corroborar que el uso de tecnologías de inoculación con HFMA no solo produce una serie de beneficios biológicos que se reflejan en el crecimiento, desarrollo y supervivencia de las plántulas de *G. arborea* y *P. quinata*, sino que además esta tecnología tiene también un impacto que se refleja en la reducción de costos en las primeras fases del sistema forestal productivo.

Así pues, para completar la evaluación de la inoculación con HFMA, este proyecto contempló un análisis económico de la tecnología (el cual pretende definir claramente las ventajas en términos económicos del uso de dicha tecnología), que consistió básicamente en un análisis económico incremental partiendo del establecimiento de los costos de producción a nivel de vivero que fueron calculados considerando los costos de producción de plántulas en la Estación Experimental Monterrey Forestal de PIZANO, ya que la totalidad de las plántulas fueron producidas en este vivero. Dentro de estos

costos se incluyó, aparte de de la mano de obra no calificada y asistencia técnica y administrativa requerida para el plantulaje, el costo de los materiales e insumos (semillas, soportes, fertilizantes, inoculante de HFMA y riego, entre otros).

En la Tabla 6 se muestra un resumen de los costos de producción de plántulas de *P. quinata* y *G. arborea* en etapa de vivero, así como el tiempo de permanencia de las plantas en esta etapa.

Tabla 6. Costos de producción de plántulas de las dos especies forestales bajo estudio para los diferentes tratamientos

ESPECIE	TRATAMIENTOS	COSTOS VARIABLES ¹	TIEMPO EN VIVERO (días)	COSTOS FIJOS ²	COSTO TOTAL POR PLÁNTULA	% DEL COSTO
<i>P. quinata</i>	Inoculados con HFMA (T1 a T6)	147.65	58	100.94	248.59	81.11%
	100% F.Q. ³	144.15	95	165.34	309.49	100.98%
	50% F.Q. ³	142.65	95	165.34	307.99	100.49%
	0% F.Q. ³	141.15	95	165.34	306.49	100%
<i>G. arborea</i>	Inoculados con HFMA (T1 a T6)	147.65	112	194.93	342.58	81.06%
	100% F.Q. ³	144.15	160	278.47	422.62	114.02%
	50% F.Q. ³	142.65	131	227.99	370.64	103.33%
	0% F.Q. ³	141.15	125	217.55	354.70	100.00%

¹Insumos, materiales y mano de obra

²Administración y asistencia técnica

³Fertilización química convencional

De acuerdo con la información obtenida de costos, se puede observar que inicialmente estos se ven incrementados por el uso de insumos adicionales (inoculantes) con respecto al testigo absoluto; sin embargo, este incremento se ve compensado por los beneficios que genera el uso de HFMA debido a la reducción en el tiempo de permanencia de las plántulas en vivero, reducción que es cercana al 20%.

Teniendo en cuenta que un módulo productivo en un vivero es de 1.500.000 plántulas en ciclos de 120 días, tiempo definido por el lapso en que se tardan las plantas en alcanzar las condiciones óptimas para el trasplante (5 mm

en diámetro del cuello de la raíz), si se produjeran plántulas de ceiba con inoculantes de tipo biológico como los HFMA, se podría incrementar el número de ciclos productivos al año por efecto de la reducción de 37 días en alcanzar las condiciones para el trasplante, con lo que se aumentaría la oferta en la producción de plántulas en un 63.8%. Para el caso de *P. quinata*, por ejemplo, la oferta pasa de 2.8 millones/año a 4.7 millones/año.

En términos generales y teniendo en cuenta que para sembrar una hectárea se requieren 1.100 plántulas y que el ciclo total de la producción forestal es de 24 años, este análisis determinó que los costos en las primeras fases de desarrollo del cultivo (vivero y trasplante a campo) con el uso de la tecnología de biofertilización con HFMA se reducen de acuerdo con los valores que se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Reducción de costos por hectárea en plantaciones de G. arborea y P. quinata con el uso de la tecnología de biofertilización con HFMA.

Especie	Costo plántulas/ha			Costo de establecimiento/año			Costo total en el ciclo productivo		
	Testigo	Inoculadas con HFMA	% de reducción	Testigo	Inoculadas con HFMA	% de reducción	Testigo	Inoculadas con HFMA	% de reducción
<i>P. quinata</i>	402.500	273.454	32.1	1.650.000	1.520.000	7.8	8.300.000	8.170.954	1.6
<i>G. arborea</i>	402.500	376.834	6.4	1.260.000	1.234.334	2.0	6.000.000	5.954.334	0.4

Otro factor asociado a los beneficios generados por el uso de la tecnología de biofertilización con HFMA está relacionado con la supervivencia de las plantas en la etapa de trasplante, pues en todos los casos para las dos especies bajo estudio, la supervivencia de las plantas inoculadas fue superior al testigo con el 100% de fertilización, lo que reduce los gastos generados por resiembra.

Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados obtenidos de este trabajo de investigación proporcionan información provechosa para el sector forestal, dado que no solo contribuyen con el fortalecimiento del mismo sino que se convierten en una herramienta útil para el establecimiento de estos cultivos en las primeras etapas de desarrollo. Así pues, estos resultados reflejan la capacidad de las especies bajo estudio para establecer asociaciones simbióticas con microorganismos del suelo como los Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares.

Después de hacer un muestreo exhaustivo para observar el establecimiento natural de la simbiosis entre plantas de ceiba y teca y HFMA, se pudo establecer que estas dos especies presentan una gran capacidad para asociarse con estos microorganismos. Los resultados obtenidos permitieron conocer la alta riqueza de especies de HFMA, así como su alta adaptación a las variadas condiciones del Caribe colombiano, encontrándose tanto en climas secos con suelos predominantemente arenosos, como en climas húmedos con suelos arcillosos. Estos resultados son de considerable valor, ya que no se tenía información acerca de la diversidad existente de HFMA en estos suelos, ni tampoco sobre si las especies forestales bajo estudio eran capaces de asociarse en forma natural con estos microorganismos.

Y aunque de forma natural se pudo comprobar la capacidad de asociación de las especies forestales con HFMA, la investigación realizada a nivel de vivero y campo permitió evaluar y seleccionar los mejores aislamientos nativos de HFMA para cada una de las especies bajo estudio. Estos resultados muestran cómo la inoculación con HFMA es una alternativa viable, tanto económica como ambientalmente, ya que el establecimiento de la simbiosis en las primeras etapas de desarrollo del cultivo (simultáneamente con la siembra de las especies en vivero) favorece la supervivencia de las plantas en etapa de vivero y en el momento del trasplante, debido principalmente a que esta asociación permite una mejor nutrición, con lo cual se obtienen plantas más vigorosas, capaces de soportar situaciones de estrés como altas temperaturas o sequías, entre otras.

Como se puede observar a lo largo del presente documento, esta tecnología de biofertilización de plantas de ceiba y teca con HFMA posibilita a los productores no solo a ahorrar recursos económicos por la disminución en el uso de fertilizantes de síntesis química –que se refleja en reducción de costos de producción– sino que proporciona una mayor flexibilidad en las fechas de trasplante, ya que permite hacerlo aproximadamente un mes antes del tiempo que se tardaban en hacerlo sin la inoculación previa con HFMA; todo esto sin contar con la supervivencia de las plantas tanto en etapa de plantulaje en vivero como en el momento del trasplante a campo, lo cual se refleja en menores costos de resiembra con respecto a las plantas tratadas de forma tradicional.

El uso de HFMA como biofertilizante para estas especies forestales no solamente es una estrategia rentable para los productores; también es de fácil adaptación a cualquier tipo de sistema de producción de plántulas.

Este estudio permitió determinar las dosis y la forma de aplicación del inóculo según el área de estudio y según la especie; en resumen, las recomendaciones son las siguientes:

- Para el **Caribe seco (Magdalena)**. Tanto para teca como para ceiba la inoculación debe realizarse en razón de 5 gramos por planta, y debe hacerse tanto en la etapa de plantulaje (vivero) como en el momento del trasplante a campo.
- Para el **Caribe húmedo (Córdoba)**. La inoculación se debe hacer también en razón de 5 gramos por planta; para el caso de *Pachira quinata* se debe hacer solamente en etapa de vivero y para *Gmelina arborea* se debe hacer tanto en vivero como en el trasplante a campo.
- Para el **Caribe seco (Bolívar)**. La inoculación, igual que en los dos casos anteriores, se debe realizar en una dosis de 5 gramos por planta. Por el contrario, la reinoculación no se debe hacer en ninguno de los dos casos, ni para teca ni para ceiba en campo.

Dado que los inóculos que se evaluaron durante este trabajo provenían de cepas nativas de HFMA aisladas de suelos del Caribe, es importante que el productor conozca que existen en el mercado biofertilizantes comerciales con base en HFMA que pueden ser utilizados como inóculos. No obstante, se debe aclarar que es necesario tener en cuenta la calidad de los productos,

ya que las recomendaciones establecidas en este estudio se basan en inóculos que contengan 60 ± 10 esporas por gramo. Así mismo se recomienda que el inóculo seleccionado contenga al menos cepas pertenecientes a los géneros *Glomus* y *Acaulospora*.

La forma de aplicación de este tipo de inóculos es bastante sencilla: se realiza en el momento de la siembra aplicando la cantidad necesaria junto a la semilla, estaca o demás tipos de material de propagación de especies forestales. Cuando la inoculación se va a hacer en una planta ya germinada, se debe aplicar el inóculo lo más próximo a la raíz que sea posible.

