

Hongos formadores de micorrizas arbusculares y su efecto sobre la estructura de los suelos en fincas con manejos agroecológicos e intensivos

Arbuscular mycorrhiza and their effect on the soil structure in farms with agroecological and intensive management

Juan David Lozano Sánchez*, Inge Armbrrecht y James Montoya Lerma

Universidad del Valle, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Apartado Aéreo 25360, Cali, Colombia.

*Autor para correspondencia: juan.lozano.sanchez@correounivalle.edu.co

Rec.:06.10.2014 Acep.: 29.04.2015

Resumen

En el suelo, los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) ayudan a reducir los daños causados por erosión y a mantener la estructura mediante la producción de micelio y sustancias adherentes. En el estudio se evaluó la estabilidad estructural del suelo y se estimaron la diversidad y la densidad de esporas de HMA presentes en tres sistemas de suelo (erosionado, bosque, cultivo de café) en una zona rural del municipio de Dagua, Valle del Cauca, Colombia. Las fincas se clasificaron en sistemas con manejos intensivos o agroecológicos. Se encontraron 25 morfoespecies de micorrizas agrupadas en 13 géneros, siendo *Glomus* y *Entrophospora* los más representativos. Los valores de los índices de los diámetros geométrico medio (DGM) y ponderado medio (DPM) y la diversidad de esporas de micorrizas fueron significativamente más altos en las fincas clasificadas con manejos agroecológicos que en aquellas con manejo intensivo. Los análisis de estabilidad de agregados revelaron que los suelos erosionados tienen significativamente menor estabilidad que los de bosque y cultivo. Se encontró una relación estadísticamente significativa en la diversidad ($r = 0.579$) y densidad de esporas ($r = 0.66$) con respecto al DGM, y del DPM con el índice de diversidad H' ($r = 0.54$). Las diferencias en las prácticas, uso y manejo del suelo se reflejan en la diversidad de micorrizas encontradas en las fincas y su efecto, como agentes de agregación de partículas, genera cambios notorios en la estabilidad y estructura del suelo en suelos de las zonas de evaluación. En síntesis, el manejo agroecológico tiende a favorecer las micorrizas y la estructura de los suelos.

Palabras clave: Agricultura convencional, agroecología, erosión, estabilidad de agregados, micorrizas arbusculares.

Abstract

Arbuscular mycorrhizal fungi help to reduce the damage caused by erosion and maintain soil structure through the production of mycelium and adhering substances. This study evaluated the structural stability; estimated the diversity and density of mycorrhizal spores present in three systems of soil (eroded, forest and coffee plantations) in the rural area of Dagua, Valle del Cauca, Colombia. The systems evaluated were classified as farms with intensive or agroecological management. There were 25 morphospecies of mycorrhiza grouped in 13 genera, being *Glomus* and *Entrophospora* the most representative. The mean index values of mean weight (DPM) and geometric (DGM) diameters and diversity of mycorrhizal spores were statistically higher in farms with agroecological management than in farms with intensive management. The aggregate stability analysis revealed that eroded soils have significantly lower stability than forest and crop soils. A statistically significant correlation was found between diversity ($r = 0.579$) and spore density ($r = 0.66$) regarding DGM, and DPM with Shannon diversity ($r = 0.54$). Differences in practices, use and soil management affect mycorrhizal diversity found on farms and its effect such as particle aggregation agent generates remarkable changes in the stability and soil structure of evaluated areas. It is concluded, that agroecological management tends to favour both mycorrhizae and the structure of soils.

Keywords: Aggregate stability, agroecology, arbuscular mycorrhizal, conventional agriculture, erosion.

Introducción

La intensificación de la agricultura convencional en los trópicos unida a un gran número de actividades antropogénicas que aceleran los procesos erosivos debidos a la deforestación, disminuyen significativamente la calidad de los suelos. Esto es particularmente crítico en áreas con vocación agrícola sujetas a cambios adversos en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Lo anterior conlleva a efectos negativos a nivel social, ambiental, económico y sobre la salud humana, reflejados en la acelerada acción de procesos erosivos debido a la deforestación y deterioro de grandes zonas (Arshad y Martin, 2002).

