

**EFFECTO DE ABONOS VERDES EN LA AGREGACIÓN Y MICORRIZACIÓN
EN EL CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays* L.) EN UN SUELO DE
LADERA DE PALMIRA (COLOMBIA)**

FRANCISCO JAVIER VÉLEZ ZABALA

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
COORDINACIÓN GENERAL DE POSTGRADOS
SEDE PALMIRA
2012**

**EFFECTO DE ABONOS VERDES EN LA AGREGACIÓN Y MICORRIZACIÓN
EN EL CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays* L.) EN UN SUELO DE
LADERA DE PALMIRA (COLOMBIA)**

FRANCISCO JAVIER VÉLEZ ZABALA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
MAGÍSTER EN CIENCIAS AGRARIAS,
LÍNEA DE INVESTIGACION EN SUELOS**

**DIRECTORA
MARINA SÁNCHEZ DE PRAGER. Ph.D.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
COORDINACIÓN GENERAL DE POSTGRADOS
SEDE PALMIRA
2012**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE PALMIRA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

ACTA DE JURADO DE TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRARIAS
LINEA DE INVESTIGACIÓN SUELOS

En Palmira a los 10 días del mes de Octubre de 2012, se reunió en esta Sede el Jurado Calificador de Tesis, integrado por los doctores Neuza Asakawa y Eyder Daniel Gómez.

Para calificar la Tesis de Grado de:

FRANCISCO JAVIER VÉLEZ ZABALA

Titulada:

“Efecto de abonos verdes en la agregación y micorrización en el cultivo de maíz (*Zea Mays* L.) en un suelo de ladera de Palmira (Colombia)”, bajo la dirección de Marina Sánchez de Prager, Ph.D.

Después de oír el informe del jurado evaluador compuesto por los investigadores Neuza Asakawa y Eyder Daniel Gómez López, y de haber cumplido con el proceso de evaluación, la tesis fue calificada como:

APROBADA

REPROBADA

Neuza Asakawa
NEUZA ASAKAWA

Eyder Daniel Gómez
EYDER DANIEL GÓMEZ

**“La facultad y los jurados de la tesis
no se harán responsables de las
ideas emitidas por el autor”**

Artículo 24, resolución 04 de 1974.

“...Colombia ostenta el primer lugar en cuanto a riqueza en especies de aves...De la misma manera se puede deducir una riqueza extraordinaria en especies de insectos y microorganismos... Los sistemas selváticos tropicales y el resto de ecosistemas derivados de aquéllos, debemos considerarlos hipotéticamente como un banco inmensurable de germoplasma de micorrizas”.

HERNANDO PATIÑO CRUZ.

*1984. Investigador y Profesor Emérito
Universidad Nacional de Colombia - Palmira*

DEDICATORIA.

A DIOS por iluminar mi camino de vida en compañía de mis ángeles y arcángeles y por permitir rodearme de seres maravillosos, a mis Antepasados por toda su sabiduría y por enseñarme y mostrarme el camino de la espiritualidad, a mi Familia, por la confianza, la dedicación y por ser la fuente de energía constante que siempre me ha apoyado incondicionalmente y me dio ánimo para continuar, a mis Maestros por toda su colaboración, amistad, tolerancia y dedicación por enseñarme durante este tiempo. Mil Gracias...

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincera gratitud a las siguientes personas que colaboraron de una u otra forma en la elaboración de este trabajo. A:

Marina Sánchez de Prager, Ph.D. Profesora Titular UNAL Sede Palmira por su apoyo, orientación y acompañamiento como directora de grado. Por su calidad humana y altruista, por ser la Maestra, Consejera, Amiga y Madre académica, que hace de su amistad un privilegio y un disfrute, y sobre todo a su invaluable aporte y dedicación a la bella causa de construir ciencia en este país.

Martín Prager Mosquera, Ph.D. Profesor Asociado UNAL Sede Palmira. Por la acertada orientación en la fase de campo y por compartir sus conocimientos. Por su calidad humana, su gran amistad, su sencillez y por ser un Padre académico.

Eyder Daniel Gómez López, Ph.D. Profesor Asociado UNAL Sede Palmira. Por la orientación y colaboración en el trabajo de grado, por compartir sus conocimientos técnicos en la fase de campo y laboratorio, por su amistad y acompañamiento.

Ewald Sieverding, Ph.D. Profesor de la Universidad de Hohenheim en Stuttgart Alemania. Por su amistad, sus observaciones, asesoría y valiosas contribuciones.

Neuza Asakawa, M.Sc. Directora del Laboratorio de Biología de Suelo del Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT. Por su generosidad e invaluable colaboración.

Juan Carlos Menjívar, Ph.D. Director de Postgrados UNAL Sede Palmira. Por todo el apoyo académico y financiero brindado. Por su calidad humana y por brindarme su amistad.

La Familia Carvajal Pomeo: Gladys, Adolfo, Gustavo Adolfo y María José. Por abrirnos las puertas de su casa y la finca Las Flores, brindarnos su amistad y colaborarnos en toda la fase de campo.

Yolanda Rubiano, Ph.D. Profesora asociada de la UNAL Sede Bogotá. Por el apoyo en la caracterización taxonómica del suelo de la finca Las Flores.

Nancy Barrera, Ph.D., Patricia Sarria, Ph.D. y María Elena Pineda, M.Sc. Profesoras asociadas de la UNAL Sede Palmira. Por su apoyo, su amistad y sus valiosos aportes a mi formación profesional y personal.

Diego Iván Ángel Sánchez, M.Sc., Gabriel De La Cruz, M.Sc. y Carlos Huertas, M.Sc. Profesores Asociados de la UNAL Sede Palmira. Por su apoyo, su amistad y sus valiosos aportes a mi formación profesional y personal.

Doña Elizabeth Martínez, Agricultora. Por su apoyo, contribución con el compost, por ofrecerme su amistad, generosidad y su calidad humana.

Octavio Mosquera, Ph.D. Director del Laboratorio de Análisis de Suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT. Por los análisis de suelos, Por su generosidad e invaluable colaboración.

Edilfonso Melo, Laboratorio de Biología de Suelo del Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT. Por su generosidad, amistad y colaboración.

Francisco Sánchez, M.Sc. Profesor Catedrático UNAL Sede Palmira. Por su apoyo en la ejecución y análisis estadístico de la tesis.

Nubia Rodríguez y Fernando Naranjo de los Laboratorios de Microbiología Vegetal y Animal, respectivamente, de la UNAL Sede Palmira. Por toda la colaboración e infinita paciencia brindada para la realización de la fase de laboratorio.

Luis H. Lotero, Miguel Beltrán, Alfredo Rivera, Reynel García y Andrés Posso de los Laboratorios de Botánica, Física de Suelos, Entomología, Fisiología Vegetal y Biología Molecular respectivamente, de la UNAL Sede Palmira. Por brindarme su confianza, amistad y su valiosa colaboración.

Mi familia académica el Grupo de Investigación en Agroecología por haberme acogido y por hacerme parte de ellos, gracias por haber compartido con todos ustedes durante estos 6 años a su lado y espero que pueda compartir muchos más en otros espacios, por enseñarme a ver la vida de otra forma y por permitirme crecer personalmente, profesionalmente y madurar a su lado. Mil Gracias por todo.

A mis compañeros de clase: Edwin Erazo, Diego Jamioy, Johannes Hernández, Carlos Cisneros, Rodolfo Correa, Andrés Hernández, Diego Forero y a mis amigos de la vida: Alonso Echeverri, Diana Plata, Carlitos, Sharon Clavijo, Diana Mora, Olga Cardona, Yamileth Chagüeza, José Gallego, Oscar Sanclemente, Andrés Vásquez, Rubén Naranjo, Mileidy Andrade, Magda Narváez, Jillian Higueta, Juliana Ángel, Yuli Urbano, Cristina Jiménez, Ángela Suarez, Walter Chazatar, Visnu Posada y demás compañeros por hacer admirable la estadía en este universo lleno de grandes aventuras.

A todos y cada uno Mil Gracias.

CONTENIDO

pág.

1.	INTRODUCCIÓN	20
2.	OBJETIVOS	23
2.1.	OBJETIVO GENERAL	23
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
3.	REVISION DE LITERATURA.....	24
3.1	LOS ABONOS VERDES (AV)	24
3.1.1	Cualidades que deben reunir los AV	25
3.1.2	Beneficios ligados a la utilización de AV	25
3.1.2.1	Respecto a propiedades Químicas	26
3.1.2.2	Respecto a propiedades Físicas	27
3.1.2.3	Respecto a propiedades Biológicas	27
3.1.3	Algunas investigaciones sobre AV	30
3.2	LA MICORRIZA ARBUSCULAR (MA).....	31
3.2.1	Importancia del micelio	33
3.2.1.1	Factores que afectan el desarrollo del micelio externo (ME).....	40
3.2.1.2	Algunos estudios sobre ME	40
3.2.1.3	Micelio activo de los HMA	41
3.2.2	Los arbusculos como espacios de intercambio plantas - HMA	42
3.3	EL CULTIVO DEL MAÍZ	44
4	MATERIALES Y MÉTODOS	46
4.1	LOCALIZACIÓN	46
4.2	CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	47
4.3	DISEÑO DE TRATAMIENTOS	48
4.3.1	Variables a evaluar.....	52
4.3.2	Análisis de resultados	58
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
5.1	ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPOST Y DE LOS AV INCORPORADOS	59

5.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO	60
5.3	CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS: COMPONENTES DE HMA	61
5.3.1	Longitud de micelio externo total (LMET)	61
5.3.2	Longitud de Micelio externo vivo y activo (LMEV)	63
5.3.3	Porcentaje de colonización por arbusculos	65
5.4	EFFECTO DE LOS HMA SOBRE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	67
5.4.1	Índice de estabilidad de agregados	67
5.5	RENDIMIENTO DEL MAIZ	69
5.5.1	Producción de Biomasa	69
5.5.2	Rendimiento del Grano (RG)	70
5.6	ANÁLISIS DE CORRELACIÓN	71
6.	CONSIDERACIONES FINALES	72
7.	CONCLUSIONES	74
8.	RECOMENDACIONES	75
	BIBLIOGRAFÍA	76
	ANEXOS	86

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Resultados de algunas investigaciones en suelos de Colombia.	37
Tabla 2. Dosis de aplicaciones de fertilizantes en épocas del cultivo.....	51
Tabla 3. Metodologías utilizadas para el análisis físico- químico del suelo.	53
Tabla 4. Variables biológicas y físicas evaluadas en tres muestreos.	54
Tabla 5. Algunas Características químicas del Compost utilizado en el ensayo. ...	59
Tabla 6. Características químicas iniciales del suelo.	60
Tabla 7. Coeficientes de correlación Pearson.	71
Tabla 8. Resumen de las diferencias estadísticas encontradas entre tratamientos en las diferentes variables evaluadas, con base en la prueba de Duncan.	72

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Especies más usadas como AV en estudios de investigación en zona tropicales. Adaptado de CIDICCO (2003).	30
Figura 2. Estructuras del HMA al colonizar la raíz de una planta.....	32
Figura 3. Micelio externo (ME) en raíz (R) de maíz. Se observa además, la presencia de abundantes pelos radicales (Pr).	35
Figura 4. Posible zona de agotamiento de nutrientes para las plantas y efecto del micelio externo de HMA, planteada por Brundrett <i>et al.</i> , 1996.....	39
Figura 5. Tubo germinativo de hifa interna de HMA.....	42
Figura 6. Forma del arbúsculo en la célula de la raíz.....	43
Figura 7. Localización geográfica del sitio de estudio.	46
Figura 8. Calicata del suelo en estudio.	47
Figura 9. Distribución espacial de los tratamientos en el ensayo.....	48
Figura 10. Distancias de siembra de los dos AV en cada unidad experimental. ...	49
Figura 11. Los AV antes de la floración (70 dds).	50
Figura 12. Incorporación de los AV en los tratamientos correspondientes.	50
Figura 13. Incorporación de Abonos Verdes + Compost. (AVC).....	52
Figura 14. Estimación del nivel de colonización micorrízica de cada fragmento de raíz y la abundancia de arbúsculos.....	56
Figura 15. Colonización por HMA calculado según Trouvelot <i>et al.</i> , (1986), programa de MycoCalc.....	57
Figura 16. Extracción de micelio externo de HMA en filtros de nitrocelulosa - tinción con tinta Sheaffer de color azul.	61
Figura 17. Prueba de Duncan para LME Total (m/gss) de HMA asociado a plantas de maíz blanco (<i>Zea Mayz</i>).	62

Figura 18. Tinción de succinato deshidrogenasa (SDH), que permite localizar sitios de micelio de HMA activos en la absorción de P, teñidos de fucsia.	63
Figura 19. Prueba de Duncan para LMEV (m/gss) de HMA asociado a plantas de maíz blanco (<i>Zea Mayz</i>), en época de llenado de mazorca.....	64
Figura 20. Arbúsculos detectados en una raíz de maíz.	65
Figura 21. Efecto de tratamientos sobre el porcentaje de arbúsculos de HMA asociado a plantas de maíz blanco (<i>Zea Mayz</i>) en época de llenado de mazorca.	66
Figura 22. Participación del micelio externo (ME) de los HMA en la formación de agregados en el suelo. (Raíz de plantas de maíz blanco – <i>Zea Mayz</i>).	67
Figura 23. Índice de estabilidad de agregados (IEA) de tamaño medio >1mm en época de llenado de grano del maíz.	68
Figura 24. Media del efecto de tratamientos sobre la producción de biomasa en el cultivo de maíz blanco (<i>Zea Mayz</i>).	69
Figura 25. Prueba de Duncan en el efecto de tratamientos sobre el rendimiento del grano en el cultivo de maíz blanco (<i>Zea Mayz</i>).	70

LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo 1. Descripción del perfil de suelos finca las flores.....	87
Anexo 2. Metodología para estimar la variable de micelio externo vivo y activo (MEV).....	89
Anexo 3. Cuadro para estimar los niveles de colonización micorrízica de cada fragmento de raíz y la abundancia de arbusculos.....	90
Anexo 4. Análisis de varianza para la variable estimada en el ensayo.	91
Anexo 4-A: Análisis de varianza para longitud de micelio externo (LME) total a través del tiempo del ensayo.	91
Anexo 4-B: LME total, prueba de agrupamiento de tratamientos mediante Duncan.	91
Anexo 5. Análisis de varianza para la variable estimada en el ensayo.	92
Anexo 5-A: Análisis de varianza para longitud de micelio externo vivo y activo (LMEV) cuantificado en el ensayo.	92
Anexo 5-B: Agrupamiento de Duncan para longitud de micelio externo vivo activo (LMEV).....	92
Anexo 6. Análisis de varianza para la variable estimada en el ensayo.	93
Anexo 6-A: Análisis de varianza para la colonización de arbusculos cuantificados en el ensayo.....	93
Anexo 6-B: Agrupamiento de Duncan para la colonización de arbusculos.....	93
Anexo 7. Análisis de varianza para la variable estimada en el ensayo.	94
Anexo 7-A: Análisis de varianza para la Estabilidad de Agregados del suelo (EA) cuantificados en el ensayo.....	94
Anexo 7-B: Agrupamiento de Duncan para la Estabilidad de Agregados del suelo (EA).....	94
Anexo 8. Análisis de varianza para la variable estimada en el ensayo.	95

Anexo 8-A: Análisis de varianza de la Producción de Biomasa cuantificados en el ensayo.	95
Anexo 8-B: Agrupamiento de Duncan para la Producción de Biomasa.	95
Anexo 9. Análisis de varianza para la variable estimada en el ensayo.	96
Anexo 9-A: Análisis de varianza del Rendimiento del Grano cuantificados en el ensayo.	96
Anexo 9-B: Agrupamiento de Duncan para el Rendimiento del Grano.	96

RESUMEN

Los Abonos Verdes (AV) inciden positivamente sobre propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, entre ellas, la expresión de la micorriza arbuscular (MA), componente simbiótico fundamental en el suelo, que incide en la nutrición, sanidad, productividad de los cultivos y conservación del agroecosistema. En un *Humic Dystrudepts* del municipio de Palmira (Valle del Cauca, Colombia) se sembró *Canavalia ensiformis* L. y *Axonopus scoparius* F., los cuales se cosecharon como AV, en época de prefloración de la leguminosa. A los quince días de incorporados al suelo, se sembró maíz (*Zea mays*), variedad ICA V-354, al cual se hizo seguimiento durante 150 días, hasta época de llenado de mazorca. Se establecieron cinco tratamientos: Testigo (T), Fertilización de síntesis química industrial (FQ), Abono verde (AV), Compost (C) y, Abono verde + Compost (AV+C), bajo un arreglo de bloques completos al azar, con tres repeticiones.

En este ensayo, se evaluaron algunas estructuras de los hongos que forman micorriza arbuscular (HMA): a) longitud de micelio externo total, LMET (Técnica del filtro de membrana y método del intercepto de Miller and Jastrow 1992 y cálculos de Tennant 1975), b) longitud de micelio externo vivo, LMEV mediante la tinción de succinato-deshidrogenasa (Hamel *et al.*, 1990) y, c) porcentaje de colonización por arbusculos (Phillips y Hayman, 1980, descrita por Sieverding, 1983 y adaptada para este cultivo, Sánchez *et al.*, 2010). Estos parámetros se relacionaron con la producción de biomasa (PB) y el rendimiento del grano (RG), analizados en la época de cosecha del Maíz.

El análisis de varianza (software SAS® versión 9.1.3, 2012) mostró que LMET, LMEV y porcentaje de arbusculos presentaron diferencias altamente significativas entre tratamientos. Mayor LMET coincidió con incrementos en LMEV, colonización por arbusculos y, se presentó en AV+C, seguido por AV, C y T, que no variaron entre sí, y, los más bajos en FQ. La coincidencia de estas tres variables en el tratamiento que combina materiales orgánicos, indicaría que esta cambia y crea condiciones favorables para que a través del micelio externo total y especialmente, aquel que se detectó en actividad metabólica ligada a la producción de ATP, se absorba y transporte P al interior de las plantas. Este suministro, coincidente con mayor porcentaje de colonización por arbusculos, señala la ruta del P en la conjunción suelo-planta-fertilización orgánica, con sus consecuencias sobre la economía del agroecosistema y del agricultor.

Sin embargo, al evaluar PB, la tendencia se invierte, FQ y AV+C presentan los mayores valores en biomasa, sin diferir entre ellos, seguidos por AV y C y en T la biomasa se reduce drásticamente. Los rendimientos (RG) del maíz fueron significativamente mayores en FQ. Sin embargo, el efecto inhibitorio de este tratamiento sobre los componentes de HMA y, estimulante por parte de AV aplicados individualmente o combinados, plantea interrogantes en términos de

resiliencia y sostenibilidad del agroecosistema, con implicaciones sociales, económicas y ambientales de la práctica agronómica de aplicación de fertilizantes de síntesis química industrial.

Palabras claves: Abonos Verdes, Micorriza Arbuscular, Longitud de Micelio Externo Total, Longitud de Micelio Externo Vivo, Succinato-Deshidrogenasa, Rendimiento.

FERTILIZER EFFECT IN THE AGGREGATION AND GREEN IN MYCORRHIZATION MAIZE (*Zea mays* L.) IN A LAND OF HILLSIDE PALMIRA (COLOMBIA)

ABSTRACT

The AV influence in a positive way on the physical, chemical and biological properties of soil, including the expression of mycorrhizal arbuscular (MA) fundamental symbiotic component in the soil, which affects the nutrition, health, crop productivity and conservation of agroecosystem. In a *Humic Dystrudepts* of the municipality of Palmira (Valle del Cauca, Colombia) *Canavalia ensiformis* L. and *Axonopus scoparius* F, were sowed and harvested as AV, in time of flowering of the legume. Fifteen days after being incorporated into the soil, corn (*Zea mays*) was planted, variety ICA V-354, which followed up was made for 150 days, until pod filling period. Five treatments were established: Witness (W), industrial chemical synthesis Fertilization (FQ), green manure (GM), Compost (C) and Green manure + Compost (GM + C), under an arrangement of a randomized complete block, with three replications.

In this study, some of the structures that form arbuscular mycorrhizal fungi (AMF): were evaluated: a) Total external mycelium length, LMET (membrane filter technique and intercept method of Miller and Jastrow in 1992 as well as Tennant calculations 1975), b) length of external mycelium vivo, LMEV by staining succinate dehydrogenase (Hamel et al., 1990), and c) percentage of colonization by arbuscules (Phillips and Hayman, 1980, described by Sieverding, 1983 and adapted to this crop, Sanchez et al., 2010). These parameters are related to the production of biomass (PB) and grain yield (GY), analyzed in the time of harvest of corn.

The variance analysis (SAS ® software version 9.1.3, 2012) showed that LMET, LMEV and percentage of arbuscules showed highly significant differences between treatments. Mayor LMET coincided with increase in LMEV, colonization by arbuscules and appeared in AV + C, followed by AV, C and T, which did not differ from each other, and the lowest in CF. The coincidence of these three variables in the treatment combining organic materials, indicate that this condition creates favorable conditions for external mycelium through total and especially one that was detected in metabolic activity linked to ATP production, absorption, and transport P into plants. This provision, which coincides with the highest percentage of colonization by arbuscules leads the P path in soil-plant-conjunction organic fertilization, with its impact on the economy of the agroecosystem and farmer.

However, when evaluating PB, the trend is reversed, FQ and AV+C showed the highest biomass values, not differing between them, followed by AV and C and in T

the biomass is drastically reduced. Yields (RG) of maize were significantly higher in FQ. However, the inhibitory effect of this treatment on the components of HMA and stimulating by AV applied individually or in combination, raises questions in terms of resilience and sustainability of agroecosystems, with social, economic and environmental implications of agronomic practice on the application of fertilizers of industrial chemical synthesis.

Key words: green manure, Arbuscular Mycorrhiza, external mycelium Total length, length of external mycelium Vivo, Succinate Dehydrogenase, Performance.

EFFECTO DE ABONOS VERDES EN LA AGREGACIÓN Y MICORRIZACIÓN EN EL CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays* L.) EN UN SUELO DE LADERA DE PALMIRA (COLOMBIA)¹

Francisco Javier Vélez Zabala²

1. INTRODUCCIÓN

El uso y manejo de los suelos del mundo atraviesan situación de crisis ante el incremento de la población, la inequitativa distribución de los recursos y la inestabilidad social que hacen poco probable que los agricultores permitan que los suelos recuperen su fertilidad naturalmente (Doran y Safley, 1997. Molina O., 2005). Como alternativa se ha acudido al uso intensivo de los fertilizantes de síntesis química industrial. Sin embargo, los altos costos económicos, sociales y ambientales de esta opción tecnológica, unidos a los desequilibrios que acarrea su uso continuo e indiscriminado, al hecho que sus fuentes de obtención son finitas, crean la necesidad de replantear esta opción tecnológica y buscar alternativas viables desde lo social, económico y ambiental (Nziguheba *et al.*, 1998; Rao *et al.*, 1999; Molina O., 2005).

La utilización de abonos verdes (AV) constituye una de las alternativas tecnológicas a explorar, puesto que permite mantener el potencial productivo del suelo, contribuye a la seguridad alimentaria local, regional y, a la generación de ingresos para los agricultores. (Prager *et al.*, 2002). El uso de AV disminuye los costos y posibilita la producción en la parcela con insumos locales, en beneficio de la economía de la finca y región.

En la medida que los AV son fuente de nutrientes, entre ellos P y N, con su utilización se busca contribuir a la mitigación de la problemática tecnológica, económica y ambiental del uso de fertilizantes de síntesis química industrial, tanto en sistemas agrícolas de grandes extensiones y rendimientos como también en minifundios. Es de recordar que la producción industrial de estos nutrientes consume energía fósil y genera GEI (SEAE, 2007). Fuera de ello, la eficiencia de utilización de N y P por los cultivos es de baja a media, fluctúa entre 40 a 60%, dependiendo de diferentes factores, el resto se fija en el suelo o se pierde del sistema por diferentes vías, con consecuencias no deseables desde diferentes perspectivas (Urquiaga *et al.*, 2005).

¹ La presente investigación se realizó dentro del proyecto “Los abonos verdes como estrategia agroecológica y ambiental en agroecosistemas del Valle del Cauca”.

² Trabajo presentado para optar al título de Magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en suelos.

Los AV están destinados a ser fuente de materia orgánica fácilmente degradable por la actividad de los organismos del suelo. La actividad microbiana en la rizosfera de las plantas es la encargada de mineralizar estos materiales orgánicos y colocarlos a disponibilidad de las plantas que se siembran después de los AV (Gómez, 2000; Prager *et al.*, 2002; Sánchez de P. *et al.* 2007). En esta actividad participan diversidad de microorganismos entre ellos bacterias, hongos y dentro de estos un grupo muy especial que forman una simbiosis los hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA), que participan activamente en el mantenimiento de la fertilidad y salud del suelo (Jeffries *et al.*, 2003; Molina O., 2005).