Este trabajo no es únicamente una contribución para el sector forestal en términos de competitividad; adicionalmente constituye la plataforma para establecer la necesidad de formular productos específicos para cada especie y para cada región, basándose en microorganismos nativos y asociados de forma natural con la especie bajo estudio.

Bibliografía relacionada

Alexander, I.; Ahmad, N. and See, L. S. (1992). The role of micorrizas in the regeneration of some Malaysian forest trees. *Phil. Trans. Of the Royal Society of London Series B* 335: 379-388.

Alvarado, A. (2005). Características edáficas y presencia de micorrizas en plantaciones de teca (*Tectonia grandis* L) en Costa Rica. San José: Universidad de Costa Rica. *Revista Agronomía Costarricense*. Vol. 28 N° 1.

Bethlenfalvay, G. J. (1992). Mycorrhizae and crop productivity. In: Bethlenfalvay, G. J.; Linderman, R. G. (ed) *Mycorrhizae in sustainable agriculture*. Am Soc. Agron, pp. 1-27.

Bonfante, P. and Genre, A. (2008). Plants and arbuscular mycorrhizal fungi: an evolutionary-developmental perspective. *Trends in Plant Science* Vol.13 N° 9.

CORPOICA. (2003). Manual de Procedimientos Técnicos Planta de Producción de Micorrizas. Programa Recursos Biofísicos.

CORPOICA. (2006). Manual. Laboratorio de Control de Calidad de Micorrizas. Programa Nacional de Recursos Biofísicos.

Espinel, C. F.; Martínez, H. J. y González, E. D. (2005). Características y estructura del sector Forestal –Madera-Muebles en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005. En: página web agrocadena forestal.

FAO. (1997). Situación de los bosques del mundo. En: www.fao.org

Gadea, P. C. (2004). Respuesta de cinco especies forestales en etapa de vivero al tratamiento con Micorrizas arbusculares. Universidad EARTA-Instituto nacional Agricultura, Cuba.

Gadkar, V.; Schwartz, R.; Kunik, T. and Kapulnik, Y. (2001). Arbuscular Mycorrhizal Fungal Colonization. Factors Involved in Host Recognition. *Plant Physiology*, Vol. 127, pp. 1493–1499.

Gerdemann, J. W. & Nicolson, T. H. (1963). Spores of mycorrhizal Endogone species, extracted from soil by wet-sieving and decanting. In: *Transactions of the British Mycological Society*. Vol. 46, p. 235-244.

Gianinazzi-Pearson, V. and Gianinazzi, S. (1983). The physiology of vesiculo arbuscular mycorrhizal roots. *Plant and Soil* 71: 197-209

Godbold, D. L. and Sharrock, L. (2003). Mycorrhizas. In: *Trees, Crops and Soil Fertility. Concepts and Research Methods*. Schroth, G. and Sinclair, F. L. (Ed). Cambridge, U. K.: CABI Publishing. Chapter 14, pp. 271-287.

Harley, J. L. and Smith, S. E. (1983). *Mycorrhizal Symbiosis*. London: Academic Press.

Habte, M.; Miyasaka, S. C. and Matsuyama, D. T. (2001). Arbuscular mycorrhizal fungi improve early forest –tree establishment. In: Horst et al. (ed). *Plant nutrition – Food security and sustainability of agro – ecosystems*. Netherlands: Kluwer Academia Publishers, pp. 644-645.

Hamel, CH. (1996). Manejo básico de la micorriza arbuscular (MA) con énfasis en suelos degradados. *Memorias Curso Taller Universidad Nacional de Colombia*. Medellín: Mayo 7-11. 96 p.

Ikram, A.; Jensen, E. S. and Jakobsen, I. (1994). No significant transfer of N and P from *Pueraria phaseoloides* to *Hevea brasiliensis* via hiphal links of arbuscular micorriza. *Soil Biology and Biochemistry* 26: 1541-1547.

INVAM. International Culture Collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi (<http://www.invam.caf.wvu.edu/>)

Janos, D. P. (1980). Mycorrhizae influence tropical succession. *Biotrópica* 12: 56-64.

Johansson, J. F.; Paul, L. R. and Finlay, R. D. (2004). Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. *FEMS Microbiol Ecol.* 48: 1-13.

Kuypert, W.; Cardoso, I.; Onguene, N. A. and van Noordwijk M. (2004). Managing Mycorrhiza in tropical Multispecies Agroecosystems. In: *Below-ground Interactions in tropical Agroecosystems: Concepts and models with Multiple Plant Components.* CABI Publishing (ICRAF). Van Noordwijk, M; Cadish, C. and Ong, C. K. (ed), pp. 243-261.