Con el propósito de evitar los efectos negativos causados por la agricultura intensiva, se investiga en soluciones integrales con manejos agroecológicos que reduzcan el empleo de insumos químicos y fomenten el uso racional de los recursos naturales, los cultivos mixtos, el uso de variedades locales tolerantes a sequías o la implementación de técnicas tradicionales (Altieri y Koohafkan, 2008). Algunas de estas investigaciones, enfocadas al estudio de microorganismos y su papel en la matriz edáfica, buscan disminuir los costos de producción y generar efectos positivos sobre el ambiente (Jaizme y Rodríguez, 2008). Entre las comunidades de microorganismos que habitan el suelo, los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) son clave para garantizar la sostenibilidad del sistema suelo-planta (Oehl *et al.*, 2004). La simbiosis entre el hongo micorrícico y la planta, puede ser utilizada como bio-inoculante para reducir la carencia de nutrientes en las plantas y para participar en procesos de agregación y retención del suelo por medio de mecanismos físicos (producción de micelio) y químicos (producción de sustancias adherentes), con el fin de aliviar los efectos causados por la erosión (Jaizme y Rodríguez, 2008).

Las investigaciones sobre el papel de las micorrizas en la calidad del suelo y en la agricultura sostenible se han enfocado, principalmente, en suelos de las zonas templadas. Sin embargo, dado que el funcionamiento de la asociación micorrícica depende de la interacción entre planta-hongo y el ambiente abiótico es, por tanto, necesario evaluar el rol que desempeñan las micorrizas en la fertilidad de los suelos tropicales, ya que existen diferencias entre las zonas templadas y tropicales. La agricultura en las regiones templadas se caracteriza por condiciones de exceso, mientras que en el trópico por condiciones de acceso, en especial con el macronutriente fósforo el cual algunos hongos formadores de micorrizas solubilizan y aportan a las plantas (Cardoso y Kuyper, 2006).

En el municipio de Dagua, Valle del Cauca, Colombia, la intensificación agrícola en cultivos de café y plátano, en la búsqueda de mayores rendimientos, ha desencadenado una fuerte degradación en la calidad de los suelos. Los procesos intensivos de arado y fertilización con insumos químicos, provocan reducción en la fertilidad del suelo al disminuir las comunidades de especies de HMA y el efecto en las funciones ecológicas que cumplen estos organismos en la matriz edáfica, en especial la retención de agregados y prevención de la erosión (Beare *et al.*, 1997). La situación anterior se puede contrastar en fincas con manejo agroecológico en la misma región, donde los productores utilizan métodos menos agresivos con el suelo en términos de perturbación, uso de plaguicidas y químicos de síntesis. Por tanto, resulta importante determinar si existen diferencias edáficas entre los distintos manejos que se encuentran en la zona, incluyendo pequeñas áreas de bosque que actuarían como referente natural. En ese orden de ideas, en el presente estudio en fincas de una zona rural de Dagua, Valle del Cauca, se evaluaron los índices de estabilidad estructural en suelos erosionados, áreas de bosque y cultivos de café y plátano con diferentes manejos agrícolas y se analizó la relación entre el mantenimiento de la estructura del suelo y las comunidades de especies de HMA observadas.

Materiales y métodos

Zona de estudio y selección de fincas

El estudio se realizó en fincas ubicadas en la cuenca del río Dagua, Valle del Cauca (Colombia). Esta zona posee formaciones vegetales pertenecientes al bosque húmedo subtropical con temperaturas entre 23 y 25 °C, una altura, promedio, de 1460 m.s.n.m (Espinal, 1968). Se seleccionaron cinco fincas y se clasificaron según el estado agroecológico con base en el método cualitativo de Altieri y Nicholls (2002) (Tabla 1), en fincas con manejo agroecológico y fincas con manejo intensivo, con el objeto de evaluar la calidad del suelo y la salud de los cultivos por medio de una serie de indicadores de sostenibilidad. Estos presentan valores que oscilan entre 1 y 10: uno indica el valor menos deseable, 5 el medio y 10 el deseado, según las características que presentan el suelo y el cultivo. Las fincas con valores iguales a 5 se encuentran en el umbral de sostenibilidad, mientras que aquellas con promedios inferiores a este valor están por debajo de este umbral y en adelante se denominan como fincas con manejos intensivos; mientras que aquellas con promedios superiores a 5 se denominan fincas con manejos agroecológicos.

Tabla 1. Valores asignados a los indicadores de calidad de suelo y salud de cultivo en fincas cafeteras de la zona rural de Dagua, Valle del Cauca. Basados en Altieri y Nicholls, 2002.