Además de su contribución en la nutrición de las plantas, los AV participan en la agregación del suelo, por diferentes vías. En la formación de la estructura del suelo intervienen agentes orgánicos, inorgánicos, físicos y químicos, que generan fuerzas de cohesiones transitorias, temporales y persistentes dando estabilidad y durabilidad a los agregados (Astier *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2007).

Dentro de los agentes temporales juegan papel importante las bacterias, vía sus secreciones y excreciones, al igual que los hongos, entre ellos los hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA) y las raíces. Estos al producir efectos mecánicos de empuje sobre las partículas de suelo actúan como agentes ligantes formadores de macroagregados (>250 μm), originando los macroporos, mejorando el movimiento del agua, aire y la penetración de las raíces: estos macroagregados son muy afectados por las prácticas de manejo del suelo (Torres, 2000; Zhang *et al.*, 2007; Mosavi *et al.*, 2009). A través de secreciones, también los HMA y raíces participan en la formación de agregados estables al agua (macro y microagregados del suelo).

Dados sus efectos sobre la nutrición de la planta y sobre la agregación del suelo, el estudio de los HMA cobra importancia, en particular en los suelos tropicales. La presencia de zonas de agotamiento de nutrientes, especialmente de aquellos con baja disponibilidad, ocurre en aproximadamente el 36% de los suelos tropicales, de los cuales, el 23% presentan alta fijación de P (Sánchez y Logan, 1992; Hue *et al.*, 1994; Molina O., 2005). En estos suelos el P está fuertemente retenido por procesos de adsorción y precipitación, debido a la presencia de sesquióxidos de hierro y aluminio y materiales alófanicos (Gijsman y Sanz, 1998; Rao *et al.*, 1999; Bühler *et al.*, 2002). Entonces, la disponibilidad de este elemento se torna limitante en los procesos de producción.

Los HMA al formar la simbiosis con la planta llamada micorriza arbuscular (MA) tornan eficiente la absorción del P y contribuyen a través de sus componentes como el micelio externo (ME) y micelio interno (MI) a que la zona de agotamiento del nutriente que se presenta en el suelo sea superada con creces (Sánchez de P. *et al.*, 2007).

El estudio del efecto de los AV y MA se ha concentrado en la disponibilidad de P para las plantas y sus efectos en los rendimientos, sin embargo, aún falta comprender la participación de los componentes de los HMA (micelio y arbusculos) como compartimentos a través de los cuales circula el nutriente en la interfase suelo-planta. De allí que esta investigación aborde esta temática.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la adición de abonos verdes y hongos formadores de micorriza sobre la formación de agregados estables al agua, estrechamente relacionados con absorción de nutrientes y agregación del suelo, en un ciclo de siembra de maíz *Zea mays L.*

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar algunas propiedades físicas y químicas del suelo, que puedan ser afectadas por los AV e incidir en la formación de agregados estables al agua y componentes de HMA en diferentes épocas del cultivo.
- Evaluar la influencia de la adición de AV al suelo, en algunos componentes de la micorriza arbúscular (MA) que pueden influir en la nutrición de las plantas de maíz, y formación de agregados estables al agua en época de llenado de mazorca.
- Evaluar la influencia de AV sobre la productividad del cultivo de maíz.

3. REVISION DE LITERATURA

3.1 LOS ABONOS VERDES (AV)

Autores como Prager *et al.*, 2002, describen a los AV como especies herbáceas, de rápido crecimiento que suelen ser utilizados para incorporarse al suelo con el objetivo de nutrirlo y mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas, Estos son cortados o segados dentro de un plan de rotación, antes de la siembra de un cultivo principal. El AV en algunas ocasiones puede ser utilizado antes de su incorporación, como base de alimento de animales y/o el consumo humano (Costa *et al.*, 1992).

Las adiciones de material vegetal no vivo o necromasa al suelo, se han generalizado como práctica agronómica, sin embargo, ante su escasez en muchas de las fincas, comúnmente se realiza trayendo a la parcela residuos orgánicos procedentes de otras partes, lo cual encarece su uso. Los AV, por el contrario, son producidos en la propia finca (en la misma parcela de ser posible), lo cual evita costos de transporte, hace eficiente y continuo el uso del suelo. Las condiciones tropicales (temperatura alta, estable y régimen de humedad) influyen para que se produzca una rápida descomposición de los materiales orgánicos que se adicionan al suelo.

La familia de las leguminosas ocupa lugar preferencial como AV debido a la fijación biológica de N_2 y el aporte de materia orgánica fresca con relación C/N baja a media (aproximadamente de 15 a 20), factores que potencializan el desarrollo de la actividad biológica en el suelo y contribuyen a su fertilidad.

Otras plantas que se utilizan como AV son las gramíneas, las cuales mediante sus raíces renuevan el terreno dándole mayor aireación y mejorando la agregación al suelo. Éstas sembradas con las leguminosas, pueden contribuir a que se produzca humus estable con una relación Carbono Nitrógeno (C/N) que permite su mayor permanencia en el suelo. Las crucíferas, por su parte, tienen desarrollo acelerado proporcionando AV de rápida disponibilidad, cuando se dispone de poco tiempo entre cultivos. Estas plantas son capaces de utilizar las reservas minerales del suelo con mayor eficiencia que la mayor parte de las plantas gracias a la longitud de su sistema radical (Sociedad de agricultores de Chile, 2012).

3.1.1 Cualidades que deben reunir los AV

- Producción de abundante biomasa aérea en períodos cortos de tiempo. Algo que normalmente no se menciona es la biomasa radical, la cual en algunos de estos AV contribuye a un efecto rizosférico que impacta disponibilidad de nutrientes, estructura del suelo y aún una acción de biotaladración, como en el caso de *Cajanus cajan* frijol de año (Sánchez de P. *et al.*, 2007).
- Su metabolismo fisiológico debe permitir que alcancen rápidamente la floración, etapa ideal para su incorporación (Prager *et al.*, 2002).
- Las especies que se emplean como AV deben ser competitivas con la flora acompañante y de fácil adaptación a las condiciones del medio.
- La condición herbácea, acompañada de bajas a medias relaciones C/N son ideales para favorecer una rápida incorporación al suelo y por lo tanto, disponibilidad de nutrientes.
- En los AV pueden aunar otras cualidades como por ejemplo albergadoras de insectos benéficos y/o efectos alelopáticos sobre arvenses. (Altieri y Nicholls, 2002). Por ejemplo, *Crotalaria juncea* ha sido registrada como especie albergadora de insectos que hacen control biológico³. *Canavalia ensiformis* muestra efectos alelopáticos contra poblaciones de ácaros (Marín, 2012).

3.1.2 Beneficios ligados a la utilización de AV

Son múltiples los beneficios que se han registrado en torno al uso de AV. Algunos de ellos se pueden resumir así:

- Mantienen el suelo productivo, asegurando producción en las cosechas, contribuyendo a la seguridad alimentaria (local y regional) y a la generación de ingresos (Prager *et al.*, 2002).
- Mejoramiento de las propiedades nutricionales del suelo, ligado al aumento del contenido de nutrientes en el suelo y de la materia orgánica en el suelo. Esto hace que disminuyan los costos de fertilización con productos de síntesis química industrial (Gómez, 2000).
- Los AV son capaces de agregar al suelo hasta 50 T/Ha de materia orgánica (peso fresco) en cada aplicación. Esta materia orgánica, a su vez, tiene toda una serie de efectos positivos sobre el suelo, tales como mejorar su capacidad de retención de agua, su contenido de nutrientes, su equilibrio de nutrientes y pH. (Bunch, 1994).

³Sánchez de P., M. 2012, comunicación personal. Profesora Titular de la Universidad Nacional de Colombia.

- Reducen los costos de riego, mediante la cobertura que establecen unida a la actividad metabólica que se desarrolla en torno a ellos, factores que favorecen la reserva de agua en el suelo. (Madero *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2007).
- Mejoran la estructura al favorecer la macro y meso - agregación. Reducen la compactación del suelo: al sembrar cultivos de raíces profundas se reduce la compactación del subsuelo (Astier *et al.*, 2007).
- Estimula la actividad biológica del suelo, al suministrarse un sustrato para el desarrollo de los organismos (macro y micro) y con ello, se favorece el ciclaje de nutrientes. Cuando se emplean leguminosas se propicia la fijación biológica del N₂. (Zapata *et al.*, 2002; Sánchez de P., *et al.*, 2003; Dhima *et al.*, 2009).
- Evitan el desarrollo y competencia de las arvenses (Prager *et al.*, 2002; Vázquez L., y Álvarez J. 2011).
- En zonas de ladera es muy importante la utilización de los AV, debido a que la incorporación impide el impacto directo de las gotas de lluvia sobre el suelo, disminuye significativamente los niveles de erosión e infiltración.
- Estas aplicaciones de materia orgánica y N₂ se logran sin ningún gasto de transporte terrestre; Los AV son producidos en los mismos campos agrícolas, y en forma bien distribuida. Esto quiere decir que el agricultor que vive aislado de los pueblos y carreteras puede competir perfectamente con los de mayores recursos que suelen vivir más cerca de las fuentes de insumos comerciales (Prager *et al.*, 2002).

De este listado, nos detendremos en aquellos beneficios íntimamente ligados a la nutrición de los cultivos que preceden a su aplicación:

3.1.2.1 Respecto a propiedades Químicas

Los AV son importantes por que incrementan la calidad del suelo, mejoran la capacidad de intercambio catiónico CIC, aumentan los contenidos de materia orgánica, mejoran el retorno de N a través de la fijación biológica de N₂, disminuyen el lavado de nutrientes, pueden incrementar el pH, la acumulación del C orgánico y la mineralización del N y P orgánico, pudiendo complementar o sustituir fertilizantes de síntesis industrial (Prager *et al.*, 2002; Randhawa *et al.*, 2005; Hoon Lee *et al.*, 2010). Sanclemente *et al.*, (2011), sostienen que los AV brindan ventajas como incremento de los procesos de mineralización de la materia orgánica y liberación oportuna de nutrientes para el siguiente cultivo, adición de carbono orgánico que entra a formar parte del humus estable del suelo, lo que genera interacciones con el resto de propiedades físicas, químicas y biológicas.

Además, Bunch (1994), relaciona incrementos en la productividad de los cultivos cuando se utilizan los AV dentro de las prácticas agrícolas convencionales de los sistemas productivos.

3.1.2.2 Respetto a propiedades Físicas

Los AV influyen en características físicas del suelo así: regulan su temperatura, la agregación, aumentan su capacidad de retención de humedad, mejoran la estructura, densidad aparente, y facilitan la penetración de capas endurecidas con raíces profundas (Astier *et al.*, 2007, Zhang *et al.*, 2007). Mejora la textura del suelo, la capacidad de infiltración, el color y aireación del suelo (Madero *et al.*, 2003).

Diferentes estudios han corroborado que los AV: protegen la capa superficial del suelo contra el impacto de las gotas de lluvia y el viento, disminuye la evaporación del suelo, favorecen la aireación y estructuración del suelo por efecto del sistema radical, del proceso de transformación de la materia orgánica y de los microorganismos asociados a las raíces de los AV, entre ellos los HMA (Costa *et al.*, 1992; USDA, 1996; FAO, 2000; Mosavi *et al.*, 2009).

3.1.2.3 Respetto a propiedades Biológicas

La aplicación de AV al elevar los contenidos de materiales orgánicos en el suelo, estimulan la actividad biológica de éstos, entre ellos, la presencia de poblaciones de bacterias fijadoras de N₂, tanto de vida libre como simbióticas, las poblaciones de microorganismos que aportan sus contenidos enzimáticos para que estos materiales sean digeridos y mineralizados e incrementen el contenido nutricional del suelo. Así, los AV desde el punto de vista biológico actúan:

a. Como materia orgánica fresca y con relación C/N baja que favorece la actividad biológica y especialmente la microbiana.

Según Costa *et al.*, (1993) y Prager *et al.*, (2002), los AV constituyen biomasa vegetal que se produce en los propios campos de cultivo, a partir de la energía lumínica y del proceso de fotosíntesis. Son especies vegetales de rápido crecimiento, de naturaleza herbácea y preferentemente de la familia de las leguminosas, las cuales contribuyen a la fijación biológica del N₂. Así, cuando se incorporan los AV en el campo en estado de prefloración, cuando su relación C/N media a baja está entre 8 y 20, que los convierte en biomasa rápidamente ciclada por los organismos del suelo, lo cual asegura disponibilidad temprana de

nutrientes al cultivo establecido en asocio o rotación. Se aprovechan las fuentes de N provenientes de la mineralización y de la fijación biológica de N₂ (Gómez, 2000; Prager *et al.*, 2002; Sánchez de P., 2007; CIDICCO, 2008).

Martin y Rivera (2004), afirman que cuando se emplean especies de AV con relación C/N baja, el nitrógeno incorporado con estas plantas se mineraliza muy rápido, sobre todo si ocurre en un periodo lluvioso con altas temperaturas. Esto provoca que el nitrógeno tenga menor permanencia en el campo y contribuya en la emisión de gases nitrogenados como el N₂O. En este caso hay que evitar siembras de cultivos principalmente muy alejadas en tiempo de la incorporación de los AV, buscando sincronizar la mineralización del AV y los requerimientos del cultivo.

b. Cuando se utilizan las leguminosas, se estimula la presencia de rizobios y por tanto fijación de N₂.

Como se afirmó con anterioridad, la cualidad de las leguminosas de formar simbiosis con rizobios para captar y fijar el N₂, convierte a estas plantas en un aliado importante como AV. Es de recordar que el 80% de la atmósfera está compuesta por N₂ que sólo puede ser incorporado a los agroecosistemas en forma eficiente a través de la fijación biológica de N₂. En esta forma, se hace disponible para ser incorporado al agroecosistema, la presencia de la simbiosis leguminosa-rizobios, en particular y el funcionamiento de los procesos bioquímicos que tienen lugar, además de las condiciones ambientales que favorecen esta actividad biológica (Sánchez de P., *et al.*, 2003).

La leguminosa *Canavalia ensiformis* L. constituye una alternativa favorable como AV dado que sobrevive a condiciones extremas como la ausencia de elementos básicos, además resiste la sequía, suelos pobres, ácidos, sombra, insectos y enfermedades (Prager *et al.*, 2002). Por tanto puede ser usada en lugares muy extremos típicos en zonas campesinas colombianas y del Valle del Cauca. Puede fijar hasta 240 kg.ha⁻¹ de Nitrógeno y puede sembrarse asociada con diferentes cultivos. Se adapta a alturas entre 1000 a 1800 m.s.n.m., (Sánchez de P., *et al.*, 2003). Su corte se hace antes de la floración y se estima que para este tiempo la producción de biomasa es de 15 ton.ha⁻¹ (Birbaumer *et al.*, 2000).

c. La presencia de los HMA que hace más eficiente las plantas en la absorción de nutrientes, especialmente, P.

Los efectos benéficos de la MA han sido demostrados repetidamente en las más variadas condiciones y especies vegetales. Las más importantes funciones que cumple la simbiosis pueden resumirse así: la biomasa de las plantas y su distribución, absorción de nutrimento (absorción de P y otros nutrimentos como el

K, Zn, Cu, Mg, B, Ca, Mo, Cd, Ni, Fe, Mn), resultado en las relaciones agua-planta, resistencia a la sequía, la tasa fotosintética de los hospederos, efectos hormonales, las condiciones adversas al suelo, el reciclaje de nutrimentos, la agregación del suelo, las actividades de otros microorganismos, fitopatógenos e incremento de la rizósfera (Brundrett *et al.*, 2008).

Los HMA poseen dos sistemas de hifas, uno interno y el otro externo. El interno caracterizado por la penetración del hongo inter e intracelularmente en las células corticales de la raíz, el cual, en la corteza interna da origen a arbusculos que se forman poco tiempo después de iniciada la colonización. Las llamadas vesículas se forman en algunos géneros de los HMA posterior a los arbusculos, son comúnmente estructuras ovoides con material lipídico de reserva y, en algunos casos, su pared gruesa las asemeja a clamidosporas. Las vesículas se forman intra o intercelularmente en el sistema radical. El micelio externo, emerge de la raíz y se extiende por el suelo varios metros, dando lugar a hifas exteriores que constituyen el sistema de absorción de nutrientes y también muy importantes en el mantenimiento de la estructura del suelo, ya que constituyen redes que mantienen los agregados o partículas del suelo unidos. (Sieverding, 1991; Sánchez de P., 1999, 2007). En la micorriza arbuscular (MA), no hay presencia de manto y sus acentuadas modificaciones anatómicas en las raíces no son visibles a simple vista.

En términos generales, los hongos formadores de micorriza generan condiciones favorables para el ecosistema tales como incrementos en el abastecimiento de nutrientes para las plantas, protección de las plantas contra patógenos, son fuente importante de alimento para invertebrados del suelo, influyen en las poblaciones microbianas contribuyen con el almacenamiento de carbono alterando la cantidad y calidad de la materia orgánica, etc. (Brundrett *et al.*, 1996, 2008).

d. cuando se utilizan las leguminosas, dado que forman ambas simbiosis leguminosas - rizobios, leguminosa - HMA se favorece la disponibilidad y toma de nutrientes por el AV.

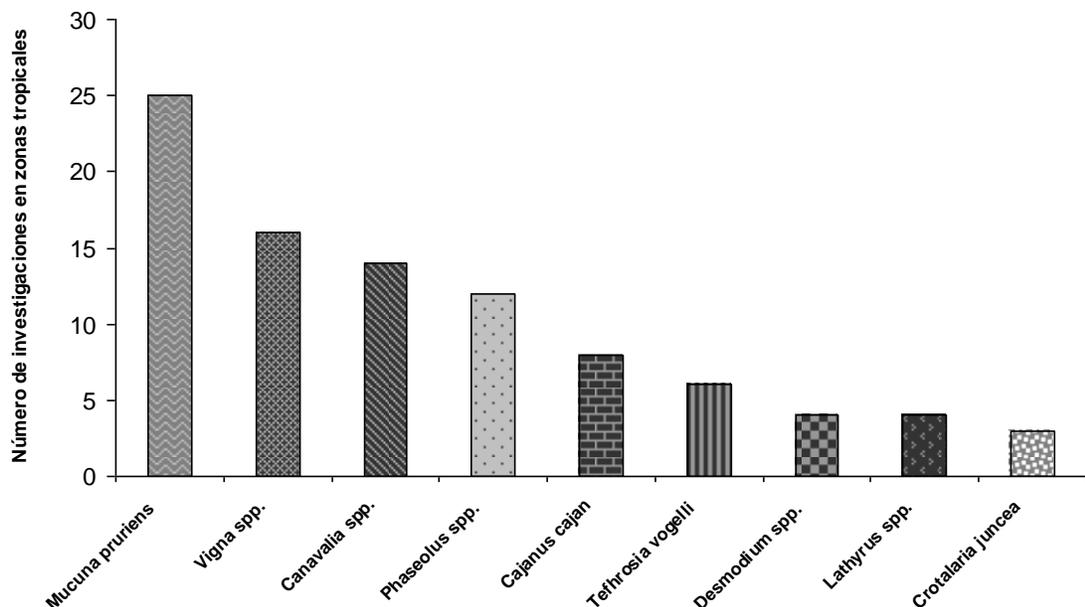
Uno de los beneficios obtenidos de los AV es que favorece el incremento de la materia orgánica y nutrientes al suelo, ya que presentan simbiosis tripartita: 1) leguminosa – rizobios, que permite que el sistema se enriquezca en nitrógeno a través del tiempo gracias a la fijación biológica de N_2 y 2) leguminosa – hongos que forman micorriza arbuscular (HMA), que las capacita para absorber con mayor eficiencia el P disponible en el suelo, además de otros nutrientes y beneficios colaterales (Sánchez de P. *et al.* 2007). Sin embargo, cabe resaltar que se debe tener cautela al escoger las especies usadas como AV y los periodos de establecimiento, ya que pueden llegar a competir con los cultivos asociados de interés económico.

3.1.3 Algunas investigaciones sobre AV

Las investigaciones desarrolladas en las dos últimas décadas en torno a los AV, se basa en sus efectos sobre algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; el rendimiento de los cultivos, el uso más eficiente del recurso hídrico, la reducción de arvenses acompañantes, la salud del suelo y la sanidad de cultivos posteriores (Monegat, 1991; Bunch, 1994; Gómez y Sánchez de P., 2000; Reyes, 2001; Zarate, 2006; Sanclemente y Prager, 2009; Gallego *et al.*, 2010).

Dentro de las principales especies más usadas como AV, en investigaciones hasta el año 2003 (Figura 1), sobresale *Mucuna pruriens* gracias a sus bondades entre las que se resaltan la fijación de N₂, la reducción de arvenses, su uso como AV o mulch, efecto nematicida y salud del suelo. *Canavalia* spp ocupa el tercer lugar en número de investigaciones registradas hasta dicho año (CIDICCO, 2003).

Figura 1. Especies más usadas como AV en estudios de investigación en zona tropicales. Tomado de CIDICCO (2003).



En estudios realizados en laderas colombianas en un suelo Alfisol, se encontraron incrementos hasta de 102 kgN.ha⁻¹ en el contenido de Nitrógeno total dentro de los primeros 10 cm del suelo cuando se estableció *Mucuna pruriens* (Sanclemente y Prager, 2009). En otro estudio en suelos Inceptisoles, Gallego *et al.*, (2010), encontraron un incremento en la nitrificación del suelo cuando se estableció *Canavalia ensiformis* y posteriormente se incorporó como AV en el cultivo de maíz

(*Zea mays L.*), generando liberación gradual del N a la solución del suelo, contrastando con el uso de fertilizantes de síntesis industrial, que se perdieron rápidamente del sistema.

Wildner (1990), evaluó en distintas partes del mundo, el potencial de acumulación de nutrientes de algunas especies usadas como AV. Encontró altos contenidos de P y K en la arvejilla (*Vicia villosa*) y rábano forrajero (*Raphanus sativus*), con valores cercanos al 0.35% de P y 3% de K en materia seca. En el mismo estudio, se obtuvieron altos contenidos de Ca y Mg en el frijol terciopelo (*Mucuna pruriens*) y Crotalaria (*Crotalaria juncea*) con valores cercanos a 1% de Ca y 0.4% de Mg en materia seca. Estos resultados son similares a los registrados por Buckles y Tiomphe 1998, Anthofer y Kroschel, 2005; Shoko, 2009.

Otro efecto positivo en el suelo, obtenido con el uso de AV, es el aumento de la actividad biológica. Tejada *et al.*, (2007) usando las especies *Brassica napus* y *Trifolium pratense*, como AV, encontraron un incremento en la actividad biológica, medida a través de su biomasa microbiana y la actividad de las enzimas deshidrogenasa y ureasa, en un suelo *Typic Xerofluvent* de España. Resultados similares fueron encontrados por Carneiro *et al.*, (2006).

Sharma *et al.*, (1982) y, Santos *et al.*, (1987), evaluaron el efecto del uso de distintos AV y como tecnologías de bajo costo, sobre el control de nemátodos en el cultivo de trigo en suelos ferrasoles de los Estados Unidos. *Dolichos lablab*, *Crotalaria grantiana*, *Mucuna pruriens* y *Cannavalia ensiformis* fueron especies de amplio espectro y las más prometedoras para control de nemátodos, cuando fueron usadas como AV. Blanchart *et al.*, (2006), encontraron resultados similares.

3.2 LA MICORRIZA ARBUSCULAR (MA)

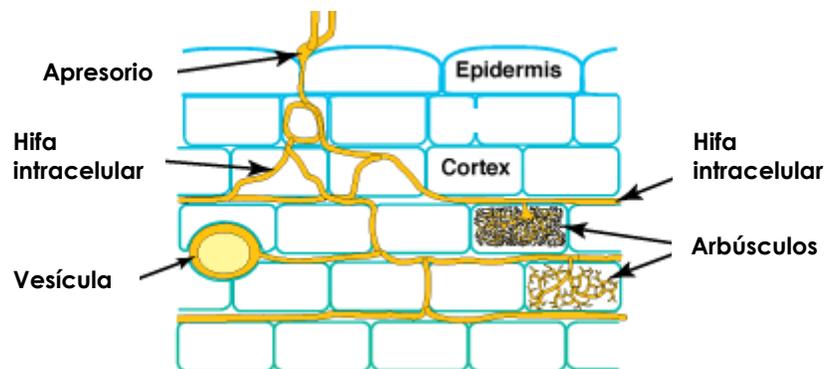
- **Componentes de la MA**

Los HMA se encuentra en las raíces de aproximadamente el 80% de todas las especies vegetales terrestres que se han examinado, por lo que se considera una simbiosis casi universal, pero no específica (Madigan *et al.*, 2004). La planta hospedera cede al HMA fuentes de carbono y un lugar donde sus estructuras internas estén protegidas contra patógenos, a cambio el hongo provee a la planta con nutrientes que ha absorbido del suelo (Douds *et al.*, 2007; Sánchez de P. *et al.*, 2007).