Menge, J. A. (1983). Utilization of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in agriculture. *Can. J. of Botany* 61: 1025-1024

Oberson, A. and Joner,, E. J. (2003). Microbial turnover of Phosphorus in Soil. In: *Organic Phosphorus in the Environment.* Turner, B. L.; Frossard, E. and Baldwin, D. S. (Ed) Manchester, U.K.: CABI Publishing, pp. 133-164.

Onguene, N. A. (2000). Diversity and dynamics of mycorrhizal associations in tropical rain forests with different disturbance regimens in South Cameroon. *Camerun: Tropenbos. Series 3:* 1-167.

Phillips, J. M. and Hayman D. S. (1970). Improve Procedures for clearing roots and staining parasite and vesicular arbuscular mycorrhiza fungi for rapid assessment of infection. *Trans. British Mycological Society* 55: 158-161

Prematuri, R. (1995). The role of arbuscular mycorrhizal fungi on different species of leguminous trees used in reforestation in South East Asia. *University the Kent at Canterbury, U.K.*

Prematuri, R. and Dood, J. C. (1997). The effect of arbuscular mycorrhizal fungi in *Albizia saman* and their biotechnical detection in roots. *Indonesia: International Conference of mycorrhizas in Sustainable Tropical Agriculture and Forest Ecosystems.*

Ramírez, G. M. (2003). Biofertilizantes y Nutrición de Plantas. En: *Manejo Integral de la Fertilidad del Suelo.* Triana, P. M.; Lora, R.; Gómez, I. y Peñalosa, G. (Vds.). Bogotá, Colombia: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, p. 153-163.

Remy, W.; Taylor, T. N.; Hass, H. and Kerp, H. (1994). Four hundred million year old vesicular arbuscular mycorrhizae. U.S.A.: Proc Natl Acad Sci USA 91: 11841-11843

Rivas, G. (1997). Micorrizas. Turrialba, Costa Rica: CATIE. Hoja técnica No. 43. Unidad de Fotoprotección.

Sánchez de Prager, M. (1999). Endomicorrizas en Agroecosistemas Colombianos. Palmira: Universidad Nacional de Colombia. 227 p.

Santana, C. and Ramírez, M. (2005). Análisis de Poblaciones de Micorrizas Arbusculares Asociadas al Cultivo de Lechuga (*Lactuca Sativa*) en la Sabana de Bogotá. V. Sirgealc. Simposio de Recursos Genéticos para América Latina y el Caribe. Noviembre de 2005. Montevideo, Uruguay (Memorias).

Schenk, N. C. and Pérez, I. (1988). Manual for Identification on VA-mycorrhizal fungi. 2^o edition. Gainestville: University of Florida. 245 p.

Schreiner, R. P.; Minhara, K. L.; Mc Daniel, H. and Bethlenfalvay, G. J. (2003). Mycorrhizal fungi influence plant and soil functions and interactions. *Plant and Soil* 188: 199-209.

Serralde, A. M. and Ramírez, M. (2004). Análisis de poblaciones de micorrizas en maíz (*Zea mays*) cultivado en suelos ácidos bajo diferentes tratamientos agronómicos. *Revista Corpoica* 5, 1: 31-40.

Setiadi, Y. (1996). The practical application of arbuscular mycorrhiza fungi for enhancing tree establishment in degraded nickel mine sites al PT INCO Soroako. Washington D. C.: International Symposium on Accelerating Natural Succession of Degraded Tropical Lands.

Selosse, M. A.; Baudoin, E. and Vanderkoornhuysse, P. (2004). Symbiotic microorganisms, a key for ecological success and protection of plants. *Cr Acad Sci III Vie* 327: 639-648.

Sieverding, E. (1986). El papel de las micorrizas en la agricultura. *Suelos Ecuatoriales XVI*: 52-58

SITEP. Sistemas de Información Territorial y Posicionamiento. (1999).

St. John, T. V.; Coleman, D. C. and Reid, C. P. P (1983). Association of vesicular-arbuscular mycorrhizal (VAM) fungi with soil organic matter. *Ecology* 64: 957-959.

Van der Heijden, M. G. A.; Klironomos, J. N.; Ursic, M.; Moutoglis, P.; Strelvolf-Engel, R.; Boller, T.; Wiemken, A. and Sanders, I. R. (1998). Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity ecosystem variability and productivity. *Nature* 396: 69-72.

Varma, A. and Hock, B. (1995). *Mycorrhiza: Structure, function molecular biology and Biotechnology*. Berlin: Springer- Verlag.

Vidal, M. T.; Azcon- Aguilar, C. and Barea, J. M. (1992). Mycorrhizal inoculated enhances growth and development of micropropagated plants of avocado. *Hortscience* 27: 785-788.



Terminó de imprimirse
en octubre de 2010 en



Teléfono 422 73 56
www.produmédios.com
Bogotá, DC, Colombia