Indicador	Finca				
	La Meseta	El Brillante	La Esperanza	Villamaría	El Cedro
Calidad del suelo					
Estructura	5	7	9	9	8
Color, olor y materia orgánica	3	6	7	9	10
Porosidad del suelo	3	6	9	8	9
Cobertura de suelo	3	5	9	8	10
Erosión	3	6	8	9	10
Actividad biológica	2	6	9	10	9
Promedio	3.2	6	8.3	8.8	9.3
Salud del cultivo					
Apariencia	5	7	9	9	9
Control arvenses	3	6	8	8	10
Fertilización de cultivo	1	5	8	8	9
Diversidad vegetal	2	7	8	9	9
Diversidad natural circundante	2	7	10	10	9
Sistema de manejo	1	7	8	8	9
Promedio	2.3	6.5	8.5	8.7	9.2
Promedio combinado	2.75	6.25	8.4	8.75	9.25

Diseño experimental

En el trabajo se utilizó un diseño de bloques al azar con tres sistemas: (1) zona cultivo, con plantaciones de café y plátano; (2) zona erosión, caracterizada con un alto grado de erosión con presencia generalmente de cárcavas de coloración rojiza y sin capa orgánica aparente; y (3) zona bosque, correspondiente a bosque secundario sin intervención agrícola. En cada uno de los sistemas se identificaron cinco parcelas. Los muestreos se realizaron en abril de 2012. Como se trabajó en cinco fincas, el número de parcelas por sistema también fue de cinco en donde se tomaron dos muestras por cada una, para un total de 10 muestras.

Evaluación de esporas de hongos formadores de micorrizas

De cada muestra en campo se tomaron dos sub-muestras de 100 g de suelo hasta 10 cm de profundidad y se homogenizaron para formar una de 200 g. Las esporas se extrajeron en 20 g de suelo siguiendo el procedimiento de Sieverding (1983) con modificaciones descrito en Sánchez de Práguer *et al.* (2010). La humedad se determinó en 20 g adicionales de suelo. Las muestras fueron

pasadas a través de tamices superpuestos con 2 mm, 450 µm, 120 µm y 40 µm de tamaño de poro; luego los contenidos que quedaron sobre los tamices fueron centrifugados a 3600 r.p.m. por 4 min, utilizando una solución de sacarosa (70%) y agua. Finalmente, las esporas extraídas de la solución fueron contadas y montadas en placas en solución PVGL (polivinil-glicerol). El conteo se expresó como esporas/100 g de suelo seco, utilizando la ecuación propuesta por Sieverding (1983):

$$No. \text{ esporas} = \left(\frac{\text{esporas contadas}}{\text{peso muestra}} \right) * \frac{pi}{pf} * 100$$

donde:

pi: peso inicial de la muestra usada para determinar humedad.

pf: peso final de la muestra para determinar humedad.

Las esporas se determinaron hasta morfoespecies con base en las claves taxonómicas de Sánchez de Práguer *et al.* (2010); Oehl *et al.* (2011) y Redecker *et al.* (2013).

Análisis de estabilidad de agregados

La estabilidad de los agregados se evaluó con el método de Yoder, descrito por Kemper *et al.* (1965) y modificado por Jaramillo (2001), a partir de dos muestras de 100 g. Con una de ellas se calculó la humedad gravimétrica y con la otra, se realizó el método Yoder por 15 min utilizando tamices de tamaño de poro de 2.00, 0.85, 0.50 y 0.25 mm. Las muestras se secaron por 24 h en horno a 105 °C. Los diámetros geométricos medio (DGM) y ponderado medio (DPM) fueron calculados utilizando las ecuaciones:

$$DPM = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \frac{w_i}{100}$$

$$DGM = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right)$$

donde:

\bar{x}_i : Diámetro promedio de la fracción de tamaño correspondiente.

w_i : Porcentaje de peso de la respectiva fracción de agregados de un determinado rango de tamaño dividido por 100.

Análisis estadísticos

Para estos análisis no se tuvieron en cuenta las esporas inviábiles extraídas. Los datos fueron depurados para el cálculo de la diversidad de esporas usando los índices de Shannon (H') y Simpson (α). Las diferencias en la estructura de las comunidades de especies de hongos formadores de micorrizas presentes en los tres tipos de suelos fueron evaluadas mediante un análisis de Permanova, en el programa PC-ORD® v5.0; además, se realizó la comparación gráfica de las variables evaluadas. Mediante análisis de varianza de una vía se evaluaron las diferencias en los valores de los índices de estabilidad de agregados, abundancia, riqueza y densidad de esporas de hongos formadores de micorrizas en las zonas de bosque, cultivo y erosión y entre fincas con diferentes manejos agrícolas. Para ello se empleó el software Statística® v7.0. Se evaluó la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas con el test de Levene. Por medio de un análisis de correlación de Spearman se determinó si la densidad de esporas y la riqueza de morfoespecies de micorrizas arbusculares relacionadas con el tipo de suelo, de acuerdo con su estabilidad estructural.