Los HMA son biotrofos obligados, los cuales forman estructuras dentro y fuera de la planta hospedera. Las fuentes de inóculo de HMA pueden ser esporas, trozos de micelio (hifas) y raíces micorrizadas. Cuando las esporas de HMA germinan dan origen a las hifas, las cuales se ramifican hasta alcanzar la superficie radical

donde forman un apresorio que facilita su penetración en la epidermis para crecer luego en el tejido cortical. Una vez en el cortex, las hifas intraradicales penetran las células y forman los arbuscúlos, estructuras muy ramificadas donde ocurre el mayor intercambio de nutrientes (Figura 2). Cuando el HMA tiene su fuente de carbohidratos asegurada, las hifas extraradicales o micelio externo (ME) pueden proliferar en el suelo, el cual es el encargado de la captación de solutos del suelo y su traslado a la raíz, al igual que en el caso de las ectomicorrizas (Douds *et al.*, 2007; Sánchez de P. *et al.*, 2007; Brundrett, 2008).

Figura 2. Estructuras del HMA al colonizar la raíz de una planta.



Fuente: Brundrett (2008).

De acuerdo con Miller *et al.*, (1995) y Johnson *et al.*, (2007), a niveles altos de nitrógeno (N) y fósforo (P) disponibles en el suelo, la biomasa micorrízica se reduce debido a que las plantas asignan una menor cantidad de fotosintatos al hongo y más a su parte aérea pues no sufren por deficiencia de tales nutrientes. Aunque Miller *et al.*, (1995), aclara que niveles altos de fertilización fosforada no necesariamente reducen la presencia de la simbiosis a niveles traza y que los resultados pueden variar según el tipo de suelo, el patrón temporal de colonización, la absorción de P con relación a los requerimientos del cultivo y la concentración de P en la planta más que en el suelo.

Factores como salinidad, aridez, inundaciones y prácticas de manejo como la labranza, también pueden afectar la simbiosis entre los HMA y las raíces de las plantas. La mayoría de estudios sobre micorrizas en suelos disturbados, han registrado niveles bajos de propágulos (Sánchez de P. *et al.*, 2007; Brundrett, 2008). De acuerdo con Miller *et al.*, (1995), la degradación del suelo ocasiona deterioro de la estructura del mismo, de manera que la integridad del ME se destruye al romper la macroestructura, lo que a su vez reduce la capacidad de colonización del hongo.

Aunque los conocimientos más avanzados sobre MA se han centrado en la importancia que reviste esta simbiosis en la absorción de P, diversos investigadores registran estudios bajo condiciones ambientales diferentes, los cuales confirman el movimiento de nutrientes como Cu, Zn y amonio, vía MA (Ferrol *et al.*, 2002; Sánchez de P. y Velásquez, 2008).

En términos generales, los HMA generan condiciones favorables para el ecosistema tales como protección de las plantas contra patógenos, son fuente de alimento para invertebrados del suelo, influyen en las poblaciones microbianas, contribuyen con el almacenamiento de carbono, mejoran la estructura del suelo y la capacidad de absorción de agua y nutrientes de las plantas (Rillig y Mummey, 2006; Douds *et al.*, 2007; Sánchez de P. *et al.*, 2007; Brundrett, 2008).

Lo anterior puede proporcionar una idea para explicar porqué los HMA son considerados como estrategia adaptativa fundamental para los ecosistemas, donde el ME cumple funciones claves (Sánchez de P. y Velásquez, 2008).

3.2.1 Importancia del micelio

En la raíz, la estructura de los HMA más importante para la nutrición del hospedero es el micelio externo (Reyes, 2001) ya que forma la interfase entre la planta y el suelo (Jakobsen *et al.*, 1992). Silva (1988), observó que existen enlaces entre varios hospederos, establecidos por los micelios de los HMA que pueden atravesar grandes distancias y conectar los sistemas radicales de plantas muy lejanas. Así se comprende que en el futuro, se debería abordar el estudio de las comunidades vegetales teniendo en cuenta no sólo su parte aérea, sino también la rizosfera ya que, sin duda, las micorrizas intervienen en la constitución de las comunidades, su estructura, dinamismo y subsecuente evolución (Sánchez de P., *et al.*, 2007).

- **Funciones del micelio externo (ME) en los ecosistemas**

Según Brundrett *et al.*, (1996), la extracción de nutrientes minerales del suelo es considerada como la función primaria del micelio en los HMA; no obstante, no todas sus funciones han sido cuantificadas en ecosistemas naturales, únicamente la absorción de nutrientes ha sido discutida.

La siguiente es la relación de autores y funciones que citan Brundrett *et al.*, (1996); Sánchez y Velásquez, (2008) haciendo referencia al micelio de HMA:

a. Beneficios para las plantas

1. Incremento en el abastecimiento de nutrientes para las plantas por el aumento en el volumen de suelo explorado y la adquisición de fuentes de nutrientes que normalmente no son disponibles para la planta.
2. Fuente de inóculo que favorece la colonización de raíces por HMA, mejorando la protección frente a hongos o nematodos parásitos (Duchesne *et al.*, 1989; Grandmaison *et al.*, 1993; Newsham *et al.*, 1995; Little y Maun, 1996; Cordier *et al.*, 1998; Morin *et al.*, 1999 y Leguízamo, 2012).
3. Los beneficios pueden incluir protección del suelo (mejora agregación del suelo), acumulación de nutrientes, y/o sucesos reproductivos (Lewis y Koide, 1990; Stanley *et al.*, 1993; Sánchez de P. y Gómez, 2003).
4. Cambios favorables en el crecimiento, como en la arquitectura de la planta, el tejido vascular, etc., (Daniels Hetrick *et al.*, 1988; Miller *et al.*, 1997 y Sánchez de P. *et al.*, 2007).
5. Cantidades significativas de carbono transferido a través del micelio de HMA, conectando diferentes especies de plantas han sido medidas (Simard *et al.*, 1997; Sánchez de P. y Gómez, 2003; Sánchez de P. y Velásquez 2008). Esto puede reducir la competencia entre plantas y contribuir a la estabilización y diversidad de los ecosistemas.
6. Transferencia de nutrientes a partir de tejido muerto que pueda encontrarse en el suelo (Eason *et al.*, 1991; Sánchez de P. y Gómez, 2003; Sánchez de P. *et al.*, 2007).

b. Otras funciones en los ecosistemas

1. Las hifas del suelo probablemente tienen un papel importante en el ciclo de los nutrientes ayudando a prevenir pérdidas del sistema especialmente cuando las raíces están inactivas (Sánchez de P. y Velásquez, 2008).
2. Las hifas son conductores que pueden transportar carbono por alteración de la calidad y cantidad de materia orgánica del suelo, desde las raíces de las plantas a otros organismos del suelo involucrados en los procesos de ciclaje de nutrientes (Ryglewicz y Andersen, 1994; Sánchez de P. y Gómez, 2003).
3. Las raíces micorrizadas y los cuerpos fructíferos de los hongos, incluido el micelio, son importantes como fuente de alimento y hábitats para invertebrados (Sánchez de P. *et al.*, 2007).
4. Los HMA influyen sobre las poblaciones y exudados de la microbiota del suelo, influencia a poblaciones de microbios del suelo en la

micorrizosfera (Ames *et al.*, 1984; Bansal y Mukerji, 1994; Olsson *et al.*, 1996; Andrade *et al.*, 1998 y Gómez *et al.*, 2007).

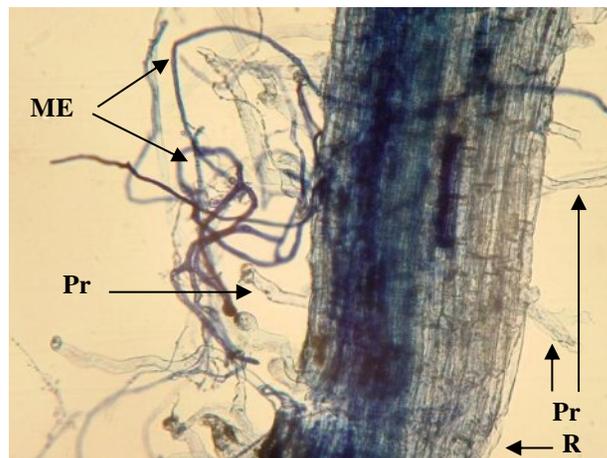
5. Las hifas de los hongos micorrícicos son considerados como contribuyentes a la estructura del suelo. (Degens *et al.*, 1994 y Reyes *et al.*, 2007).

- **Micelio Externo (ME) de los HMA**

Las hifas en el suelo o micelio externo (Figura 3), son responsables de la propagación de los HMA y la formación de esporas. El micelio se origina como parte del proceso de colonización con la germinación de las esporas, las cuales tienen una capacidad limitada para crecer, y mueren dentro de una semana o menos si no encuentran una raíz para colonizar (Brundrett, 2008).

Conforman una estructura filamentosa y ramificada en forma tridimensional, que le permite a la planta hospedera aumentar el volumen de suelo a explorar y por tanto, absorber agua y nutrientes que de otra forma no serían disponibles para la planta (Miller y Jastrow, 2000; Brundrett, 2008).

Figura 3. Micelio externo (ME) en raíz (R) de maíz. Se observa además, la presencia de abundantes pelos radicales (Pr).



Fuente: Mondragón, Ceballos y Sánchez de P., 2005

Sánchez de P. *et al.*, (2007), señala que “El ME posee hifas gruesas de más de 27μ de diámetro, y se caracterizan principalmente porque sirven de soporte y base temporal al tejido micelial en el suelo, aunque también pueden absorber nutrientes. Se les denomina hifas “runner”, que a su vez dan origen a hifas delgadas, 2 a 7μ de diámetro, que se dividen dicotómicamente y se extienden en

el suelo, cuya función se centra en la absorción de nutrientes para transportarlos a la planta hospedera, denominadas hifas absorbentes”.

El ME por longitud, expansión y grosor puede explorar los poros mas finos del suelo y extenderse más allá de la zona de agotamiento (Kabir *et al.*, 1998; Sánchez de P. *et al.*, 2007), permitiendo que la planta absorba nutrientes que sus pelos radicales o raíces son incapaces de absorber. También permite que cuando el ME muere, los nutrientes que lo constituyen se reciclen como materia orgánica biodegradable (Sánchez de P. y Velásquez, 2008).

En general se ha encontrado que la longitud del ME (m/gss) varía con la condición de suelo, cuanto más deficiente es nutricionalmente el suelo más va a depender de la red micelial para tomar los nutrientes. Las prácticas agronómicas también influyen su presencia, al igual que la materia orgánica del suelo, las plantas hospederas y las acompañantes (Reyes, 2001; Zárate *et al.*, 2006). Al respecto, Sánchez de P. y Velásquez (2008), registran la longitud de ME hallada en algunas investigaciones en suelos de Colombia tal como se observa en la Tabla 1.

Sylvia (1988) indica que para un mejor entendimiento del transporte de nutrientes a través del ME, la evaluación de su actividad micorrizal debería ser un indicador útil, pues dicho transporte requiere de un sistema de hifas vivas. Abdel-Fattah (2001) confirma que la identificación de enzimas como la fosfatasa alcalina (ALP) y la succinato deshidrogenasa (SDH), mediante tinción, resultaron útiles para evaluar la actividad micorrizal y su relación con la efectividad en la nutrición y el crecimiento de plantas de soya (*Glycine max*).

Además de la participación del ME en la nutrición de las plantas otros autores resaltan su influencia en la agregación del suelo, lo que es significativo pues dicha propiedad media en la fertilidad del suelo, su contenido de agua, la penetración de las raíces y su potencial de resistencia frente a la erosión y absorción de nutrientes (Labrador, 2001; Rillig y Mummey, 2006; Johnson *et al.*, 2007).

La abundante ramificación del ME y su organización en el suelo como telarañas lleva a que se establezcan redes que atrapan las partículas primarias de suelo (arenas, limos, arcillas) y la materia orgánica, para formar marañas con estos integrantes, dando origen a microagregados y posteriormente a macroagregados, unidades que definen la estructura del suelo (Beare *et al.*, 1997; Tisdall y Oades, 1982).

Tabla 1. Resultados de algunas investigaciones en suelos de Colombia.

Cultivo (s)	Longitud micelio externo (m/gss)	Variables significativa/m relacionada	Observaciones	Bibliografía
Barbechos mejorados (0-10 cm profundidad) <i>Calliandra calothyrsus</i> <i>Indigofera constricta</i> <i>Thitonia diversifolia</i> Rotación maíz-frijol Barbecho natural	35.33 ³ (27.6) ⁴ 34.8 (28.7) 30.6 (25.9) 30.7 (23.1) 40.4 (29.6)	Estabilidad agregados ≥ 2mm. Porosidad y densidad aparente (Da) ⁵	(Finca en Pescador, Cauca) P disponibles en estos suelos: 7.5 a 13.3ppm	Torres <i>et al.</i> , 2007 Reyes <i>et al.</i> , 2007
<i>Melinis minutiflora</i> (90 días-invernadero)	Suelo sin desinfectar: 1.6 Suelo desinfectado: 0.4	Formación de agregados estables al agua	P disponible: 0.8 ppm	Zárate <i>et al.</i> , 2007
<i>Brachiaria dictyoneura</i>	Presencia de glomalina	Estabilidad de agregados	(Invernadero)	Muñoz y Ramírez, 2007
<i>Passiflora edulis</i> (plantas adultas)	M ⁶ .Agroecológico: 4.6 M.transición:4.4 M. químico: 3.1		P≥60 ppm Suelos del norte del Valle (en campo)	Vargas, Sánchez de P., Gómez, 2005
<i>Calliandra houstoniana</i> var. <i>Calothyrsus</i> <i>Cratylia argentea</i> <i>Thitonia diversifolia</i> Sin cobertura	17.5 18.4 20.2 13.8		Santander de Quilichao (Cauca) P: 59.2 ppm P: 64.8 ppm P: 58.3 ppm P: 56.7 ppm	Navia, Barrios, Sánchez de P. 2006
Café con cobertura media Libre exposición	Finca 1: 5.1 Finca 2: 7.4	Materia Orgánica N Agregación del suelo P disponible Da	F1:Eucaliptos (Cauca) P: 4.4. ppm F2:El Olvido (Cauca) P: 1.8 ppm	Paz, Sánchez de P., Sadeghian, S. 2006
Maíz con diferentes dosis de vinazas	6.9 (Testigo) 15.1 (50% Vinaza) 10.4 (100% Vinaza) 6.1 (Testigo)		(Invernadero)	Velásquez, Sánchez de P. 2008

Fuente: Sánchez de P. y Velásquez, 2008.

³Al año de establecidos los barbechos en el campo. ⁴Cifras en paréntesis corresponden a resultados a los 26 meses de establecidos los barbechos. ⁵Variables afectadas en estos cultivos. ⁶M. indica el manejo agronómico del cultivo.

Rillig y Mummey (2006), destacan tres mecanismos de los HMA que podrían influir en la agregación del suelo: biológicos, biofísicos y bioquímicos. Los primeros se relacionan con la influencia que tienen los HMA sobre otros microorganismos del suelo, en la medida en que los productos generados por los HMA sirven como sustrato para las comunidades microbianas que también actúan sobre la agregación de partículas (Rillig y Mummey, 2006; Abiven *et al.*, 2007).

Los mecanismos biofísicos implican que las hifas, al igual que las raíces de las plantas, actúan como marañas, que físicamente unen partículas primarias del suelo, materiales orgánicos y pequeños agregados facilitando la formación de macroagregados (Beare *et al.*, 1997; Miller y Jastrow, 2000 y Rillig y Mummey, 2006).

Los mecanismos bioquímicos hacen referencia a compuestos que actúan como pegante, por ejemplo mucilagos, polisacáridos y glicoproteínas (Beare *et al.*, 1997; Miller y Jastrow, 2000; Rillig y Mummey, 2006 y Velásquez, 2009); los cuales pueden ser secretados al suelo o contenidos en las paredes de las hifas que finalmente serán descompuestas liberando sus contenidos (Tisdall y Oades, 1982).

- **Absorción de nutrientes**

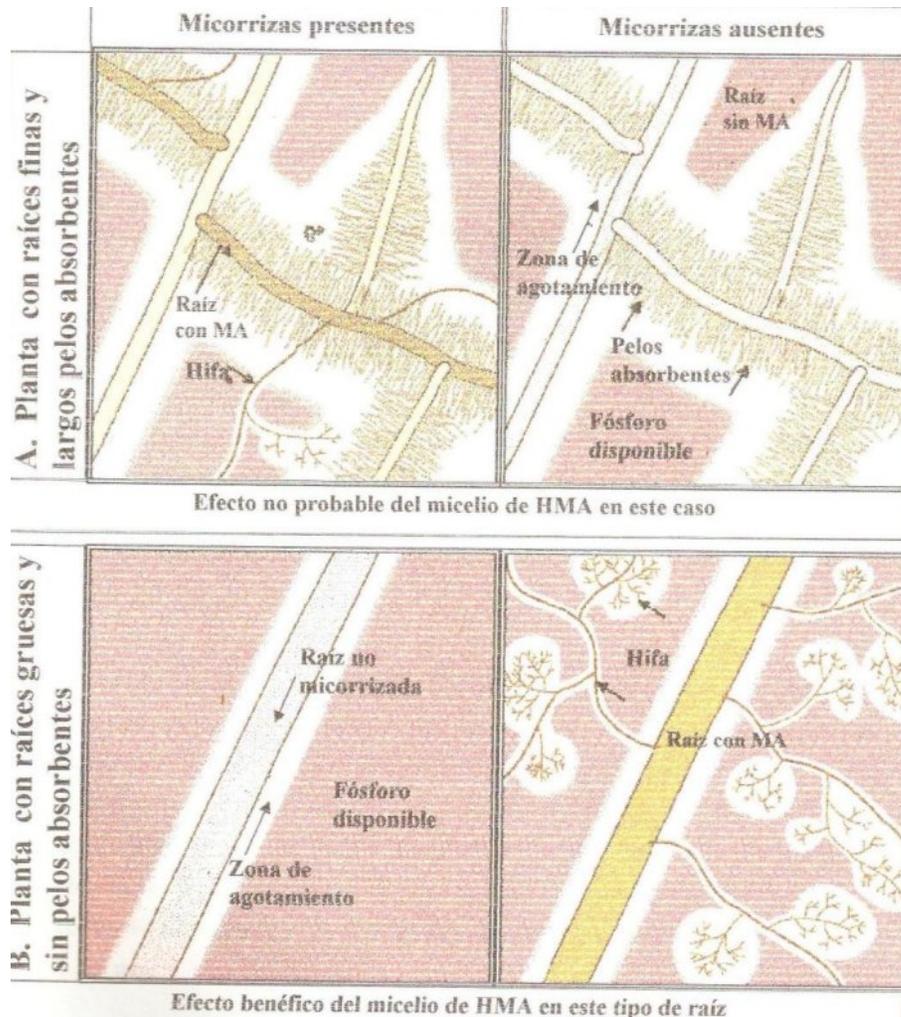
El mayor beneficio que las hifas de HMA da a las plantas es el aumento en el volumen de suelo explorado (Genney *et al.*, 2001; Sánchez de P. y Gómez 2003), que se expresa en el crecimiento de la planta por el incremento en la adquisición de iones poco móviles y por tanto no disponibles en el suelo (Marschner y Dell, 1994; Sánchez de P. *et al.*, 2007). De esta forma, el micelio es fundamental en la transferencia de nutrientes que se difunden lentamente en el suelo hasta las raíces y que se consideran críticos para la planta, como el fósforo (Abbot y Robson, 1985; Sánchez de P. y Velásquez, 2008).

Poco se conoce sobre la zona donde los nutrientes son tomados por el ME; (Silvia 1988; Sánchez de P. y Velásquez, 2008), observó que el máximo fósforo que toma la micorriza ocurre a varios centímetros de la superficie de la raíz en las delgadas hifas jóvenes.

La demanda de determinados nutrientes minerales depende de los requerimientos internos de la planta, mientras que el abastecimiento principal de nutrientes depende de la disponibilidad y movilidad en los suelos (Brundrett *et al.*, 1996; Sánchez de P. *et al.*, 2010b). Los nutrientes minerales tales como el fósforo (Figura 4) tienen una muy limitada movilidad en los suelos así que se originan zonas de agotamiento donde todo el nutriente disponible alrededor de las raíces, se consume rápidamente por la planta y se origina una situación de déficit. Entonces, para obtener más fósforo, las plantas rodean las zonas de agotamiento e incrementan la actividad radical y simbiótica de la MA, el micelio externo entonces forma especies de sifones, con los cuales suple la deficiencia momentánea. El resultado de esta búsqueda de fósforo y de otras fuentes relativamente inmóviles de suelo puede ser determinado por el área superficial del sistema radical de la planta. Así, el efecto más importante de las hifas de los hongos micorrícicos (HMA) es extenderse sobre el área superficial de las raíces y

tejer puentes que conectan las zonas de agotamiento con otras de aprovisionamiento (Brundrett *et al.*, 1996 y Sánchez de P. *et al.*, 2007).

Figura 4. Posible zona de agotamiento de nutrientes para las plantas y efecto del micelio externo de HMA, planteada por Brundrett *et al.*, (1996).



Esta estrategia hace que las plantas micorrizadas, a través del micelio de HMA, se encuentren en mejor disposición para soportar condiciones ambientales adversas, tales como la insuficiente nutrición del suelo, la adversidad del ambiente como las altas temperaturas y sequía, entre otros.

El fósforo es absorbido para ser transferido a través de la hifa como polifosfato y liberado a la planta en la interfase arbuscular, sin embargo, el mecanismo interno de transporte a través de la hifa aun no ha sido confirmado (Harrison, 1999; Sánchez de P. y Velásquez 2008).

3.2.1.1 Factores que afectan el desarrollo del micelio externo (ME)

Las múltiples interacciones ecológicas que ocurren en el suelo son responsables del comportamiento del micelio de HMA y explican las diferencias observadas en la respuesta de las plantas a la inoculación con HMA bajo condiciones controladas, en comparación con la inoculación en el campo. El desarrollo del micelio se puede ver afectado por el comportamiento de los diferentes factores ambientales: a) abióticos: propiedades físico-químicas del suelo como temperatura, pH, variaciones climáticas, entre otras y, b) factores bióticos: relacionados con la comunidad vegetal, condiciones fisiológicas de la planta hospedera, interacciones con otros organismos del suelo, prácticas agronómicas inadecuadas deforestación, sistemas de monocultivo, aplicación de agroquímicos, entre otros (Silvia, 1988; Guerrero, 1996 y Sánchez de P., *et al.*, 2007).

Según Torres (2000), la diversidad de especies vegetales posibilita encontrar mayor densidad de raíces a diferentes profundidades e incrementos en la materia orgánica en el suelo, los cuales influyen positivamente en la actividad de los HMA y en la longitud del ME.

Este mismo autor sostiene que las características químicas de los suelos juegan también papel importante en el desarrollo del ME. Por ejemplo, alta disponibilidad de P puede ser negativa para la simbiosis, pero la deficiencia de este elemento (entre 2.3 y 3 ppm, encontrados en su investigación), también disminuyeron el desarrollo de ME en los suelos.

Reyes (2001), coincidió con registros de Sylvia (1992), al encontrar que la integridad del ME puede ser comprometida y la cantidad de hifas intactas ser drásticamente reducida por el disturbamiento del suelo.

El pH es otra propiedad a la cual las especies de HMA responden en forma diferente, por ejemplo *Glomus* sp. Es infectiva en un amplio rango de pH de 5.3 a 7.5 y, cuando el pH se reduce considerablemente, puede inhibirse la producción de ME. Hay nutrientes que interactúan entre sí, tal es el caso del cobre, cuando su disponibilidad crece en forma considerable, se reduce la absorción de P, lo cual, aparentemente, está estrechamente relacionado con la inhibición de las hifas en la rizosfera (Silvia, 1988 y Martín *et al.*, 2009).

3.2.1.2 Algunos estudios sobre ME

Torres (2000), estableció dos experimentos (campo e invernadero) con el fin de estimar la longitud de ME de HMA (método de Miller y Jastrow, 1992). En condiciones de barbecho natural se presentó la mayor longitud de ME, frente a

tratamientos con barbechos mejorados (*Indigofera constricta*, *Calliandra calothyrsus* y *Tithonia diversifolia*), asociando este fenómeno a la variada composición botánica presente en el barbecho natural, ya que ello permitió la mayor diversidad radical con mejor distribución en la superficie del suelo.

En el experimento realizado en invernadero encontró la mayor longitud de ME con HMA nativos y la menor, en aquellos tratamientos donde el suelo se desinfectó. Corroboró además que el ME de HMA incrementa la absorción de nutrientes a través de la exploración de un mayor volumen de suelo y, en asocio con las raíces, mejora algunas propiedades físicas en suelos degradados tales como: densidad aparente, densidad real, conductividad hidráulica, macroporosidad, estabilidad de agregados mayores de 2 mm y entre 0.25 – 0.125 mm.

Reyes 2001, estudió la influencia del ME de HMA en la bioagregación del suelo, así mismo, incluyó en su estudio la evaluación de diferentes pretratamientos a las muestras de suelo antes de la extracción y estimación de ME. Estableció que cuando se usan para la extracción, muestras húmedas y recién colectadas, se incrementan los valores estimados de longitud de ME. Confirmó la importancia del ME de HMA en la formación y estabilización de macroagregados en el suelo, tal como lo había registrado (Torres, 2000).

3.2.1.3 Micelio activo de los HMA

Las tinciones cotidianas hacen visibles la presencia de los HMA al interior o exterior del tejido radical colonizado, y permiten estimar lo que se ha llamado micelio total presente en las muestras, los cuales pueden ser cuantificados, por ejemplo en medidas longitudinales (cm) o porcentaje (%) de raíz colonizada.

En la realidad, del micelio total observado en un momento dado, sólo un porcentaje está participando activamente en la absorción de P y posterior traslado del P al tejido radical. En dicha función metabólica en los HMA, íntimamente ligada al ciclo de Krebs (ciclo de los ácidos tricarbónicos ó del ácido cítrico), participa una enzima denominada succinato-deshidrogenasa, cuya presencia indica que el micelio está vivo y hay síntesis de ATP (Sánchez de P. *et al.*, 2010). Las tinciones con azul de tripano o tinta vinagre, no brindan esa separación entre micelio total y micelio activo (vital).

Sin embargo, la actividad de dicha enzima se puede visibilizar a través de la aplicación de la tinción vital NBT-succinato, la cual permite distinguir por coloración a través del microscopio óptico, la presencia de esos sitios activos, tanto en el micelio externo como en el interno.

Con la tinción vital, además de obtener información sobre cuánto micelio total está participando activamente en la absorción de P, también puede ser indicador de los cambios que ocurren en el suelo cuando se aplican altas cantidades de fertilizantes de síntesis química industrial en los agroecosistemas. Normalmente, con excesos de fertilización, los porcentajes de colonización total por HMA disminuyen considerablemente, pero el micelio activo es aún más sensible a detectar esta situación, el cual, se afecta en forma negativa y altamente significativa (Sánchez de P. 1999, 2003; Sánchez de P. *et al.*, 2007).

Algunos autores señalan que la tinción vital es indicadora de actividad, pero no lo es de efectividad del micosimbionte sobre los hospederos, ni separa entre especies de HMA actuando bajo condiciones de diversidad en campo (Sánchez de P. *et al.*, 2010).

3.2.2 Los arbusculos como espacios de intercambio plantas - HMA

En trabajos de Vélez, (2008), se ha observado que las hifas de los HMA alcanzan las células de la corteza radical media, se ramifican y crecen longitudinalmente en el interior de los espacios intercelulares (Figura 5). El desarrollo longitudinal continúa y posteriormente algunas de estas hifas penetran al interior de las células, donde emiten se ramifican en forma dicotómica una y otra vez y dan origen a los arbusculos (Figura 6).

Figura 5. Tubo germinativo de hifa interna de HMA.

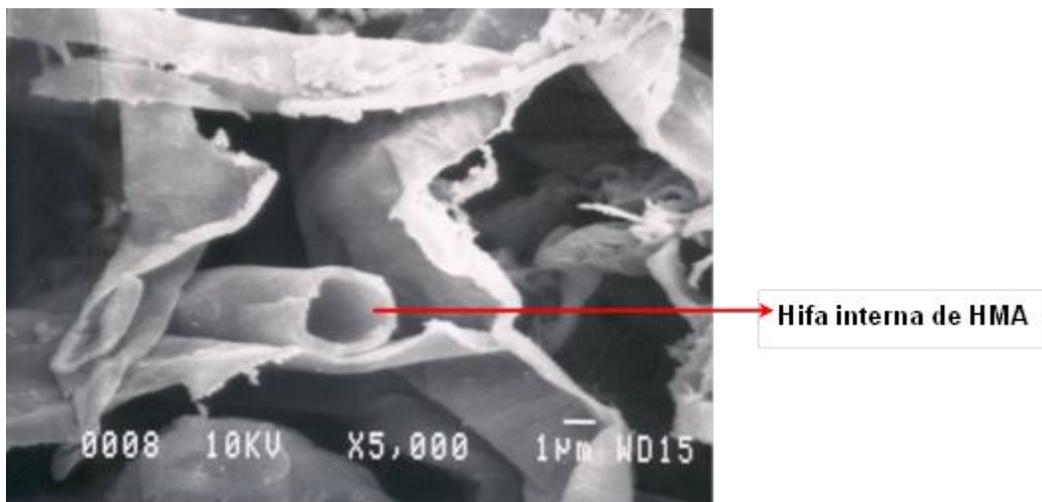


Foto: Vélez, 2008

Figura 6. Forma del arbusculo en la célula de la raíz.

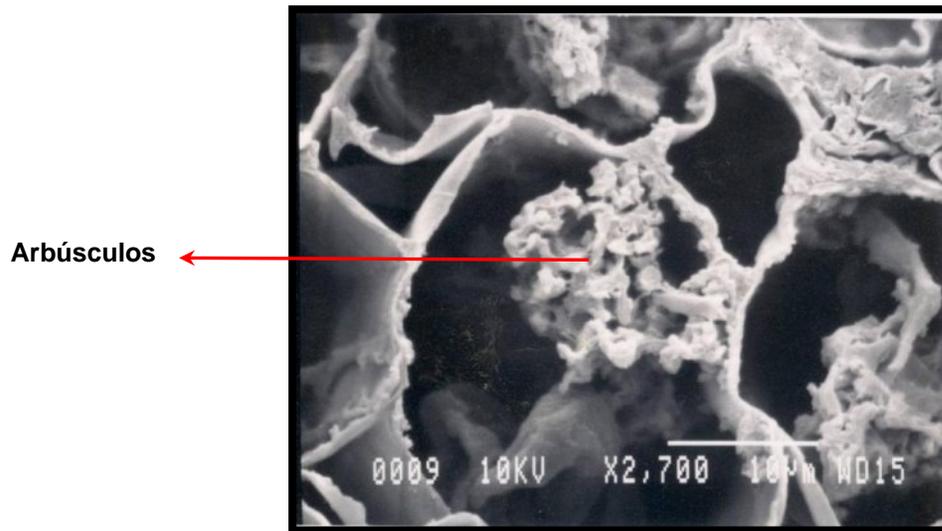


Foto: Vélez, 2008

Sánchez de P, (1999, 2007) sostiene que cuando la hifa penetra para formar el tronco principal del arbusculo, el plasmalema del hospedero la rodea, y en la medida que dicha estructura se bifurca y emite ramas más delgadas, queda envuelta totalmente; esto ocasiona que la membrana citoplasmática de la planta colonizada se expanda considerablemente y proporcione en esta forma una extensa superficie de contacto entre los simbioses.

En el arbusculo ocurren modificaciones en la estructura y arquitectura de la pared del HMA y de la planta, se desarrolla actividad enzimática. Estos cambios buscan facilitar el proceso de transferencia de nutrimentos entre los simbioses y su ocurrencia refleja una vez más la elevada compatibilidad anatómica y fisiológica entre los organismos asociados (Sánchez de P. 1999, 2003; Sánchez de P. *et al.*, 2007).

La vida media de un arbusculo se ha estimado entre 4 y 15 días aproximadamente. Su senescencia se marca por desorganización del citoplasma en las ramas más finas, se torna amorfo y sus organelas no se distinguen; ocurre colapso de sus paredes y membranas, las cuales se van sellando por tabiques en la medida que dejando de funcionar. Cuando el arbusculo se degrada totalmente, la célula del hospedero recupera su estructura y función normales.

Los patrones de crecimiento fungal son influenciados por la planta hospedante y dos patrones principales de colonización han sido descritos, uno llamado "*Arum*" y otro "*Paris*" (Smith y Smith, 1997; Sánchez de P. *et al.*, 2007). En el tipo llamado "*Arum*" los hongos crecen intercelularmente hasta alcanzar la región cortical

interna. Allí el HMA penetra las células corticales para formar hifas ramificadas terminadas en arbusculos.

La otra colonización morfológica, llamada tipo “*Paris*” consiste de extensas espirales intracelulares en las células corticales. Pequeños arbusculos ocasionalmente originados a partir de las espirales no son lo suficientemente extensos para ser los responsables del cambio de nutrientes. En este tipo de interacción ha sido sugerido que la interfase celular intracelular espiral/cortical puede ser significativa en el cambio de nutrientes (Smith y Smith, 1997; Sánchez de P. *et al.*, 2007). El tipo *Arum* ha sido más frecuentemente estudiado, probablemente por que ocurre en muchas de las plantas cultivadas y algunas especies usadas en experimentos de laboratorio.

3.3 EL CULTIVO DEL MAÍZ

El maíz es uno de los cultivos cereales con mayor utilización no sólo como alimento humano y animal, sino también en innumerables usos industriales. En Colombia el consumo directo como grano seco o verde aquel que no ha alcanzado la madurez fisiológica del grano, es de vital importancia ya que representa un 12% de la producción nacional y es utilizado por nuestros campesinos en diferentes usos (Gutiérrez, 2003).

Para el año 2010 se estimó que la producción de maíz fue de 3,6 toneladas por hectárea, el promedio del costo de producción de una hectárea de maíz amarillo tecnificado se encontró alrededor de \$ 1.505.466 y, el costo por tonelada asciende a \$ 488.608 de los cuales el costo unitario de producción de insumos correspondientes para ese año fue del 30% y de este porcentaje, la fertilización equivale al 45 – 47% aproximadamente.

Este cereal ha merecido gran número de estudios agronómicos en el campo de la fertilización en el Departamento del Valle del Cauca, sin embargo, a pesar de la existencia de tecnologías para producir altos rendimientos por unidad de área, se requieren adicionalmente estudios, cuya aplicabilidad permitan asociar la efectividad de abonos, enmiendas sobre las propiedades físicas, químicas, biológicas del suelo, sobre rendimiento, rentabilidad y se calculen nuevas variables como por ejemplo, costo energético asociado a cada manejo agronómico (Funes, 2012).

La búsqueda en lo tecnológico se enfoca a encontrar fuentes orgánicas, minerales que no solamente contribuyan al incremento de los rendimientos y las producciones agrícolas, sino también al mejoramiento de las propiedades de los suelos; no obstante, la aplicación de estos productos puede tener un efecto positivo (fertilizante), que involucra un impacto ambiental en el sistema.

Para los propósitos de conservación de las propiedades físicas, químicas y biológicas existen diversas alternativas, entre ellas el uso de materiales con buenas características, los cuales se pueden adaptar a cada predio según su entorno; dichos materiales aplicados en forma directa o en mezcla con fertilizantes de síntesis, logran buenos resultados en la producción y mejoramiento de las propiedades del recurso suelo (www.campo.com; manejo de la fertilización de Maíz).

En los sistemas agrícolas el ciclo de la materia orgánica se ve fuertemente alterado por las exportaciones realizadas por la biomasa de la cosecha, por lo que es necesario restituir al suelo los nutrientes minerales mediante técnicas de fertilización orgánica y/o mineral. Con el fin de minimizar la pérdida de fertilidad del suelo, la biomasa vegetal restante (residuos) debe ser devuelta directa o indirectamente al suelo, mediante la aplicación de aquellos tratamientos que faciliten su integración a la dinámica edáfica. (www.infoagro.com).

El uso continuo de maquinaria, en un mismo sistema, ha traído como consecuencia, la compactación de los suelos, que a su vez incide en la mala aireación, problemas de drenaje, compactación de suelos, erosión disminución de la microfauna y por tanto elevación de costos, por eso se plantean alternativas al manejo tradicional. (Gutiérrez, 2003).

El maíz tradicional sembrado en Colombia, es de una altura que fluctúa entre 3-4 metros. Para estos maíces la población ideal es alrededor de las 55.000 plantas por hectárea, en la ladera donde se siembra a chuzo la densidad es más baja por que la distancia entre surcos depende de la pendiente del terreno y no siempre pueden establecer distancias uniformes entre surcos. (Gutiérrez, 2003).

Variedades mejorada como ICA V-354 presenta unas ventajas especiales para los agricultores de ladera como lo es el bajo costo de semillas, son cultivares bien adaptados y con buen potencial de rendimiento y el agricultor puede utilizar su propia semilla. (Gutiérrez, 2003).

La variedad ICA V-354 es recomendada para zonas entre 1200 y 1600 msnm tiene una altura promedio de 2.18 m., y florece a los 70 días, la madurez fisiológica esta entre los 130-140 días y el rendimiento es aproximadamente de 4.358 Ton/Ha (ICA, 2003).

Algunos trabajos de investigación se han desarrollado sobre sus efectos químicos y físicos en el suelo. Sin embargo, se desconoce su influencia en los componentes biológicos por lo cual es necesario evaluar la dinámica biológica del suelo y presencia de actividad de los microorganismos, que son un indicador que permite inferir sobre los diversos factores que afectan el equilibrio del suelo con relación a los cultivos.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

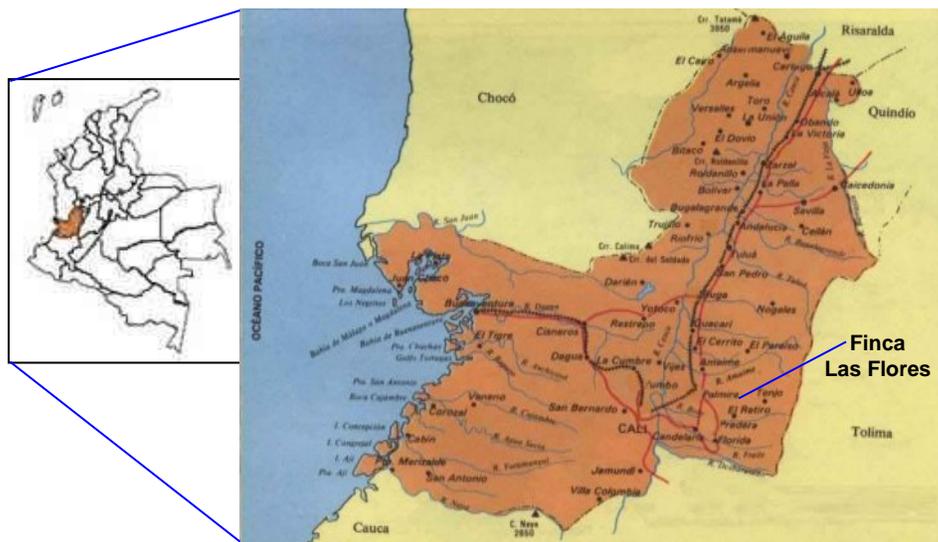
La presente investigación se realizó en el marco del programa de investigación en Agroecología, dentro del proyecto “Los abonos verdes como estrategia agroecológica y ambiental en agroecosistemas del Valle del Cauca”, adelantado en la Universidad Nacional de Colombia.

Para cumplir con los objetivos propuestos se planificó un estudio con un ciclo de cultivo de maíz (*Zea mays* L.), sujeto a la incorporación de dos AV, la leguminosa Canavalia (*Canavalia ensiformis* L.) y la gramínea Pasto Imperial (*Axonopus scoparius* F.) aplicados en forma individual o combinados con fertilización orgánica y/o química.

4.1 LOCALIZACIÓN

El presente estudio se realizó en la finca Las Flores del departamento del Valle del Cauca (Figura 7), la cual se ha escogido por haber adoptado sistemas de producción agroecológica en forma permanente.

Figura 7. Localización geográfica del sitio de estudio.



Fuente: Vélez, 2008

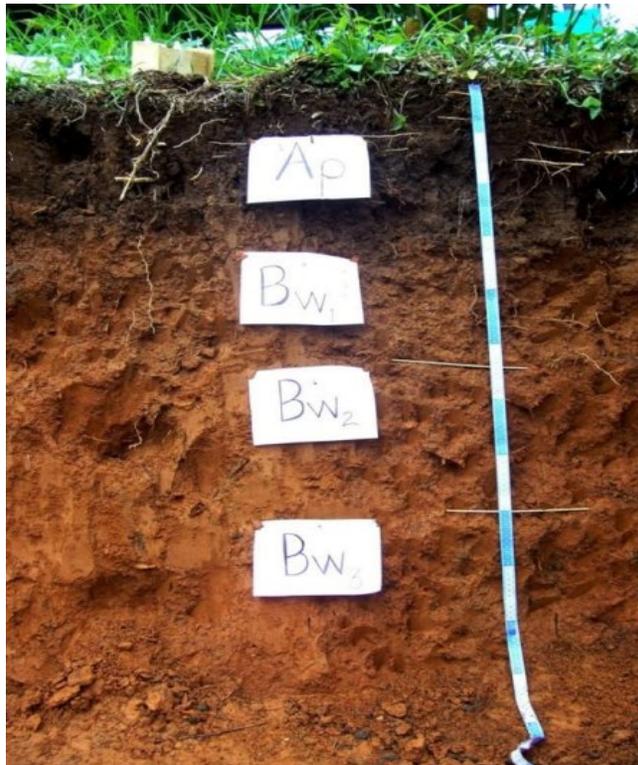
La finca Las Flores, Vereda El Mesón, corregimiento de Chontaduro, Municipio de Palmira, Departamento del Valle del Cauca, Colombia. Está georeferenciada bajo las coordenadas 03° 30' 1,4" N y 76° 11' 0,2" W, ubicada a una altura de 1713 m.s.n.m., con temperatura media anual de 20.8 °C, precipitación media anual de 1396 mm/año y humedad relativa media anual del 74.4% (CVC, 2006).

Sus propietarios Adolfo Carvajal y Gladys Pomeo practican agricultura ecológica desde hace diez años. Sus principales productos son plátano, maíz, frijón, tomate, habichuela y especies menores como cerdos y gallinas. La comercialización la realizan dentro del mercado agroecológico “Surcando Sueños” que se organiza quincenalmente en la ciudad de Palmira, apoyado por la CVC.

4.2 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

La caracterización taxonómica del suelo de la finca Las Flores, la efectuó la doctora Yolanda Rubiano⁴ (Anexo 1). El suelo predominante es del orden Inceptisol, con perfil *Humic Dystrudepts* (USDA Clave taxonómica Undécima edición, 2010), descrito así: presenta un epipedón úmbrico, que descansa sobre un endopedón cámbico, con predominio de arcillas 1:1. La saturación de bases es mayor del 50% y un horizonte con altos contenidos de M.O., un tanto atípica para su orden, el régimen de humedad es údico influenciado por una precipitación media anual de 1396 mm. La textura del suelo dentro de sus primeros 30 cm es arcillo limoso y contiene fragmentos de grava fina. Presenta una pendiente del 30% clasificada como escarpada. En la figura 8, se ilustra la calicata del suelo en estudio.

Figura 8. Calicata del suelo en estudio.



⁴ Profesora asociada de la Universidad Nacional de Colombia. Identificación efectuada “in situ” en el año 2010

4.3 DISEÑO DE TRATAMIENTOS

Para alcanzar los objetivos propuestos se diseñaron los siguientes tratamientos:

T1 (TA): Testigo absoluto: cultivo de maíz con manejo local, sin adición de fertilizantes, abonos verdes o cualquier tipo de compost o enmienda.

T2 (Q): Sistema de cultivo de maíz con fertilización química.

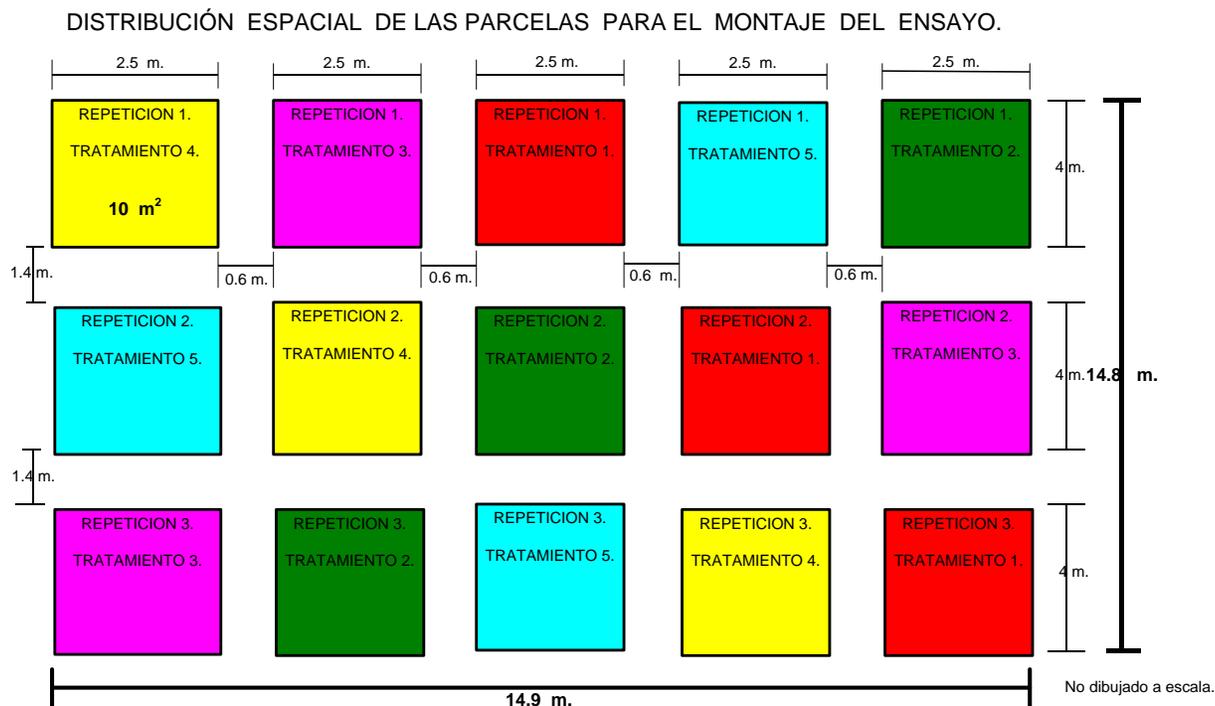
T3 (AV): Sistema de cultivo de maíz con incorporación de AV.

T4 (C): Sistema de cultivo de maíz con incorporación de compost.

T5 (AVC): Sistema de cultivo de maíz con incorporación de AV y compost.

Los tratamientos se organizaron en un diseño experimental en bloques completos al azar (BCA) con tres repeticiones. El arreglo de los bloques se estableció en sentido perpendicular a la pendiente. La separación entre tratamientos fue de 0.6m y entre bloques, de 1.4m. El tamaño de la parcela experimental fue de 10m², teniendo en cuenta la densidad de siembra y el efecto de bordes. El área total del experimento fue de 220.52 m², con un área útil de 150 m². La ubicación espacial de los tratamientos se observa en la Figura 9.

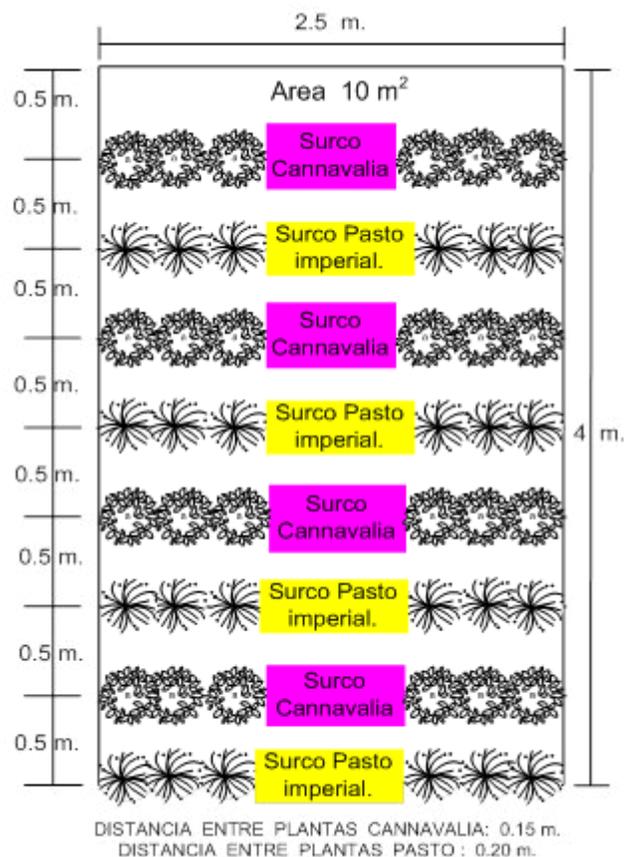
Figura 9. Distribución espacial de los tratamientos en el ensayo.



El área donde se realizó el ensayo correspondió a un lote en barbecho por más de tres años⁵, el cual, se intervino mediante una roza a machete, evitando disturbar la superficie del suelo. Posteriormente, se realizó una limpieza manual de los residuos vegetales, con el fin de establecer las parcelas experimentales.

Como abonos verdes (AV) se utilizaron: la leguminosa Canavalia (*Canavalia ensiformis* L.) y la gramínea Pasto Imperial (*Axonopus scoparius* F.). La siembra de los AV se efectuó a 0.5 m entre surcos para ambas especies. La distancia entre plantas fue de 0.15 m para *C. ensiformis* L. con densidad de siembra de 133.332 plantas/ha (Figura 10). Para *A. scoparius* F. fue de 0.20 m. con densidad de 100.000 plantas/ha.

Figura 10. Distancias de siembra de los dos AV en cada unidad experimental.



Al inicio de la floración de la leguminosa (70 dds), los AV se incorporaron con azadón en los tratamientos respectivos (Figuras 11 y 12) y, ocho días después de este proceso se hizo siembra directa del maíz.

⁵Carvajal, A. 2009, comunicación personal. Finca Las Flores.

Figura 11. Los AV antes de la floración (70 dds).



Figura 12. Incorporación de los AV en los tratamientos correspondientes.



Compost

Se utilizó el compost elaborado en El Bolo en la finca de Elizabeth Martínez, al cual se realizaron análisis químico de C-total, N-Total, P-total, K, Ca, Mg, S-total, B, Fe, Mn, Cu, Zn (Benton, 1993; Mackean, 1993). Las evaluaciones del suelo y del compost se realizaron en el laboratorio de servicios analíticos CIAT.

Maíz

Como material de siembra de maíz se usó la variedad ICA V-354, de color blanco, de la casa comercial Semillas La Calidad. Según indicaciones del productor obtenidas en el rotulo del empaque, este material vegetal alcanza rendimientos de 4500 a 5500 Kg/ha. Tiene un rango de adaptación de 0 a 1600 m.s.n.m. y un periodo vegetativo de 160 a 170 días (seis meses aproximadamente) en zonas de ladera⁶.

Se sembró por el método de siembra directa a razón de tres semillas/sitio (pregerminadas por un periodo de 48 horas). La distancia de siembra utilizada fue de 0.80 m entre surcos y 0.25 m entre plantas, para una densidad de siembra de 50.000 plantas/ha, empleada por los agricultores en esta zona⁷. El área experimental útil de maíz comprendió cinco surcos.

En el tratamiento que llevaba fertilizante de síntesis química (TQ), la aplicación se realizó en cuatro etapas del cultivo de maíz: al momento de la siembra, a los 25, 45 y 90 dds (Días Después de Siembra), fraccionando las dosis en partes iguales, como se muestra en la Tabla 2. Las cantidades de fertilizantes aplicadas correspondieron a los requerimientos nutricionales del maíz y al aporte de N, P, K, de la fuente utilizada (10-30-10).

Tabla 2. Dosis de aplicaciones de fertilizantes en épocas del cultivo.

TT	Época de aplicación	Fertilizante	% del Elemento	Dosis g/planta
TQ	1° Fertilización al momento de siembra.	10-30-10	N 30 P 100 K 70	4
	2° Fertilización 25 dds.	Urea KCl	N 35 K 30	5 5
	3° Fertilización 45 dds.	Urea	N 35	5
TC	Al momento de la siembra. Se aplicó en banda al lado de la semilla	Compost		6 kilos de Compost/Parcela
Todos	4° Fertilización 90 dds.	Shi-3 + Elementos menores		100 cc de Shi-3 + 5 g de elementos menores en 20 L de agua/bloque para 5 parcelas

⁶ Gallego, J. 2010, comunicación personal.

⁷Carvajal, A. 2009, comunicación personal. Finca Las Flores.

El compost utilizado se analizó e incorporó en los tratamientos respectivos (T4 y T5) a razón de 6 Kg/parcela (18 Kg/tratamiento). En cuanto a los AV se incorporaron en T3 y T5, a razón de 11.2 Kg/parcela (8.4 Kg de leguminosa y 2.8 Kg de gramínea), para un total de 33.6 Kg/tratamiento de AV. En T5 la mezcla de AV+C sumó 17.2 Kg/parcela, para un total de 51.6 Kg/tratamiento. El compost se aplicó en banda y se incorporó con rastrillo (Figura 13).

Figura 13. Incorporación de Abonos Verdes + Compost. (AVC).



4.3.1 Variables a evaluar

Variables físico-químicas: Para realizar la caracterización físico-química completa del suelo se tomaron dos muestras compuestas de suelo, a 20 cm de profundidad, al inicio del ensayo (antes de la siembra de los AV) y al final del ciclo de cultivo de maíz (150 dds). La caracterización física se realizó en los Laboratorios de Física de suelos de la Universidad Nacional de Colombia – Palmira y los parámetros químicos, en el Laboratorio de Servicios analíticos del CIAT. Las variables y metodologías utilizadas se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Metodologías utilizadas para el análisis físico- químico del suelo.

PARÁMETRO	METODOLOGÍA A APLICAR	COMPILACIÓN
pH	Potenciometría.	CIAT, 2006.
Conductividad eléctrica CE.	Potenciometría.	CIAT, 2006.
Carbón orgánico % (materia orgánica)	Volumetría Espectrometría molecular (Autoanalizador) Walkey – Black.	CIAT, 2006.
Fósforo (P)	Espectrometría molecular (Autoanalizador Murphy-Riley). Bray II u Olsen modificado.	CIAT, 2006.
Cationes Cambiables (pH<5.5) Al K Ca, Mg	Volumetría. Espectrometría de emisión atómica. Espectrometría de absorción atómica.	CIAT, 2006.
Micronutrientes (Cu, Zn, Mn, Fe)	Espectrometría de absorción atómica. Martens y Lindsay, 1990.	CIAT, 2006.
Cationes cambiables (pH>5.5) K, Na Ca, Mg	Espectrometría de emisión atómica. Espectrometría absorción atómica.	CIAT, 2006.
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Volumetría (NaOH 0.1N). En acetato de amonio 1N.	CIAT, 2006.
Azufre (S)	Turbidimetría. Extracción con fosfato de calcio (Wall <i>et al.</i> , 1980).	CIAT, 2006.
Boro (B)	Espectrometría molecular Manual. Extracción con agua caliente (Mahler <i>et al.</i> , 1984)	CIAT, 2006.
Molibdeno (Mo)	Espectrometría de horno de grafito. Extracción de oxalato acido de amonio (Kubota y Cary, 1982).	CIAT, 2006.
Densidad Aparente (Da)	Método del cilindro biselado.	Citado por (Jaramillo, 2002).
Densidad Real (Dr)	Método del picnómetro.	Descrito por (Montenegro y Malagón, 1990).
Textura	Hidrómetro o Bouyoucus.	Pansu y Gautheyrou, 2006.
Estabilidad de Agregados (EA)	Método de tamizado en húmedo o método de Tulin, modificado por Yoder.	Descrito por Montenegro y Malagón (1990).

Variables biológicas: Componentes de HMA: Se efectuaron tres muestreos: antes de la siembra del maíz (asm), a los 36 días después de siembra (36 dds), época de llenado de mazorca (90 dds). Las variables estimadas en cada muestreo fueron: longitud de ME (LME), ME vivo y activo (MEV), porcentaje de colonización por arbusculos, acompañadas de la variable física estabilidad de

agregados (EA). Cada una de ellas fue estimada a partir de tres repeticiones (Tabla 4).

Tabla 4. Variables biológicas y físicas evaluadas en tres muestreos.

Variables	Antes de la siembra (asm)	Antes de floración (36 dds)	Época de llenado de mazorca (90 dds)
Longitud de micelio externo (LME) Técnica del filtro de membrana y método del intercepto (gridline) de Miller y Jastrow (1992) y cálculos de Tennant (1975).	X	X	X
Micelio externo vivo y activo (MEV) Hamel <i>et al.</i> , 1990, modificada según protocolo del Instituto Canario de Investigaciones Agrarias, Santa Cruz de Tenerife, España (2007).			X
Porcentaje de colonización por arbusculos (Phillips y Hayman, 1980, descrita por Sieverding, 1983), adaptada para este cultivo (Sánchez <i>et al.</i> , 2010).			X
Estabilidad de agregados (EA) Método de Tulin, modificado por Yoder y descrito por Montenegro y Malangón (1990)			X

➤ **Longitud de micelio externo (LME)**

Para la extracción y cuantificación de LME se empleó la técnica del filtro de membrana (Miller y Jastrow, 1990, modificada por Torres, 2000 y Reyes, 2001). LME se estimó por el método del campo de intercepto “grid line” y los cálculos se realizaron por el método de Tennant (1975), descritos y adaptados por Torres (2000) y Zárte (2006), considerando las dimensiones específicas para el microscopio y equipo de filtro usado.

Este proceso se inició con la dispersión de 5 g de suelo en hexametáfosfato de sodio al 5%, posterior lavado con 500 ml de agua deionizada usando tamiz de 25 μ , dilución de la muestra para facilitar su observación al microscopio y finalmente recolección del micelio en un equipo de filtración al vacío con filtros de nitrocelulosa de 1.2 μ , con posterior tinción del micelio con tinta Sheaffer al 5% para facilitar la cuantificación de LME en términos de m/gss (metodología descrita por Sánchez de P. *et al.*, 2010).

➤ **Longitud de micelio externo vivo y activo (LMEV)**

Esta tinción que permitió estimar la LMEV, es decir, aquel que participa activamente en la absorción y transporte de P, se ha basado en la coloración de espacios celulares específicos en los cuales, la succinato – deshidrogenasa (complejo enzimático que hace parte del ciclo de Krebs) al reaccionar con una solución incubadora que contiene succinato de sodio y azul de tetrazolio (Sánchez de P. *et al.*, 2010), se torna de coloración rojiza e indican que allí esta ocurriendo transporte de P (Anexo 2). Se realizó siguiendo la metodología de Hamel *et al.*, (1990), modificada en el Instituto Canario de Investigaciones Agrarias, Santa cruz de Tenerife, España 2007.

➤ **Porcentaje de colonización total por HMA y por arbusculos**

Se siguió la metodología descrita por Sieverding (1983), Sánchez *et al.*, 2010, con las adaptaciones requeridas para el cultivo de maíz, así:

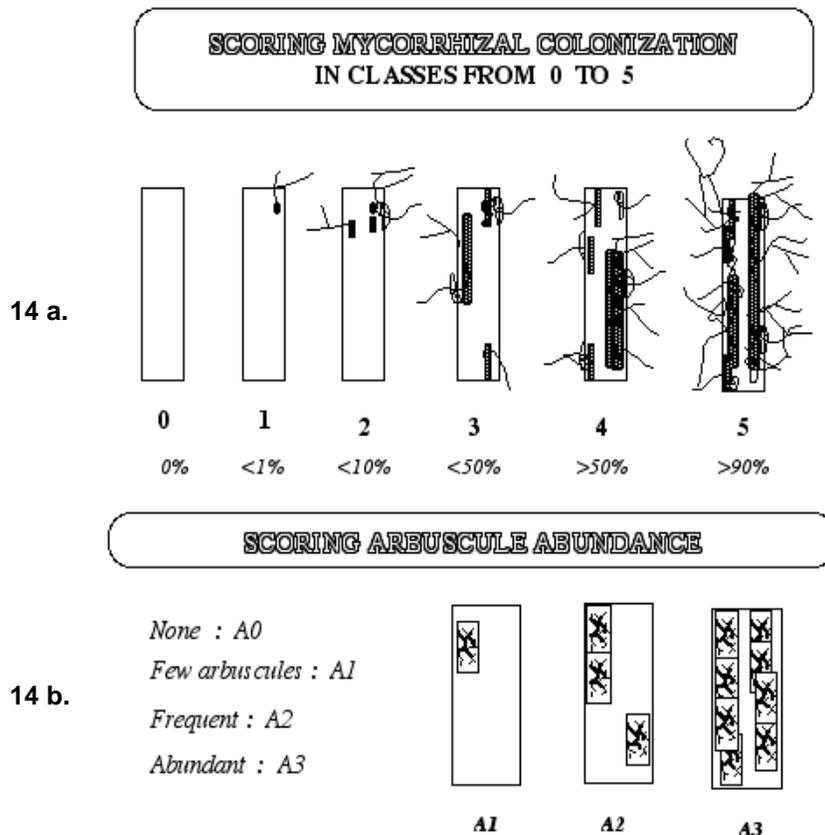
- Se separaron del suelo las raíces delgadas de las plantas, mediante lavados continuos. Se colocaron en tubos de ensayo, se añadió KOH al 10% y se incubaron en un baño María a 80 °C por 10 minutos. Las raíces se lavaron con agua y se aclararon con HCl al 10% por 5 minutos. Se lavaron nuevamente con agua. Posteriormente se agregó tinta Sheaffer color azul al 5% en vinagre por 3 minutos y se incubó nuevamente a baño María a 80 °C. Una vez realizada la tinción se las dispuso en una caja de Petri y se agregó glicerina al 50% para conservarlas.
- Las raíces previamente teñidas se cortaron en trozos de 1.5 cm aproximadamente y se ubicaron 10 de ellos por portaobjetos, luego se agregó glicerina (50%) y se cubrió con cubreobjetos.
- Se hicieron tres repeticiones/parcela, para una evaluación total de 135 cm de raíces/tratamiento (30 trozos/repeticón x 3 repeticiones/tratamiento x 1.5 cm/trozo). Con un aumento de 40X, se leyeron 24 campos en promedio por lámina distribuidos en recorridos longitudinales, anotando como positivo la presencia de cualquier estructura micorrícica encontrada en cada uno de los trozos de raíz. La sumatoria de los campos positivos se lleva a la ecuación presentada a continuación:

$$\% \text{ de Colonización total por HMA} = \frac{\text{número de campos colonizados observados}}{\text{número total de campos observados}} \times 100$$

Con el fin de comparar metodologías de estimación de la micorrización, ésta también se estimó acudiendo a Trouvelot *et al.*, (1986), sistematizado por Bin Zhao (2001), así:

- a. Se montaron 10 fragmentos de raíz de 1.5 cm en un portaobjetos y se hicieron tres repeticiones/tratamiento, para un total de 30 fragmentos de raíz con longitud de 45cm/tratamiento.
- b. Con base en una escala visual establecida de 0-5, de acuerdo con puntos de colonización observados con el objetivo 40X se define una ubicación para cada fragmento de raíz y se define el porcentaje de colonización estimado. Esto se repite con todas las muestras (Figura 14 a), sin distinguir si la colonización ocurre por micelio, arbuscúlos, vesículas, sólo se tiene en cuenta que haya o no colonización (Anexo 3). De acuerdo con esta metodología, la abundancia de arbuscúlos, se evalúa con una escala de 4 niveles (A0, A1, A2, A3) como se observa en la Figura 14 b.

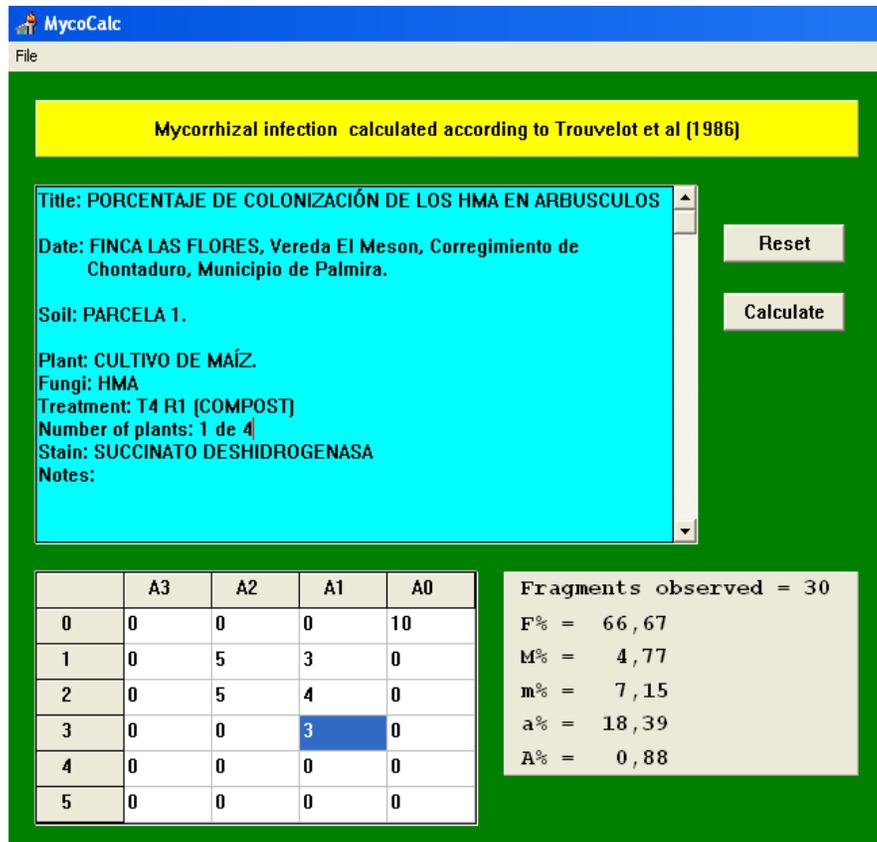
Figura 14. Estimación del nivel de colonización micorrízica de cada fragmento de raíz y la abundancia de arbuscúlos.



Fuente: Bin Zhao (2001).

- c. Para calcular el programa del ordenador "Mycocalc" para calcular los parámetros: % M, % m, % A y % a de acuerdo con Trouvelot *et al.*, (1986). Poner los valores en el. (Ver la figura 15).

Figura 15. Colonización por HMA calculado según Trouvelot *et al.*, (1986), programa de MycoCalc.



Fuente: Trouvelot *et al.*, 1986.

➤ **Variables físicas: Estabilidad de agregados (EA)**

La estimación de EA se efectuó por el método de tamizado en húmedo o método de Tulin, modificado por Yoder y descrito por Montenegro y Malagón (1990). Se hizo corrección de arenas usando hexametáfosfato de sodio.

En términos generales, el método consistió en someter una muestra de suelo sin disturbar, a agitación en agua por un determinado tiempo. La muestra se colocó posteriormente en un juego de tamices de diferentes diámetros (2 mm, 0.84 mm,

0.5 mm y 0.25 mm) y al final del proceso se estableció el porcentaje de agregados de los diferentes tamaños que quedaron sin destruir en cada tamiz.

➤ **Rendimiento en grano y producción de biomasa**

Se calculó el rendimiento en grano seco y la producción de biomasa del cultivo indicador al final del ciclo. Se seleccionaron al azar 10 plantas por parcela de cada tratamiento, se cosecharon todas las mazorcas de estas plantas, se desgranaron y se anotó el peso húmedo de los granos. Se llevaron a la estufa por un periodo de 24 horas para calcular su porcentaje de humedad. Con estos porcentajes de humedad se corrigieron los datos para obtener los resultados con una humedad del 15% en los granos. El rendimiento final se expresó en Toneladas ha⁻¹ por tratamiento.

Para el cálculo de biomasa, las mismas 10 plantas cosechadas se llevaron a la estufa para calcular su porcentaje de humedad. Se tomó toda la biomasa de la planta incluyendo raíces, tallos y hojas.

4.3.2 Análisis de resultados

Las variables de respuesta se analizaron con el paquete estadístico SAS (software SAS® versión 9.1.3, 2009). En los casos en los cuales se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre fuentes de variación se hicieron pruebas de comparación de medias Duncan y Tukey. Para estimar las correlaciones entre las variables se calculó el coeficiente de Pearson con nivel de significancia $P \leq 0.05$.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPOST Y DE LOS AV INCORPORADOS

El compost utilizado en este ensayo (Tabla 5) tuvo una relación C/N de 24.9, considerada adecuada para una enmienda o acondicionador a aplicar en esta zona⁸. Sin embargo, el alto contenido de manganeso, posiblemente por el material compostado, hace que los riesgos de exceso de este elemento se incrementen, especialmente debido a las condiciones del suelo donde se montó el ensayo, cuyo análisis químico inicial indicó alta presencia de Mn; indagando en la historia del lote, se encontró que hace aproximadamente tres años se estableció una porqueriza en la parte alta y hacia el lote seleccionado para el ensayo, escurrían los lixiviados.

Tabla 5. Algunas Características químicas del Compost utilizado en el ensayo.

ELEMENTOS	UNIDADES	VALORES
C-Total	(g/kg)	185,57
N-Total	(g/kg)	7,44
Relación C/N	-----	24,94
P-Total	(g/kg)	8,74
K	(g/kg)	10,92
Ca	(g/kg)	83,49
Mg	(g/kg)	9,91
S-Total	(g/kg)	3,50
B	(mg/kg)	37,87
Fe	(mg/kg)	91,58
Mn	(mg/kg)	519,18
Cu	(mg/kg)	52,16
Zn	(mg/kg)	142,79

Fuente: Laboratorio de servicios Analíticos CIAT (2010).

El contenido de nitrógeno hace que a esta enmienda o acondicionador⁹. Si se considere como un “material frío” sujeto a las condiciones de temperatura de la zona, las cuales durante el ensayo oscilaron entre 19 y 23 °C. El resto de nutrientes aportados por el material se calificaron como adecuados pel (Sancllemente R. O., consulta personal).

⁸Sancllemente R., O. 2012, comunicación personal.

⁹Sancllemente R., O. 2012, comunicación personal.

En el caso de los AV, sólo se analizó la relación C/N, la cual fue de 17.2, considerada óptima para un suministro rápido de nutrientes (Prager *et al.* 2000), en especial cuando el análisis de nitrógeno de la mezcla de los dos materiales arrojó un contenido de 3.1% (Laboratorio de Nutrición Animal, 2010). Nuevamente la temperatura del suelo influyó en la tasa de mineralización de este material, el cual se descompuso rápidamente, al provenir de una leguminosa joven en prefloración.

5.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO

En la Tabla 6, muestra la caracterización química inicial antes de la incorporación de los AV. El suelo presentó un pH moderadamente ácido; saturación de bases mayor del 50%, CIC alta (34.3 cmol.kg⁻¹) la cual estuvo directamente relacionada con un alto contenido de MO inicial (74.7 g/kg ó 7.4%), calcio, magnesio, potasio, boro y zinc. El fósforo y cobre disponibles se catalogaron como medios y bajo el hierro. El manganeso se consideró excesivo con 174.04 mg/kg; sin embargo, debido al pH, este elemento no se expresó en problemas de toxicidad para el cultivo de maíz. Con respecto a propiedades físicas, la densidad aparente es normal para la zona. Su textura arcillo limosa implica adecuada capacidad de retención de agua y nutrientes (Menjívar, 2010).

Tabla 6. Características químicas iniciales del suelo.

ELEMENTOS	UNIDADES	VALORES
pH		5,6
MO	(g/kg)	74,7
P-Bray II	(mg/kg)	11,4
K	(cmol/kg)	0,8
Ca	(cmol/kg)	10,6
Mg	(cmol/kg)	6,1
Al	(cmol/kg)	0
Na	(cmol/kg)	0,05
CIC	(cmol/kg)	34,3
S	(mg/kg)	53,4
B	(mg/kg)	0,7
Fe	(mg/kg)	5,1
Mn	(mg/kg)	174,04
Cu	(mg/kg)	1,9
Zn	(mg/kg)	5,5

Fuente: Laboratorio de servicios Analíticos CIAT (2010).

5.3 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS: COMPONENTES DE HMA

5.3.1 Longitud de micelio externo total (LMET)

En la Figura 16 se observa el micelio externo (ME) de HMA una vez se extrae en los filtros de nitrocelulosa, teñido con tinta Sheaffer de color azul y listo para cuantificar.

Figura 16. Extracción de micelio externo de HMA en filtros de nitrocelulosa - tinción con tinta Sheaffer de color azul.

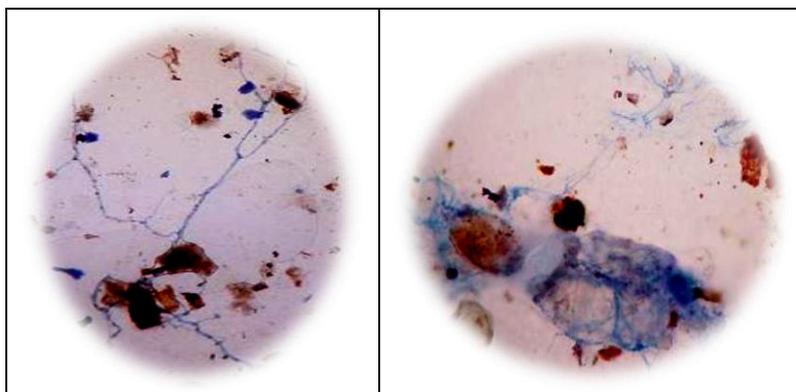
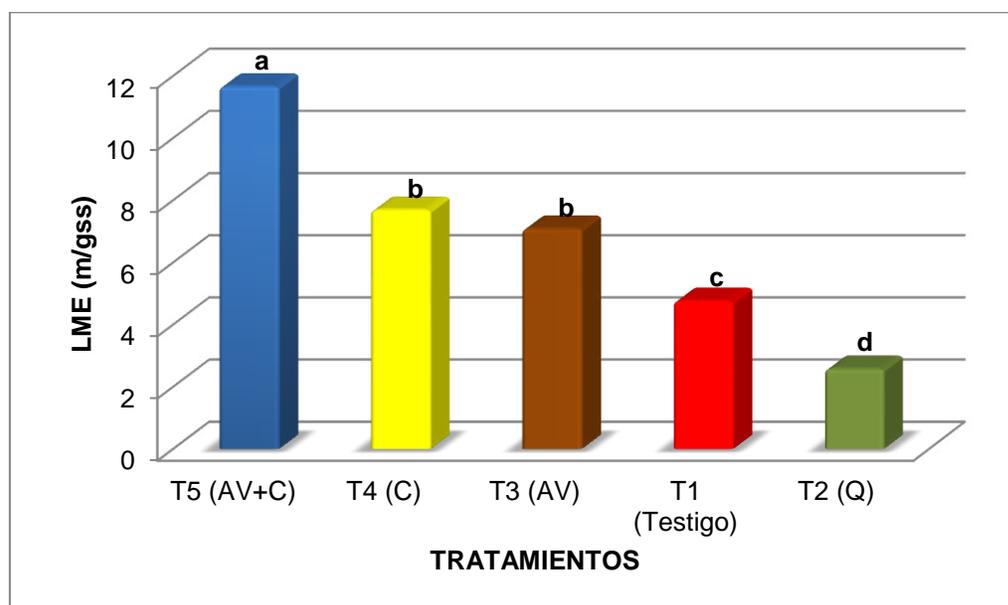


Foto: Vélez, 2011.

El análisis de varianza indicó que la LME presentó diferencias altamente significativas por efecto de los tratamientos, a través del ensayo (Anexo 4-A). En los tratamientos donde se adicionaron materiales orgánicos: T5, T4, T3, se estimuló LME, en comparación con el testigo (T1) y la fertilización química de síntesis industrial (Q), donde se presentó la menor longitud (Anexo 4B - Figura 17).

Los valores para LME oscilaron entre 2.6 y 11.7 m/gss de suelo, inferiores a los registrados en otras investigaciones, realizadas bajo condiciones de invernadero, en plazos de tiempo cortos y con adiciones de algún tipo de fertilización. El rango registrado en otros ensayos realizados en campo en Colombia ha variado entre 17-20 m/gss y 18.4-20.2 m/gss en los primeros 10 cm del suelo (Torres, 2000 y Reyes 2001; Navia, 2006 y Sánchez de P. *et al.*, 2007, respectivamente). Lo anterior puede explicarse por los altos contenidos de fósforo en el suelo utilizado en esta investigación (11.4 mg/kg), pues como se ha comprobado en otros trabajos, existe una correlación negativa entre este nutriente y LME (Reyes, 2001; Navia, 2006; Zarate, 2006; Sánchez de P. *et al.*, 2007).

Figura 17. Efecto de tratamientos sobre la LME Total (m/gss) de HMA asociado a plantas de maíz blanco (*Zea Mayz*).



Letras diferentes dentro de cada tratamiento, indican diferencia significativa – Duncan 5%.

En esta investigación se evidenció nuevamente que la utilización de fertilizantes de síntesis química industrial ocasionó efectos negativos sobre LME, mientras que las mezclas de AV+C favorecieron esta variable, cuyo máximo valor se obtuvo con AV+ C (11.7 m/gss). Tales resultados se explican en términos de disponibilidad de nutrientes y aumento generalizado en la actividad de microorganismos con la adición de compuestos orgánicos (Gryndler *et al.*, 2006; Navia, 2006; Sánchez de P. *et al.*, 2007; Sánchez de P. *et al.*, 2010b).

Distintos autores señalan que LME responde diferente a la fertilización orgánica e inorgánica (Sieverding, 1991; Miller *et al.*, 1995; Kabir *et al.*, 1998; Gryndler *et al.* 2006). Kabir *et al.*, (1998), encontraron que la fertilización con urea, nitrato de amonio o cloruro de potasio deprimieron ME mientras que el estiércol lo favoreció.

Los análisis del compost, mostraron que en ellos predominan compuestos orgánicos como polisacáridos y escasean compuestos recalcitrantes, lo que facilita su degradación microbiana y por tanto la liberación y rápida disponibilidad de nutrientes.

Distintos autores también señalan que altos aportes de biomasa de los abonos verdes, con bajas relaciones C/N (como en el caso de este trabajo que fue aproximadamente de 20), estimulan la actividad biológica y reducen la fijación del P en suelos ácidos, lo cual aumenta su disponibilidad y captación por las raíces de

las plantas, al igual que la movilidad vía ME (Torres, 2000; Reyes, 2001; Coleman *et al.*, 2004; Navia, 2006).

5.3.2 Longitud de Micelio externo vivo y activo (LMEV)

Cuando el ME total se colorea con la tinta Sheaffer, las hifas se tornan azules como se mostró en la Figura 16. Por el contrario, cuando se realiza la tinción de la enzima succinato-deshidrogenasa el micelio se tiñe de color fucsia (Figura 18). Como se dijo con anterioridad, esta metodología permite localizar sitios dentro del micelio de los HMA en los cuales está actuando la succinato deshidrogenasa en el ciclo de Krebs (ciclo de los ácidos tricarboxílicos ó del ácido cítrico) y por lo tanto, la incorporación del P absorbido para la síntesis de ATP. En esta forma, la tinción indica que en dichos lugares el micelio está vivo y participando activamente en el metabolismo del P, en particular, ya sea al exterior e interior de las raíces (Sylvia, 1988; Sánchez de P. *et al.*, 2007).

Figura 18. Tinción de succinato deshidrogenasa (SDH), que permite localizar sitios de micelio de HMA activos en la absorción de P, teñidos de fucsia.

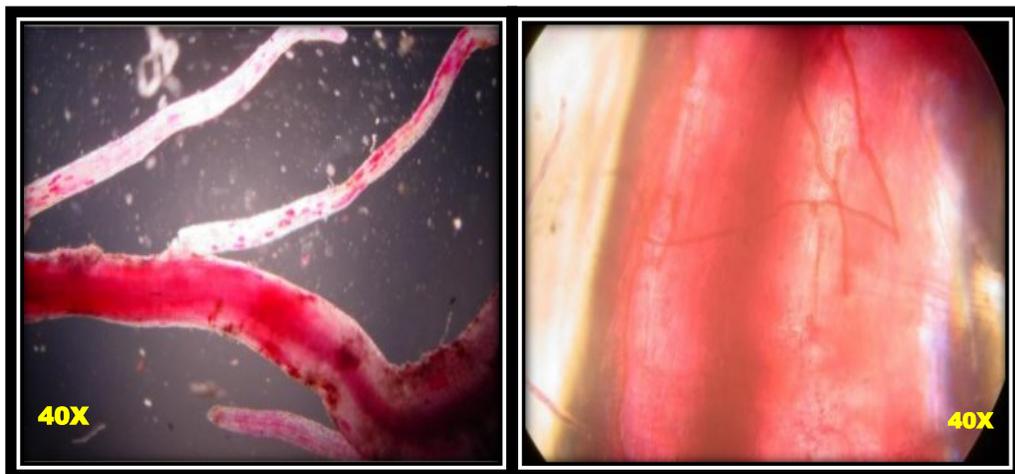
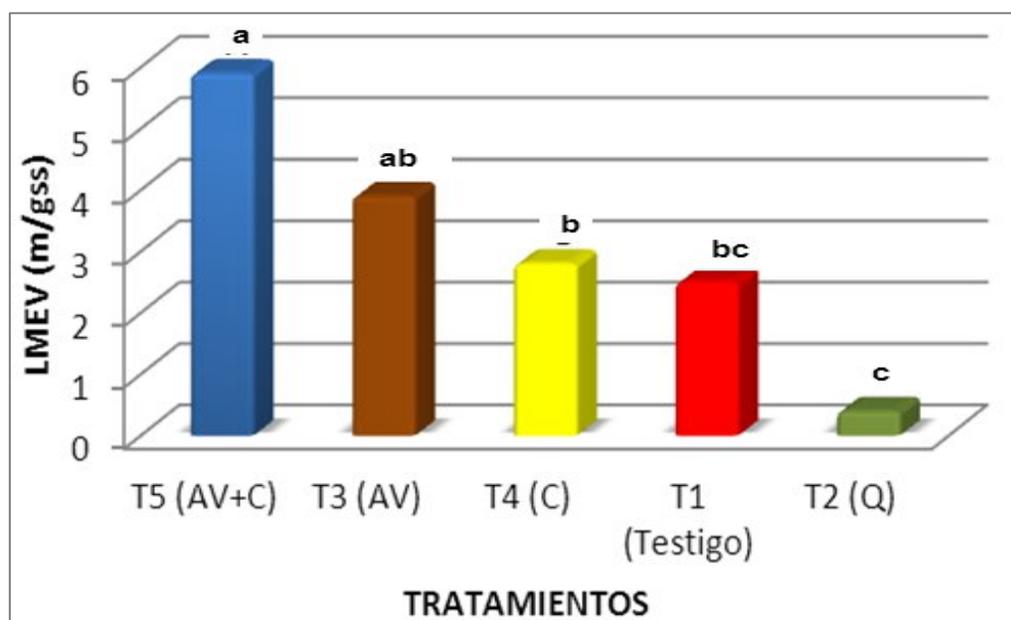


Foto: Gómez, Vélez, 2010.

La longitud del micelio externo activo (LMEV) se analizó en la época de llenado de grano del maíz (90 DDS) y se observó que hubo diferencias altamente significativas entre tratamientos (Anexo 5-A). Las mayores diferencias en LMEV se presentaron en AV+C y AV, que difirieron de C, T y Q (Anexo 5-B, Figura 19). En AV se estimaron 3.9 m/gss de LMEV, casi diez veces más longitud que en Q (0.4 m/gss).

Figura 19. Efecto de tratamientos sobre la LMEV (m/gss) de HMA asociado a plantas de maíz blanco (*Zea Mayz*), en época de llenado de mazorca.



Letras diferentes dentro de cada tratamiento, indican diferencia significativa – Duncan 5%.

Con la tinción vital, además de obtener información sobre cuánto de la longitud del micelio total de HMA está participando activamente en la absorción de P, también, varios autores señalan que, puede indicar los cambios que ocurren en el suelo cuando se aplican en los agroecosistemas altas cantidades de fertilizantes de síntesis química industrial. Normalmente, con altas aplicaciones de fertilizantes, el micelio total de HMA disminuye significativamente, pero el micelio activo es más sensible a detectar esta situación, pues se afecta en mayor escala (Sánchez de P., 1999, 2003; Sánchez de P. *et al.*, 2007, 2010). En esta investigación se corroboraron estas afirmaciones: La LME total varió de 11.7 m/gss (AV+C), y 7.1 m/gss (AV) a 2.7 m/gss (en Q). La LMEV pasó de 5.9 y 3.9 m/gss (AV+C y AV, respectivamente) a 0.4 m/gss (en Q).

Según Sylvia (1988), los valores de MEV registrados en la literatura pueden estar en un rango amplio, entre 5 y 80%. En condiciones de invernadero Guillemín *et al.*, (1995) encontraron que plantas de soya *Glycine max* L., presentaron cambios a través del tiempo en el porcentaje de MEV con la adición de fertilización fosforada. Hacia la cuarta semana de crecimiento de las plantas el porcentaje de MEV fue de 20% y hacia la sexta semana fue de 47%. Kabir *et al.*, (1998), hallaron incrementos en MEV asociado a plantas de maíz, en un suelo arcilloso, obteniendo valores de 85% en época de floración y de 64% en época de cosecha. En la presente investigación, al momento de llenado de grano de mazorca de maíz (120 DDS), en AV+C, de la LME total, el 50,4% estaba participando en la

absorción de P (LMEV), mientras que en Q sólo lo hacía el 14,8%. Esto, coincide con registros acerca de inhibición en la eficiencia de la actividad de los HMA ante la disponibilidad de P vía fertilizantes de síntesis química industrial (Sánchez de P. *et al.*, 2007, 2010).

El rango de variación de MEV se ha relacionado con factores como el cultivo, la textura del suelo, el tipo de fertilización, la fisiología de la planta hospedera, el sitio de muestreo y disponibilidad de nutrientes como el K (Sánchez *et al.*, 2007). Sieverding (1991) indica que varios estudios muestran correlaciones positivas entre los HMA y dicho nutriente. El autor señala que en un suelo arcilloso, los niveles de colonización de raíces de yuca *Manihot esculenta* por HMA, mejoraron por efecto de fertilización con KCl, situación que se repitió bajo pasturas y leguminosas en un Oxisol de Colombia.

5.3.3 Porcentaje de colonización por arbusculos

En la Figura 20 se aprecia la magnitud de la presencia de arbusculos de HMA, captada en células corticales de maíz, mediante microscopía electrónica de barrido, y corresponde al trabajo de grado del autor (Vélez y Sánchez *et al.*, 2009). Las estructuras tridimensionales, al igual que las connotaciones de su nombre, semejan las ramas de los árboles, y ocupan parte importante de las células donde están presentes, dando origen a una región intermembranas muy importante en el intercambio nutricional C-P que ocurre en este espacio (León y Ángel, 2010; Sánchez de P. *et al.*, 2010).

Figura 20. Arbusculos detectados en una raíz de maíz.

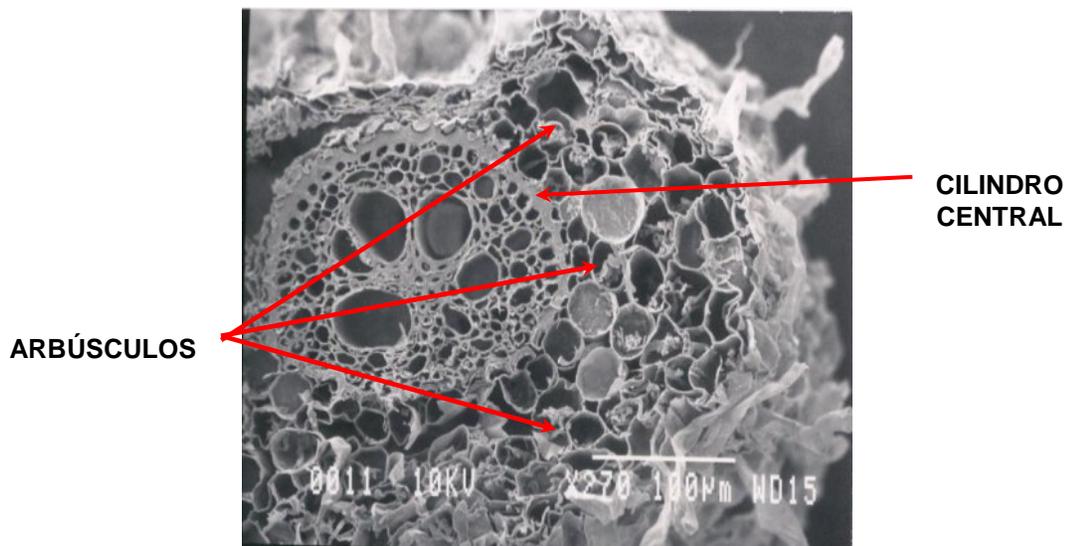
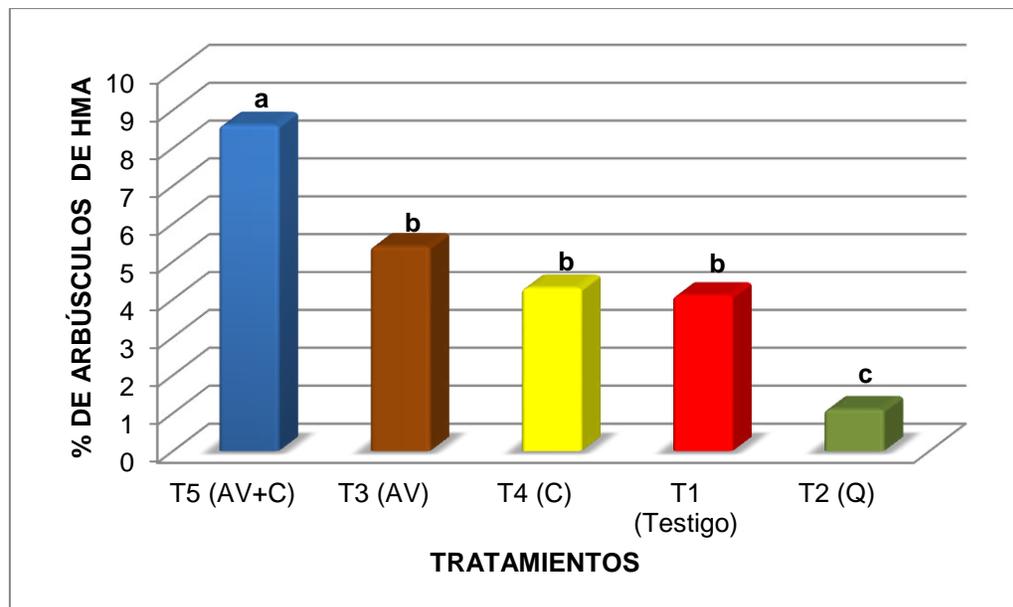


Foto: Vélez, Sánchez de P., 2008.

El análisis de varianza señala diferencias altamente significativas entre tratamientos (Anexo 6-A). El orden del porcentaje de colonización por arbuscúlos fue totalmente coherente con los resultados encontrados en LMEV (Figura 21). La discusión adelantada anteriormente se ciñe a esta variable, es decir, que la disponibilidad de P que se logra a través de la fertilización de síntesis industrial, inhibe los efectos nutricionales de transporte de P, que naturalmente se pueden obtener a través de la actividad de los HMA (Sánchez de P. *et al.*, 2007, 2010).

Esta coherencia mostraría una relación de sentido común, pues se podría esperar que el micelio activo de los HMA, tome el P inicialmente del suelo (MEV), lo transporte al interior de las células (micelio interno vivo) y éste, posteriormente se intercambie con las plantas, precisamente en los arbuscúlos, señalados como los sitios de máxima actividad metabólica de carácter nutricional (Sánchez de P. *et al.*, 2007; González *et al.*, 2008; Sánchez de P. *et al.*, 2010b).

Figura 21. Efecto de tratamientos sobre el porcentaje de arbuscúlos de HMA asociado a plantas de maíz blanco (*Zea Mayz*) en época de llenado de mazorca.



Letras diferentes dentro de cada tratamiento, indican diferencia significativa – Duncan 5%.

5.4 EFECTO DE LOS HMA SOBRE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

5.4.1 Índice de estabilidad de agregados (IEA)

En la Figura 22 se ilustra la abundante ramificación del micelio externo de los HMA y su organización en el suelo como “enmarañamiento físico” que participa en la unión de partículas del suelo (arenas, limos, arcillas, materia orgánica), dando origen a microagregados y posteriormente a macroagregados, las cuales como se conoce, constituyen las unidades que definen la estructura del suelo (Tisdall y Oades, 1982; Beare *et al.*, 1997; Sánchez de P., y Velásquez, 2008). A esto se suma la exudación de moléculas como la glomalina, caracterizada por su alta permanencia en el suelo (Velásquez, 2009).

Figura 22. Participación del micelio externo (ME) de los HMA en la formación de agregados en el suelo. (Raíz de plantas de maíz blanco – *Zea Mayz*).



Foto: Jaramillo y Velásquez 2008.

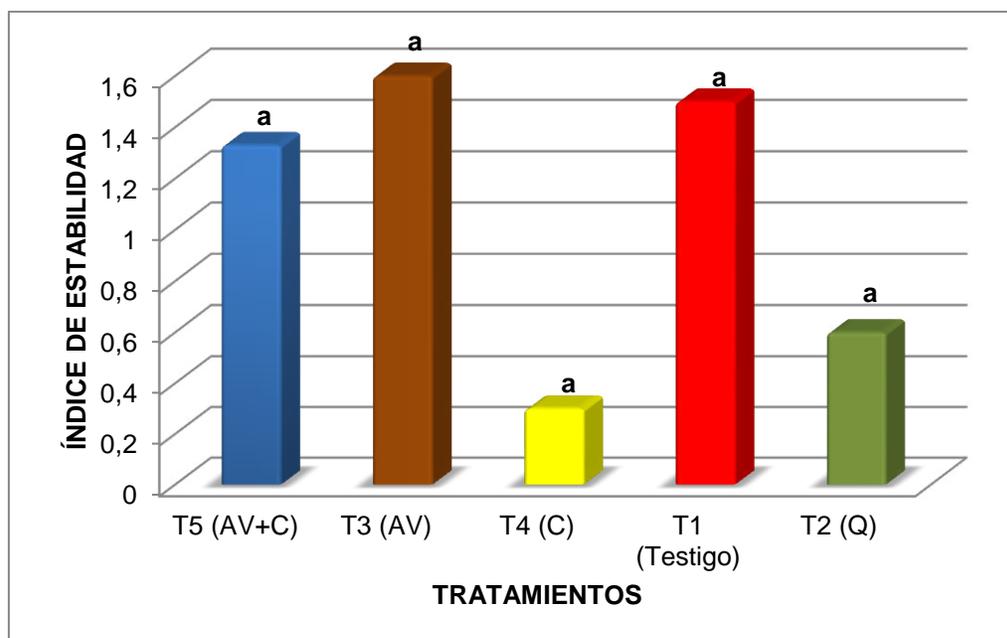
El IEA se determinó como la razón entre el contenido parcial de los agregados medios sobre los extremos (Tisdall y Oades, 1982; Torres *et al.*, 2007). Los agregados de tamaño medio (entre 1 y 2.0 mm de diámetro) son estructuras granuladas consideradas como óptimas para la filtración, aireación y retención de agua en el suelo (Madero *et al.*, 2003).

A los 120 DDS del maíz (llenado de mazorca) cuando se evaluó esta variable, el análisis de varianza indicó que la Estabilidad de Agregados (EA) no presentó diferencias significativas por efecto de los tratamientos (Anexo 7-A).

En los tratamientos donde se adicionaron materiales orgánicos: AV+C y AV, y en el T, predominaron agregados de tamaño >1mm, considerados de tamaño medio, en comparación con el compost (C) y la fertilización química de síntesis industrial (FQ), donde prevalecieron los agregados extremos. Gómez, (1999) y Ramírez *et al.*, (2006), plantean que los agregados menores de 0.5 mm son los más susceptibles a la pérdida por erosión pluvial y eólica, mientras que los agregados mayores a 2.0 mm conllevan riesgos de compactación del suelo, y los hacen susceptibles a erosión por remoción en masa, porque los poros de estos son grandes y retienen mucha agua.

Para esta variable no hubo diferencias significativas en el IEA entre tratamientos y épocas de muestreo (Figura 23, Anexo 7-B). A pesar de ello, en C y FQ se observó tendencia a reducción significativa en esta variable (0.3 y 0.6 mm, respectivamente), relacionada con pérdida en la estructura del suelo (Zhang *et al.*, 2007). Por el contrario, en AV+C, AV y T se incrementó (1.33, 1.60 y 1.50 mm, respectivamente), valores que indican mayor estabilidad estructural.

Figura 23. Índice de estabilidad de agregados (IEA) de tamaño medio >1mm en época de llenado de grano del maíz.



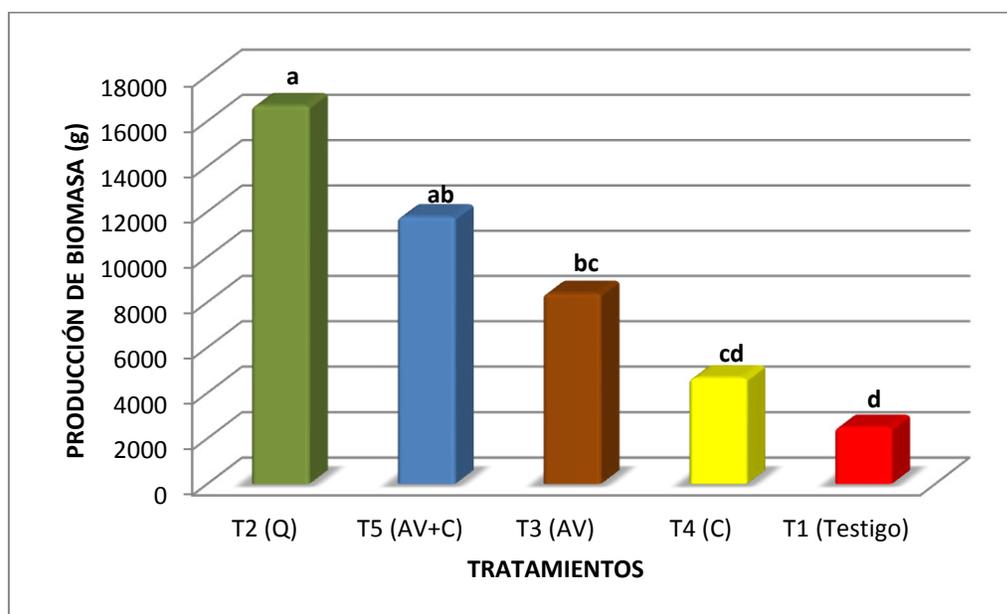
Letras diferentes dentro de cada tratamiento, indican diferencia significativa – Duncan 5%.

5.5 RENDIMIENTO DEL MAIZ

5.5.1 Producción de Biomasa

El análisis de varianza señala diferencias altamente significativas entre tratamientos (Anexo 8-A). FQ y AV+C presentan los mayores valores en biomasa (16684 g y 11775 g respectivamente) sin diferir entre ellos, seguidos por AV y C (8393 g y 4660 g respectivamente) y en T (2490 g) la biomasa se reduce drásticamente.

Figura 24. Efecto de tratamientos sobre la producción de biomasa en el cultivo de maíz blanco (*Zea Mayz*).



Letras diferentes dentro de cada tratamiento, indican diferencia significativa – Duncan 5%.

Viteri y Velandia (2006) en el Departamento de Boyacá, en experimentos con 6 especies de AV de clima frío y posterior siembra de papa, registran que la incorporación de estos incrementa significativamente los porcentajes de materia orgánica del suelo, representando una sensible disminución de la aplicación de fertilizantes de síntesis química, sin afectar los rendimientos del cultivo.

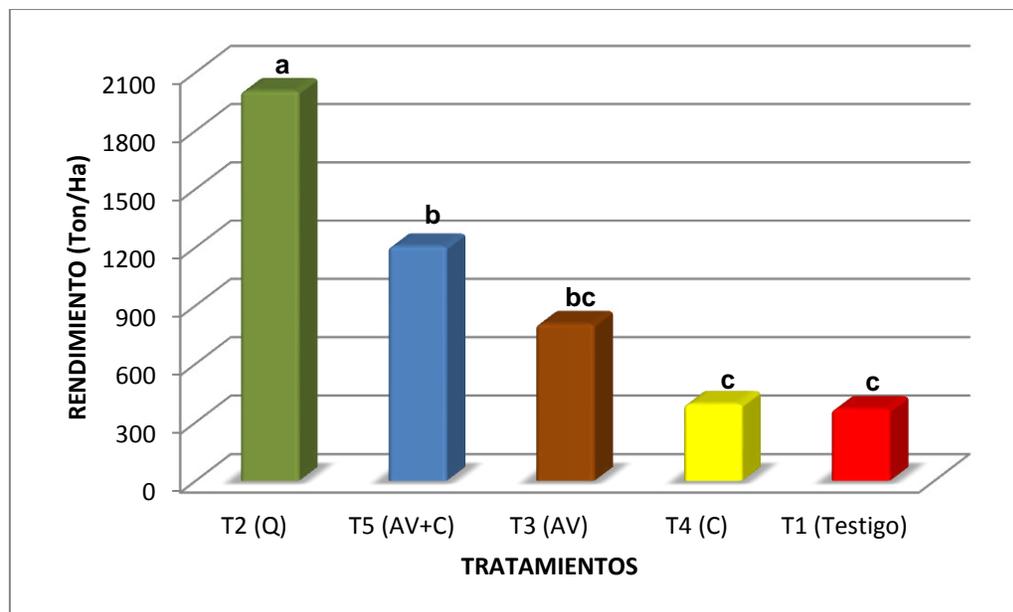
Para el caso de la presente investigación, aunque los AV individuales y combinados incrementan la producción de biomasa con relación al testigo, la

diferencia con FQ, aunque no es significativa estadísticamente (caso de AV+C), varía en cerca de 4 Kg, lo cual llevado a términos de ha, cobra significado en términos de 1 t/ha de diferencia. De idéntica manera sucede cuando AV + C se compara con AV, con una diferencia de esta misma proporción. El hecho de mezclar C con AV, significa una diferencia de más de 1 t/ha, con respecto a C. En cuanto a T, sus rendimientos son muy reducidos.

5.5.2 Rendimiento del Grano (RG)

Las diferencias observadas entre tratamientos con relación a la biomasa, se hacen más drásticas en el rendimiento del grano (RG), variable analizada en la época de cosecha del maíz (150 DDS). Hay diferencias altamente significativas entre tratamientos (Anexo 9-A) y las mayores ocurren entre FQ y demás tratamientos. AV+C y AV forman un segundo grupo, el menor RG se presenta en C y T (Anexo 9-B, Figura 25). En FQ se obtiene un 60% más de RG que en AV+C con 1205 T/Ha de RG y en éste, aproximadamente el 69.5% más de rendimiento que en T (368 T/Ha).

Figura 25. Efecto de tratamientos sobre el rendimiento del grano en el cultivo de maíz blanco (*Zea Mayz*).



Letras diferentes dentro de cada tratamiento, indican diferencia significativa – Duncan 5%.

En el rendimiento del maíz (T/Ha) se observa que el tratamiento Q, fertilización de síntesis química industrial, presenta mayor rendimiento. Lo anterior se explica con base en las características de los fertilizantes utilizados, éstos presentan alta solubilidad y por lo tanto, disponibilidad en comparación con los AV mezclados individuales (AV ó AV+C), que deben sufrir procesos de mineralización antes de quedar disponibles para las plantas (Navia, 2006).

5.6 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

El análisis de correlación muestra que los componentes de los HMA están íntimamente relacionados entre sí, lo cual desde el sentido común se podría esperar y lo corrobora el análisis estadístico. Así, cuando hay mayor LME, se incrementa la colonización por arbusculos al interior de las células corticales y cuando hay mayor LME, también se detecta mayor LMEV, es decir, aquel que está absorbiendo y transportando P al interior de las plantas, coincidente con mayor % de colonización por arbusculos (Tabla 7). La actividad de estas variables no se refleja sobre la estabilidad de agregados, a pesar de los registros bibliográficos que las relacionan (Tisdall y Oades, 1982; Douds y Collins, 2007), posiblemente por el poco tiempo transcurrido entre la siembra del maíz y la cosecha (150 DDS). Otra posible explicación sería la influencia de la materia orgánica en esta variable. Es de recordar que este suelo tiene buen contenido de M.O. (7.4%) debido al manejo agroecológico que se lleva en la finca y que se ha expresado en la cementación, lo cual podría relacionarse con pocos cambios actuales en la agregación del suelo.

Tabla 7. Coeficientes de correlación Pearson.

Variables	Longitud Micelio Externo LME (m/gss)	% Colonización de Arbusculos (%A)	Longitud Micelio Externo Vivo (LMEV)	Estabilidad de Agregados (EA)
Longitud Micelio Externo LME (m/gss)	1.00000			
% Colonización de Arbusculos (%A)	0.76645 0.0009	1.00000		
Longitud Micelio Externo Vivo (LMEV)	0.71875 0.0025	0.73706 0.0017	1.00000	
Estabilidad de Agregados (EA)	0.09644 0.7324	0.20574 0.4620	0.20129 0.4719	1.00000

6. CONSIDERACIONES FINALES

La mayor expresión de las variables biológicas evaluadas LMET, LMEV y Arbúsculos se encuentran con el uso de los materiales orgánicos en mezcla e individuales (Tabla 8), mientras que en T disminuyen y aún más en FQ, lo cual permite afirmar que los materiales orgánicos estimulan estas variables, mientras que los fertilizantes de síntesis química industrial las deprimen.

Tabla 8. Resumen de las diferencias estadísticas encontradas entre tratamientos en las diferentes variables evaluadas, con base en la prueba de Duncan.

TRATAMIENTOS	VARIABLES DE ESTUDIO					
	LMET	LMEV	% de ARBÚSCULOS	IEA	PRODUCCIÓN DE BIOMASA	RENDIMIENTO DEL GRANO
T5 (AV+C)	a	a	a	a	ab	b
T3 (AV)	b	ab	b	a	bc	bc
T4 (C)	b	b	b	a	cd	c
T1 (T)	c	bc	b	a	d	c
T2 (Q)	d	c	c	a	a	a

Sin embargo, al evaluar la producción de biomasa, la tendencia se invierte, los mayores valores se obtienen en FQ, sin diferir significativamente de AV+C y las diferencias se agudiza en el rendimiento de grano.

Los contenidos altos de M.O. que caracterizan este suelo, llevan a que en el tratamiento FQ, se disponga prácticamente de una condición órgano-mineral, reconocida como alternativa favorable para los rendimientos de los cultivos, puesto que entre otras ventajas, favorece la actividad microbiana en la rizosfera de los cultivos, encargada de mineralizar la materia orgánica y materiales orgánicos y colocarlos a disponibilidad de las plantas que se siembran (Gómez, 2000; Prager *et al.* 2002; Randhawa *et al.*, 2005; Sánchez de P. *et al.* 2007; Hoon Lee *et al.*, 2010).

Otro argumento que explica los mejores resultados en biomasa y rendimiento del maíz en FQ, está relacionado con haber efectuado 3 aplicaciones en el tiempo que duró el cultivo (en el momento de la siembra del maíz, a los 25 DDS y los 45 DDS), épocas que se consideran críticas para los rendimientos del maíz (Ewald Sieverding, 2011, comunicación personal). Por el contrario, en los tratamientos con materiales orgánicos (AV, C y AV+C) sólo se hizo una aplicación en el tiempo, la cual ocurrió al momento de la siembra, dejando el cultivo a los aportes que procedieran del suelo y de la descomposición de la materia orgánica aplicada inicialmente. Algunos de los interrogantes que quedan a partir de este trabajo,

giran en torno a qué pasaría si al cultivo se le hicieran nuevas adiciones de materia orgánica en épocas críticas, como se hace con los fertilizantes de síntesis química industrial? Tal vez esta podría constituir una alternativa tecnológica que permita al agricultor minimizar los costos de fertilización de síntesis química industrial o que pueda suplir ésta con el uso de los AV, incrementando la viabilidad social, económica y ambiental de la tecnología de los AV (Nziguheba *et al.*, 1998; Rao *et al.*, 1999; Molina O., 2005).

Aunque los mayores valores de biomasa y rendimiento del maíz se centran en FQ, en los tratamientos AV+C y AV se favorecen las variables de HMA evaluadas, más otras registradas por diferentes investigadores: servicios ecosistémicos, contenido de materia orgánica, mejoramiento de la estructura del suelo, estímulo a la diversidad y actividad biológica del suelo, aumentos en el contenido de nutrientes, mejoramiento en la capacidad de retención de agua e infiltración, e impedimento al impacto directo de las gotas de lluvia sobre el suelo, lo cual reduce de manera significativa los niveles de erosión.(Lavelle, 2012).

Dentro de la visión de resiliencia y sostenibilidad como dos de los pilares básicos de la Agroecología (Altieri, 2012), la conservación y utilización de los recursos microbiológicos y simbiosis como es el caso de las MA, es fundamental para una agricultura y suelos con futuro. En la medida que la práctica agronómica que empleamos, en este caso FQ, o que dejamos de implementar (T), inhibe o disminuye la participación del componente biológico en la fertilidad y conservación del suelo, estamos afectando su productividad y resiliencia a largo plazo (Sánchez de P. *et al.* 2007).

7. CONCLUSIONES

- En el suelo *Humic Dystrudepts* localizado en El Mesón, Finca Las Flores, la mayor expresión de los componentes de HMA: longitud y actividad de micelio externo, micelio externo vivo y porcentaje de colonización por arbusculos, en el sistema radical del cultivo del maíz blanco ICA V-354, ocurrió con la adición de abonos verdes en mezcla con compost (AV + C), variables que fueron inhibidas por la fertilización de síntesis química industrial (FQ).
- Hubo una relación directa entre los componentes de HMA evaluados, que llevan a considerar que entre mayor sea la longitud de micelio externo total, mayor puede ser la absorción de P que ocurre vía micorriza arbuscular.
- La formación de agregados estables al agua no varió durante el tiempo del ensayo, dadas las condiciones físico-químicas y de manejo de este suelo, especialmente sus altos contenidos de materia orgánica.
- Los rendimientos del maíz fueron significativamente mayores en FQ. Sin embargo, el efecto inhibitorio de este tratamiento sobre los componentes de HMA y, estimulante por parte de AV aplicados individualmente o combinados, plantea interrogantes en términos de resiliencia y sostenibilidad del agroecosistema, con implicaciones sociales, económicas y ambientales de la práctica agronómica de aplicación de fertilizantes de síntesis química industrial.

8. RECOMENDACIONES

- Las características observadas en los abonos verdes en las variables evaluadas bajo condiciones de campo en este ensayo, sumadas a la habilidad natural mostrada y registrada por otros autores la sugiere como plantas estratégicas y con potencial para enfrentar condiciones adversas del medio, sean de carácter físico, químico, y/o biológico. Esto hace recomendable su utilización en planes de manejo con fines de recuperación y conservación de suelos sean o no con inclinaciones productivas.
- Al trabajar con abonos verdes debe tomarse en cuenta un factor importante que garantice su efecto positivo, como es la forma en que se realiza el proceso de descomposición de estos bajo las condiciones ambientales y del suelo donde se realiza el ensayo, en forma tal que se favorezca la actividad de los componentes de HMA.
- En trabajos futuros, se recomienda evaluar la posibilidad de realizar incorporaciones en el tiempo de los abonos verdes y/u otras formas de fertilización orgánica, en épocas que se consideran críticas para los rendimientos del cultivo con el fin de mantener e incrementar el contenido de nutrientes al suelo.

BIBLIOGRAFÍA

ABBOT, L. K. y ROBSON, A. D. 1985. Formation of external hyphae in soil by four species of vesicular – arbuscular mycorrhizal fungi. In: *New Phytologist*. Vol. 99. p. 245 – 255.

ABDEL-FATTAH, G. M. 2001. Measurement of the viability of arbuscular-mycorrhizal fungi using three different stains; relation to growth and metabolic activities of soybean plants. *Microbiol. Res.* 156: 359–367.

ABIVEN, S., MENASSERI, S., ANGERS, D. A. AND LETERME, P. 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. *European Journal of Soil Science* 58 (February): 239–247.

ALTIERI, M., NICHOLLS, C., 2002. Biodiversidad y manejo de plagas en agroecosistemas. *Perspectivas agroecológicas* 2. Editorial Icaria. Barcelona, España. 247 p.

ANTHOFER J, KROSCHEL J. 2005. Above ground biomass, nutrients, and persistence of an early and a late maturing *Mucuna* variety in the Forest–Savannah Transitional Zone of Ghana. *Journal Agriculture ecosystems and environment* 110: 59-77.

ASTIER, M. MAASS, J. ETCHEVERS, B. PEÑA, J. GONZÁLEZ, F. Short-term green manure and tillage management effects on maize yield and soil quality in an Andisol. EN: *Soil and Tillage Research*, 2006 no. 88. p 153-159.

AZCON, G. DE A. y BAREA, J. 1980. Micorrizas. *Investigación y Ciencia*. Vol. 47: Pág. 8-16.

BARRERA, L. 2003. El papel de la materia orgánica en el manejo integral de la fertilidad del suelo: pág. 123-134. En: M. Triana, R. Lara, M. I. Gómez y G. Peñaloza (eds.). *Manejo integral de la fertilidad del suelo*. Bogotá D.C., Colombia.

BEARE, M. H., HU, S., COLEMAN D. C. AND HENDRIX, P. F. 1997. Influences of mycelial fungi on soil aggregation and organic matter storage in conventional and no-tillage soils. *Applied Soil Ecology* 5 (june): 211-219.

BIRBAUMER, G., FARFÁN, P.N., FERNÁNDEZ, M. P., MORENO, C. M., RONCANCIO, E., HERNÁNDEZ, F., GARZÓN, G., *et al.*, 2000. Cultivar sin arar, labranza mínima y siembra directa en los Andes. CAR-GTZ. Proyecto Checua. CAR-KFW-GTZ. Bogotá, Colombia. 146 p.

BLANCHART E., VILLENAVE C., VIALLATOUX A., BARTHÈS B., GIRARDIN C., AZONTONDE A., FELLER C. 2006. Long-term effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in southern Benin. *European Journal Soil Biology* No 42: 136-144.

BRUNDRETT, M. C. 2008. Mycorrhizal Associations: The Web Resource. En línea: <http://mycorrhizas.info/vam.html>. (Consultada en Noviembre de 2011).

BRUNDRETT M. C., BOUGHER N., DELL B., GROVE T. y MALAJCZUK N. 1996. Working with Mycorrhizas in Forestry and Agriculture. Australian Centre For international Agricultural Research. En línea: www.ffp.csiro.au/research/mycorrhizas/index.html.

BUCKLES D; TIOMPHE B. 1998. Cover crops in Hillside Agriculture, Farmer innovation with *Mucuna*. 14p.

BUNCH R. 1994. El uso de Abonos Verdes por Agricultores Campesinos: Lo que hemos aprendido Hasta la Fecha. Informe técnico No. 03, segunda edición CIDICCO. Pág. 8. [Consultado el 10 de Octubre de 2011]. Disponible En: <http://www.cidicco.hn/archivospdf/Inftecnico3.pdf>

CARNEIRO AMADO T, BAYER C, CONCEIÇÃO P, SPAGNOLLO E, COSTA B, DA VEIGA M. 2006. Potential of Carbon accumulation in no till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. *Journal Environment Quality* No 35: 1599 – 1607.

CENTRO INTERNACIONAL DE INFORMACIÓN SOBRE CULTIVOS DE COBERTURA. CIDICCO. 2003. Catálogo de Abonos verdes / cultivos de cobertura (CCAV), empleados por pequeños productores de los trópicos. Honduras, p. 7.

COLEMAN, D.; CROSSLEY, D.; HENDRIX, P. 2004. *Fundamental of soil ecology*. Academic Press, 2da edición. 386 p.

CORREA, Y. R. 2010. Estudio preliminar de la capacidad de un suelo para retener gases con efecto invernadero (GEI) en un ciclo de cultivo de maíz (*Zea mays* L.) bajo abonos verdes. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. 61 p.

COSTA, M.; CALEGARI, A.; MONDARDO, A.; BULISANI, E.A.; WILDNER, L. DO P.; ALCÂNTARA, P.B.; MIYASAKA, S. y AMADO, T.J.C. 1992. Adubação verde no sul do Brasil. Rio de Janeiro, ASPTA. 346 p.

DHIMA, K. VASILAKOGLU, J. GATSI, Th. PANOU-PHILOTHEOU, E. ELEFTHEROHORINOS, I. Effects of aromatic plants incorporated as green manure on weed and maize development. EN: Field Crops Research, 2009 .Vol. 110, No.3, p 235-241.

DOUDS, D. y COLLINS, N. 2007. Contributions of arbuscular mycorrhizas to soil biological fertility. p.p. 129–162. En: L. K. Abbott y D. V. Murphy (eds). Soil Biological Fertility: A Key to Sustainable Land Use in Agriculture. Dordrecht, The Netherlands.

FERNÁNDEZ, M., AGUILAR, M., CARRIQUE, J., TORTOSA, D., GARCÍA, C., LÓPEZ, M. y PÉREZ, J. 2001. Suelo y medio ambiente en invernaderos. Consejería de Agricultura y Pesca. Andalucía. 135 p.

FERROL, N., BAREA, J. M. y AZCÓN - AGUILAR, C. 2002. Mechanisms of nutrient transport across interfaces in arbuscular Mycorrhizas. Plant and Soil 244: 231–237.

FUNES, M. F. 2012. Eficiencia energética en los sistemas agroecológicos, bases metodológicas para su análisis y evaluación, aplicación del software energía 3.0 [diapositivas]. Seminario Agroecológico: Ciencia, Encuentros y Saberes 7 Año. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. 73 diapositivas.

GALLEGO J.; PRAGER M., SÁNCHEZ DE P. 2010. Efectos de dos abonos verdes sobre la mineralización del nitrógeno y la dinámica de las bacterias oxidantes del amonio y del nitrito en un ciclo productivo de maíz (*Zea maíz* L). Memorias, II congreso internacional de agroecología. VI congreso nacional de agroecología. Universidad del Cauca Popayán, Colombia. Octubre 6-8.

GARCÍA, A. y ROJAS, A. 2006. Posibilidades de uso de la vinaza en la agricultura de acuerdo con su modo de acción en los suelos. Técnicaña 10, N° 17 (marzo): 3-13.

GENNEY, D. R., HARTLEY, S. H., y ALEXANDER I. J., 2001. Arbuscular Mycorrhizal colonization increases with host density in a healthland community. In: New Phytologist. Vol. 152. P. 355 – 363.

GÓMEZ, E., SÁNCHEZ DE P., EL-SHARKAWY, M., CADAVID, L. F., 2007. Algunos indicadores de actividad biológica en el suelo y su relación con el manejo agronómico de la yuca (*Manihot esculenta Crantz*) en la costa norte de Colombia EN: SÁNCHEZ DE P., M., GÓMEZ, E., MUÑOZ, J. E., BARRIOS, E., PRAGER, M., BRAVO, O., *et al.* Las endomicorrizas, expresión bioedáfica de importancia en el trópico. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira. Editorial Feriva. p. 179 - 193.

GÓMEZ, F. E. 1999. Procesos erosivos, estrategias para su caracterización e implementación de sus prácticas básicas de control y prevención. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Editorial Litorey LTDA. p. 39 a 52.

GÓMEZ Z. J. 2000. La materia orgánica en los agroecosistemas. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. 70 p.

GÓMEZ Z. J., SÁNCHEZ DE PRAGER. M. 2000. El proceso de descomposición de residuos vegetales. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Cuaderno de microbiología No. 10: 16 p.

GUERRERO E. 1996. Micorriza: fundamentos biológicos y estado del arte. En: micorrizas. Recurso biológico del suelo. Ed. Guerrero E. fondo FEN Colombia; Bogotá. p. 3 – 40.

GUTIÉRREZ, A. 2003. El cultivo del maíz aspectos sobre su producción y factores limitantes.

HARRISON, M. J. 1999. Biotrophic interfaces and nutrient transport in plant/fungal symbioses. In: Journal Experimental of Botany. Special Issue, june. Vol. 50, p. 1013 – 1022.

HESEN, A. 2005. Dairy farm CH₄ and N₂O emissions, from one square metre to the full farm scale. p 147. Pub. 40. Soil Sci. Soc. Am., Madison Wisconsin, EEUU. pp. 1-13.

ICA. 2003. Plegables divulgativos de cada variedad de maíz en Colombia.

JAKOBSEN, I. J., ABBOTT, L. K. y ROBSON, A. D., 1992. External hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum* L. Spread of hyphae and phosphorus inflow into roots. In: New Phytologist. Vol. 120. p. 371 – 380.

JARAMILLO, D. F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Versión en CD. 613 p.

JOHNSON, N. C. AND GEHRING, C. A., 2007. Mycorrhizas: symbiotic mediators of rhizosphere and ecosystem processes. p.p. 73 – 100. En: Z. Cardon, J. Whitbeck and J. Whitbeck (eds). The Rhizosphere: An Ecological Perspective.

KABIR Z., O'HALLORAN, I. P., FYLES, J. W., HAMEL, C. 1998. Dynamics of the mycorrhizal symbiosis of corn (*Zea mays* L.): effects of host physiology, tillage practice and fertilization on spatial distribution of extra-radical mycorrhizal hyphae in the field. Agric. Ecosyst. Environ 68: 151–163.

- LABRADOR, J. M. 2001. La materia orgánica en los agrosistemas. España. 293 p.
- LAVELLE, P. 2012. Territorios ecoeficientes para una agricultura rentable, equitativa y sostenible [diapositivas]. Seminario Agroecológico: Ciencia, Encuentros y Saberes 7 Año "Agroecología y Ambiente". Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. 35 diapositivas.
- LEE, H. PARK, K. JUNG, K. ASLAM, M. LEE, D. GUTIERREZ, J. KIM, P. 2010. Effect of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) as a green manure on rice productivity and methane emission in paddy soil. EN: Agriculture, Ecosystems & Environment. Vol. 138, No. 3. p. 343-347.
- MADERO, E.; GÓMEZ, E.; SÁNCHEZ DE P., M. 2003. Propiedades físicas y químicas, algunas características del suelo a ser tomadas en cuenta en la finca: índice hídrico e índice de protección. Cuadernos ambientales No. 9. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira y Ministerio de Agricultura. p. 3-14.
- MADIGAN, M. T., MARTINKO, J. M. y PARKER, J. 2004. Brok, biología de los microorganismos. Décima edición. Madrid.
- MARÍN, B.E. 2012. Mesofauna asociada a un suelo *Humic dystrochets* sembrado con maíz *Zea mays* L. y manejo de abonos verdes [diapositivas]. III Seminario Internacional de Agroecología y VI Simposio Nacional de Agroecología. Corporación Universitaria Minuto de Dios UNIMINUTO. 23 diapositivas.
- MARSCHNER, H. y DELL, B. 1994. Nutrient uptake in Mycorrhizal symbiosis. In: Plan and Soil. No. 159. p. 89 – 102.
- MARTÍN, G.M.; RIVERA, R.; ARIAS L.; RENTERÍA M. 2009. Efecto de la *Canavalia ensiformis* y micorrizas arbusculares en el cultivo de maíz. Revista Cubana de Ciencia Agrícola, Vol. 43, No. 2, p. 191-199.
- MARTÍN, G.M.; RIVERA, R. 2004. Mineralización del Nitrógeno de la *Canavalia ensiformis* en un suelo Ferralítico rojo de la Habana. Cultivos tropicales Vol. 25, no. 3, p. 83-88.
- MENJÍVAR, J. 2010. Química y Fertilidad de Suelos [diapositivas]. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, 23 diapositivas.
- MILLER, R. M., y JASTROW, J. D. 2000. Mycorrhizal fungi influence soil structure. En: Kapulnik, Y., y Douds, D. D. (eds). Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function. Kluwer Academic Publishers. London. 3 - 18 p.

MILLER, M. H., MCGONIGLE, T. P. AND ADDY, H. D. 1995. Functional Ecology of Vesicular Arbuscular Mycorrhizas as Influenced by Phosphate Fertilization and Tillage in an Agricultural Ecosystem. *Critical Reviews in Biotechnology* 15 (3/4): 241 – 255.

MONEGAT C. 1991. Plantas de cobertura del suelo. Características y manejo en pequeñas propiedades. Editorial Chapecó. 336 p.

MOSAVI SB, AA JAFARZADEH, MR NISHABOURI, SH OOSTAN y V FEIZIASL. 2009. Application of Rye green manure in Wheat rotation system alters soil water content and chemical characteristics under dryland condition in Maragheh. *Pakistan Journal of biological Science* 12 (2): 178-182.

NAVIA J. 2006. Impacto de aportes superficiales de biomasa vegetal de diferente calidad sobre poblaciones nativas de hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA), rizobios y nematodos, en un suelo agrícola de Santander de Quilichao (Departamento del Cauca). Tesis de doctorado en Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. 136 p.

PRAGER M.; VICTORIA, J.A.; SÁNCHEZ DE P., M. 2002. El suelo y los Abonos Verdes, una alternativa de manejo ecológico. Cuadernos ambientales No. 7. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira y Ministerio de Agricultura. p. 4-16.

RAMÍREZ B. C., FIGUEROA S. B., ORDAZ C.V., VOLKE H. V. 2006. Efecto del sistema de labranza cero en un Vertisol. Universidad Autónoma Chapingo. México. *TERRA Latinoamericana*, Vol. 24, Núm. 1, p. 109-118.

RANDHAWA, P. CONDRON, L. DI, H. SINAJ, S. McLENAGHEN, R. 2005. Effect of green manure addition on soil organic phosphorus mineralization. EN: *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. Vol. 73. p. 178-189.

REYES J. T., BARRIOS E., SÁNCHEZ DE P. 2007. Micelio externo de HMA asociado a barbechos mejorados y su participación en la agregación de suelos del Cauca EN: SÁNCHEZ DE P., M., GÓMEZ, E., MUÑOZ, J. E., BARRIOS, E., PRAGER, M., BRAVO, O., *et al.* Las endomicorrizas, expresión bioedáfica de importancia en el trópico. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira. Editorial Feriva. p. 262 - 276.

REYES J. T. 2001. Micelio externo de hongos micorrícicos arbusculares y su potencial influencia en la recuperación de suelos degradados en laderas del Cauca, Colombia. Tesis de maestría en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. 88 p.

RILLIG M. C. y MUMMEY, D. L. 2006. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist* 171 (1): 41-53.

SALAMANCA, A. W. 2003. Efecto de la incorporación de abonos verdes sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de un Vertisol ustico en las condiciones del valle del cauca. Palmira. Trabajo de grado Ingeniero agrónomo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Sede Palmira. 77 p.

SÁNCHEZ DE P., M., POSADA, R., VELÁSQUEZ, D., NARVÁEZ, M. 2010a. Metodologías básicas para el trabajo con micorriza arbuscular y hongos formadores de micorriza arbuscular. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira. 139 p.

SÁNCHEZ DE P., M., PRAGER M., ÁNGEL D., SARRIA P. 2010b. Indicadores de sostenibilidad con enfoque agroecológico en agroecosistemas tropicales EN: LEÓN T. y ALTIERI M. Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia Instituto de Estudios Ambientales – IDEA y Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología (SOCLA). Opciones graficas editores Ltda. p. 247-269.

SÁNCHEZ DE P., M. y VELÁSQUEZ, D. C. 2008. Las Micorrizas: el micelio externo de los hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA). Cuadernos ambientales No. 12. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. 15 p.

SÁNCHEZ DE P., M., GÓMEZ, E., MUÑOZ, J. E., BARRIOS, E., PRAGER, M., BRAVO, O., *et al.*, 2007. Las endomicorrizas, expresión bioedáfica de importancia en el trópico. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira. Editorial Feriva. 351 p.

SÁNCHEZ DE P., M. 2003. Actividad biológica en la rizosfera del maracuyá-*Pasiflora edulis* var. *Flavicarpa* en diferentes sistemas de manejo, estados de desarrollo y condiciones fitosanitarias. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Madrid. 261 p.

SÁNCHEZ DE P., M., GÓMEZ, E. 2003. Las micorrizas, los fijadores de nitrógeno y la economía en los agroecosistemas. Cuadernos ambientales No. 8. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira y Ministerio de Agricultura. p. 3-19.

SÁNCHEZ DE P., M. 1999. Endomicorrizas en algunos agroecosistemas de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira. Editorial Feriva, Cali. 227 p.

SANCLEMENTE, R. O., PRAGER, M., SÁNCHEZ DE P., M. 2011. Los cultivos de cobertura: un aporte valioso de materia orgánica a suelos degradados y de baja fertilidad. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. 16 p.

SANCLEMENTE, R. O., PRAGER, M. 2009. Efecto del cultivo de cobertura y abono verde: *Mucuna pruriens* en las propiedades biológicas de un suelo *Typic Haplustalfs*, cultivado con maíz dulce (*Zea Mays L.*) en la zona de ladera del Municipio de Palmira Valle del Cauca, Colombia. Publicado en la Revista Brasileira de Agroecología. Vol. 4 No. 2. p 4133 – 4138.

SANTOS, H.P., REIS E.M., POTTKER, D. 1987. Efeito da rotação de culturas no rendimento de grãos e na ocorrência de doenças radiculares de trigo (*Triticum aestivum*) e de outras culturas de inverno e de verão de 1979 a 1986. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, (*Documentos*, 7). 38 p.

SEAE, Sociedad Española de Agricultura Ecológica 2007. Contribución de la agricultura ecológica a la mitigación del cambio climático, en comparación con la agricultura convencional. Ministerio de Medio Ambiente, Valencia, España. 56 p.

SHANG, S. Y.; CHAO, M.; HSIU, C.; HUAN. C. 2009. Estimation of methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in Taiwan. *Journal Renewable Energy*. No 34: 1916–1922.

SHARMA R.D., PEREIRA J., RESCK D.V. 1982. Eficiência de adubos verdes no controle de nematódes associados a soja nos cerrados. Planaltina: EMBRAPA/CPAC, (*Boletim de Pesquisa*, 13). 30 p.

SHOKO M. 2009. Exploring phosphorus, *Mucuna (Mucuna pruriens)* and nitrogen management options for sustainable maize production in a depleted kaolinitic sandy loam soil of Zimbabwe. Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Agriculture, At Stellenbosch University. Chapter 3: 26-40.

SIEVERDING, E. 1991. Vesicular – Arbuscular Mycorrhiza management in tropical agrosystems. GTZ, Republica Federal de Alemania. 372 p.

SOCIEDAD DE AGRICULTORES DE CHILE. Boletín de Agricultura y abonos verdes No. 18. [Consultado el 02 de Marzo de 2012]. Disponible en: http://www.abcagro.com/fertilizantes/abonos_verdes.asp

SYLVIA, D. M. 1988. Activity of external hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biol Biochem* 20 (Nº 1): 39 - 43.

SYLVIA, D. M. 1988. Distribution, Structure and Function of external Hyphae of vesicular-arbuscular Mycorrhizal fungi. p. 144-167.

TEJADA M., GONZÁLEZ J.L, GARCÍA A., PARRADO J. 2007. Effects of different green manures on soil biological properties and maize yield. Journal Bioresource Technology No. 99: 1758- 1767.

TISDALL, J. M. y OADES, J. M. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. J. Soil Sci. 33: 141–163.

TORRES, R. 2000. El papel del micelio externo de hongos que forman micorriza arbuscular asociado a barbechos mejorados en suelos degradados de ladera de Pescador (Cauca). Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. 89 p.

URQUIAGA S, C JANTALIA, W LUZIO, B ALVES y R BODDEY. 2005. El horizonte del suelo. Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal 5 (2): 46-60. Temuco, Chile.

VÁZQUEZ, L; ÁLVAREZ, J. 2011. Control ecológico de poblaciones de plagas. Instituto de investigaciones de sanidad vegetal, Ministerio de la Agricultura. Editorial CIDISAV. La Habana, Cuba. 134 p.

VELÁSQUEZ, P. D. 2009. Efecto de vinazas sobre hongos que forman micorriza arbuscular y sobre fracciones de materia orgánica en un suelo del Valle del Cauca. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. 84 p.

VÉLEZ, Z. F.; SÁNCHEZ DE P., M.; NARVÁEZ C., M.; VELÁSQUEZ P., D.; GÓMEZ L., E.; ARROYABE, A. y OLAYA. C. 2009. Detección de hongos que forman micorriza arbuscular (HMA) en maracuyá *Passiflora edulis* Sims, maíz *Zea mays* L. y soya *Glycine max* Merrill: del estereoscópio al microscópio electrónico de barrido. Revista de la Asociación Colombiana de fitopatología y Ciencias Afines "ASCOLFI". ISSN 0120-0143. Volumen 33 (1): 11-15.

VÉLEZ, Z. F. 2008. Evaluación de micorriza arbuscular en el cultivo de maíz dulce *Zea mays* L. después de la aplicación de diferentes dosis de vinaza a un suelo del Valle del Cauca. Trabajo de grado en Ingeniería Agronómica. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Facultad de Ciencias Agropecuarias. 80 p.

VITERI, SILVIO E. y VELANDIA, J., 2006. Evaluación de asociaciones vegetales por su potencial como fuente de materia orgánica para los suelos de Samacá (Boyacá). En: Agronomía Colombiana. Enero-Junio. Vol. 24. no. 1. p. 138-146.

WILDNER L. 1990. Adubação verde, cobertura e recuperação do solo em sistemas diversificados de produção. Chapecó, EMPASC/CPPP. (EMBRAPA, PNP Manejo e Conservação do Solo. Projeto 04386007/1). Relatório final. 79 p.

ZAPATA, C.; SÁNCHEZ DE P., M.; AZAKAWA, N. 2002. Indicadores de actividad biológica en suelos con diferentes grados de intervención en el Ecoparque Cerro de La Bandera. Acta agronómica Vol. 52 No. 1 – 4. Pág. 45 – 52.

ZÁRATE, L. M. 2006. Dinámica temporal en la formación de micelio externo de hongos micorrízico arbusculares (HMA) y su impacto en la formación de agregados estables al agua. Tesis de maestría en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia, Palmira. 108 p.

Referencias de internet:

FAO. 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de Tierras y Aguas de la FAO, No. 8. http://www.fao.org/ag/ags/AGSE/agse_s/7mo/iita/iita.htm. (Consultada en Agosto de 2010).

USDA, 1996. Cover and green manure crop benefits to soil quality technical. Note No.1 (Abril). En línea, http://soils.usda.gov/sqi/management/files/sq_atn_1.pdf. Consultada en Agosto de 2010).

www.campo.com; manejo de la fertilización de Maíz.

www.infoagro.com

ANEXOS

Anexo 1. Descripción del perfil de suelos finca Las Flores.

Unidad cartográfica: Consociación Villa Colombia.

Unidad Taxonómica:

Describió: Yolanda Rubiano.

Fecha: Mayo 16 de 2010.

Localización: Departamento del Valle del Cauca, Municipio de Palmira, Corregimiento Ayacucho – La Buitrera.

Fotografía aérea:

Coordenada X: (W 76° 11´0.2´´)

Coordenada Y: (N: 03° 30´1.4´´)

Altitud: 1713 msnm.

Posición fisiográfica: Cuerpo de Abanico subreciente coluvio-aluvial. .

Topografía: Fuertemente inclinada con pendientes del 12%.

Material parental: Arcillolitas.

Cobertura vegetal y/o uso de la tierra: Cultivos semestrales y cultivos de Café.

Régimen de humedad del suelo: Údico.

Régimen de temperatura del suelo: Isotérmico.

Profundidad efectiva: 250 cm.

Drenaje natural: Moderadamente bien drenado.

Evidencias de erosión: No hay.

Epipedón: Umbrico.

Horizontes subsuperficiales: Cambico.

Descripción del perfil:

- | | |
|-----------------|---|
| Ap | 0 - 30 cm; color en húmedo 7.5YR 3/2 (cafe oscuro); color en seco 7.5 YR 3/2 (cafe oscuro) arcillolimoso; con estructura en bloques subangulares, grandes y medios, fuertemente desarrollados; consistencia en seco: muy dura; consistencia en húmedo: firme, plástica y muy pegajosa; poros abundantes muy finos y finos; abundantes raíces gruesas, medias y finas, vivas; regular actividad biológica (lombrices); pH 6.5; superficies de deslizamiento, débiles; límite claro y ondulado. |
| Bw ₁ | 30 – 53 cm; color en húmedo 95% de 5 YR 4/6 (rojo amarillento) con 5% de 10 R 3/6 (rojo oscuro); arcillosa; con estructura en bloques subangulares, grandes y medios, fuertemente desarrollados; Consistencia en húmedo: friable; muy plástica y muy pegajosa; poros abundantes muy finos y finos; regulares raíces medias y finas; vivas; regular actividad biológica; pH 5.5; limite difuso y ondulado. |
| Bw ₂ | 53 – 80 cm; color en húmedo 90% de 5 YR 4/6 (rojo amarillento) con 10% de 10 YR 4/4 (pardo amarillento oscuro); arcillosa; con |

estructura en bloques subangulares, grandes y medios, moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo: friable; muy plástica y muy pegajosa; poros regulares muy finos; regulares raíces finas; vivas; poca actividad biológica; pH 4.5; limite difuso y ondulado.

Bw₃ 80 – 200 cm; color en húmedo 80% de 5 YR 5/8 (rojo amarillento) con 20% de 10 YR 5/8 (café amarillento); arcillosa; con estructura en bloques subangulares, grandes y medios, moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo: friable; plástica y muy pegajosa; pocos poros muy finos; pocas raíces finas, vivas; poca actividad biológica; pH 4.5; limite difuso y ondulado.

Clasificación del perfil de suelo según USDA, Clave taxonómica Undécima edición, 2010. **Humic Dystrudepts.**

Anexo 2. Metodología para estimar la variable de micelio externo vivo y activo (MEV).

➤ Tinción de micelio externo vivo y activo

Esta es una modificación de la tinción vital de la succinato deshidrogenasa (SDH), método usado en el Instituto Canario de Investigaciones Agrarias, Santacruz de Tenerife, España (2007). El procedimiento realizado fue el siguiente:

- 5 g de suelo tamizado a 2 mm se adicionaron a un beaker con 200 ml de agua deionizada (DI) y se agitó con magneto durante 5 min.
 - La solución de suelo se pasó a tamiz de 20 μ , tanto el beaker como el tamiz se lavaron con 500 ml de agua DI (para limpiar un poco la muestra de arcillas), luego el suelo del tamiz se recogió con 250 ml de agua DI en el beaker.
 - En agitación se tomaron 4 alícuotas de 5 ml cada una, para un total de 20 ml que pasaron a un beaker con 160 ml de agua DI.
 - De esta nueva dilución se tomaron 3 alícuotas fraccionadas de 1 ml c/u y se dejaron en erlenmeyer con 3,5 ml de solución para tinción vital. La composición por litro, de esta solución, contenía 100 ml de succinato de sodio 2,5 M, 250 ml de azul de tetrazoilo (4mg/ml), 250 de trizma 0,2 M a pH 7.0, 100 ml de $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 5mM y 300 ml de agua DI.
 - El erlenmeyer se tapó con papel aluminio y se llevó a incubación a 28°C por 12 a 16 horas con agitación suave.
 - Luego de incubación el contenido del erlenmeyer se vertió sobre el tamiz de 25 μ , se lavó con 500 ml de agua DI y el micelio se recogió en beakers pequeños con 20 ml de hipoclorito al 3% y se dejó por 5 min.
 - El micelio con el hipoclorito se vertió sobre el tamiz, se lavó con 500 ml de agua DI y se llevó a equipo de filtración al vacío que poseía filtros de nitrocelulosa de 1.2 μ . Para contrastar la tinción del micelio se aplicó fucsina ácida (0,2 g/L) en una proporción de agua:fucsina de 2:1 y se dejó teñir en el equipo, durante 1 hora.
 - Finalmente se lavaron los filtros de nitrocelulosa (aún posicionados en el equipo de filtración) y se montaron sobre portaobjetos para su observación al microscopio, con magnificación de 20x y objetivo con cuadrícula para realizar el conteo por el método del intercepto, contando intersecciones vivas y no vivas.
9. Los cálculos se realizaron igual que para longitud de micelio externo.

Anexo 3. Cuadro para estimar los niveles de colonización micorrízica de cada fragmento de raíz y la abundancia de arbusculos.

	0	1				2				3				4				5					
		A3	A2	A1	A0																		
1																							
2																							
3																							
4																							
5																							
6																							
7																							
8																							
9																							
10																							
11																							
12																							
13																							
14																							
15																							
16																							
17																							
18																							
19																							
20																							
21																							
22																							
23																							
24																							
25																							
26																							
27																							
28																							
29																							
30																							
Tot																							

Anexo 4. Análisis de varianza para la variable estimada en el ensayo.

Anexo 4-A: Análisis de varianza para longitud de micelio externo (LME) total a través del tiempo del ensayo.

Fuente de Variación	DF	Cuadrado de la media	Pr > F
Bloque	2	13.338963	0.0288
Tratamiento	4	313.539704	<.0001
Tiempo	2	240.744963	<.0001
Tiempo*Trat	8	21.495426	<.0001
Promedio		6.754815	
CV		16.38402	

Anexo 4-B: LME total, prueba de agrupamiento de tratamientos mediante Duncan.

Duncan Agrupamiento	Media (m/gss)	Número de Observaciones	Tratamiento
A	11.7	27	AV+C (T5)
B	7.7	27	C (T4)
B	7.1	27	AV (T3)
C	4.8	27	T (T1)
D	2.6	27	Q (T2)

Anexo 5. Análisis de varianza para la variable estimada en el ensayo.

Anexo 5-A: Análisis de varianza para longitud de micelio externo vivo y activo (LMEV) cuantificado en el ensayo.

Fuente de Variación	DF	Cuadrado de la media	Pr > F
Bloque	2	0.00190840	0.0729
Tratamiento	4	0.00483566	0.0041
Promedio		3.08	
CV		2.441122	

Anexo 5-B: Agrupamiento de Duncan para longitud de micelio externo vivo activo (LMEV).

Duncan Agrupamiento	Media (m/gss)	Número de Observaciones	Tratamiento
A	5.9	12	AV+C (T5)
AB	3.9	12	AV (T3)
B	2.8	12	C (T4)
BC	2.5	12	T (T1)
C	0.4	12	Q (T2)

Anexo 6. Análisis de varianza para la variable estimada en el ensayo.

Anexo 6-A: Análisis de varianza para la colonización de arbusculos cuantificados en el ensayo.

Fuente de Variación	DF	Cuadrado de la media	Pr > F
Bloque	2	0.00000945	0.9865
Tratamiento	4	0.00878740	<.0001
Promedio		4.68	
CV		3.171503	

Anexo 6-B: Agrupamiento de Duncan para la colonización de arbusculos.

Duncan Agrupamiento	Media	Número de Observaciones	Tratamiento
A	8.6	12	AV+C (T5)
B	5.4	12	AV (T3)
B	4.3	12	C (T4)
B	4.1	12	T (T1)
C	1.1	12	Q (T2)

Anexo 7. Análisis de varianza para la variable estimada en el ensayo.

Anexo 7-A: Análisis de varianza para la Estabilidad de Agregados del suelo (EA) cuantificados en el ensayo.

Fuente de Variación	DF	Cuadrado de la media	Pr > F
Bloque	2	0.03368667	0.8719
Tratamiento	4	0.18434333	0.5778
Promedio		1.01	
CV		40.00529	

Anexo 7-B: Agrupamiento de Duncan para la Estabilidad de Agregados del suelo (EA).

Duncan Agrupamiento	Media	Número de Observaciones	Tratamiento
A	1.6	3	AV (T3)
A	1.5	3	T (T1)
A	1.33	3	AV+C (T5)
A	0.6	3	Q (T2)
A	0.3	3	C (T4)

Anexo 8. Análisis de varianza para la variable estimada en el ensayo.

Anexo 8-A: Análisis de varianza de la Producción de Biomasa cuantificados en el ensayo.

Fuente de Variación	DF	Cuadrado de la media	Pr > F
Bloque	2	11306578.4	0.2722
Tratamiento	4	96094617.6	0.0014
Promedio		8800.400	
CV		30.81068	

Anexo 8-B: Agrupamiento de Duncan para la Producción de Biomasa.

Duncan Agrupamiento	Media (g/parcela)	Número de Observaciones	Tratamiento
A	16684	3	Q (T2)
BA	11775	3	AV+C (T5)
BC	8393	3	AV (T3)
CD	4660	3	C (T4)
D	2490	3	T (T1)

Anexo 9. Análisis de varianza para la variable estimada en el ensayo.

Anexo 9-A: Análisis de varianza del Rendimiento del Grano cuantificados en el ensayo.

Fuente de Variación	DF	Cuadrado de la media	Pr > F
Bloque	2	376786.838	0.0772
Tratamiento	4	1383690.545	0.0013
Promedio		955.7000	
CV		33.90236	

Anexo 9-B: Agrupamiento de Duncan para el Rendimiento del Grano.

Duncan Agrupamiento	Media (Ton/Ha)	Número de Observaciones	Tratamiento
A	2005	3	Q (T2)
B	1205	3	AV+C (T5)
CB	806	3	AV (T3)
C	394	3	C (T4)
C	368	3	T (T1)