Resultados y discusión

Identificación esporas de micorriza

Se identificaron 25 morfoespecies de esporas de MA pertenecientes a 13 géneros (Tabla 2), entre ellos *Glomus*, *Diversispora*, *Acaulospora*, *Entrophospora* y *Scutellospora* que han sido reportados en trabajos en cultivos de café y de plátano (Sánchez de Práguer, 1999; Bolaños *et al.*, 2000). *Glomus* y *Entrophospora* presentaron las mayores abundancias con 62 y 19 individuos, respectivamente. Se observaron un total de 23 morfoespecies de MA en las zonas de cultivo, 12 en bosque y 6 en suelo erosionado (Tabla 2). *Glomus* es el género que tiene el mayor número de especies en los Glomeromycetos, y por tanto, el más representativo con seis morfoespecies. Este resultado está entre lo esperado ya que incluye especies que tienden a sobrevivir tanto en ambientes sanos como perturbados (Oehl *et al.*, 2004). Cabe resaltar que, hasta el presente y según el consenso de clasificación de hongos micorrizicos arbusculares, los hongos del género *Entrophospora*, familia Entrophosporaceae, están en una posición taxonómica incierta (Redecker *et al.*, 2013).

Tabla 2. Listado de morfoespecies de micorrizas observadas en las zonas de cultivo (C), bosque (B) y erosión (E) de las fincas en la zona rural de Dagua, Valle del Cauca, Colombia.

Morfoespecies	La Meseta			El Brillante			La Esperanza			Villamaría			El Cedro		
	C	B	E	C	B	E	C	B	E	C	B	E	C	B	E
<i>Acaulospora</i> sp.1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	7	0	0
<i>Acaulospora</i> sp.2	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Acaulospora</i> sp.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
<i>Ambispora</i> sp.1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	2	0
<i>Ambispora</i> sp.2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Diversispora</i> sp.1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	5	3	0
<i>Diversispora</i> sp.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Entrophospora</i> sp.1	0	4	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	16	8	1
<i>Entrophospora</i> sp.2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Funneliformis</i> sp.1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Gigaspora</i> sp.1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	5	0	0	1	1	1
<i>Gigaspora</i> sp.2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Glomus</i> sp.1	0	1	0	2	0	0	11	2	0	31	1	0	18	6	1
<i>Glomus</i> sp.2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0
<i>Glomus</i> sp.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
<i>Glomus</i> sp.4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Glomus</i> sp.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Glomus</i> sp.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
<i>Pacispora</i> sp.1	0	1	0	0	0	0	2	0	0	7	0	0	8	1	0
<i>Pacispora</i> sp.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Paraglomus</i> sp.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Racocetra</i> sp.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Redeckera</i> sp.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
<i>Sacullospora</i> sp.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Scutellospora</i> sp.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
Total	0	10	0	3	0	1	20	4	2	50	1	0	69	22	3

Índices de diversidad de esporas de hongos formadores de micorrizas

El índice de diversidad de Shannon en las fincas con manejos agroecológicos (El Brillante, La Esperanza, Villamaría y El Cedro) fueron mayores que el observado en la finca La Meseta (Tabla 3). Esta diferencia puede relacionarse con factores tales como el disturbio en la red de hifas, el rompimiento de las delgadas paredes celulares de las esporas, los cambios en el contenido de nutrientes, la alteración en la actividad microbiológica del suelo y el estrés causado a los hongos por la pérdida progresiva de materia orgánica, lo que consecuentemente se refleja en la disminución de las comunidades de especies de HMA (Oehl *et al.*, 2003).

Al igual que en otras investigaciones (Helgason *et al.*, 1998), en este estudio la riqueza y la abundancia de esporas de MA en las fincas con manejo agroecológico fueron más altas en las zonas de cultivo que en las áreas de bosque y suelo erosionado (Tabla 3). Los índices de diversidad de Shannon y Simpson son reflejo no solo de la riqueza de especies de esporas sino de qué tan equitativas se distribuyen las poblaciones de dichas especies en la comunidad. Se considera que un sistema es más saludable en la medida que la equitatividad sea mayor. A diferencia del índice de Shannon, que aumenta en la medida

que la diversidad crece, el de índice de Simpson decrece su valor a medida que ésta disminuye (Maurer y McGill, 2011). Con base en lo anterior se interpretan estos resultados en el sentido que las prácticas agroecológicas favorecen las micorrizas. En otras palabras, las prácticas de cero labranza o arado reducido y la aplicación limitada de insumos químicos, entre ellos fungicidas, en las fincas con manejos agroecológicos permiten el fácil establecimiento de altas densidades de esporas de HMA en el suelo (Andrade *et al.*, 2009). No obstante, los suelos en los bosques pueden ser sujetos a la agresión, por ejemplo para extraer residuos orgánicos (mantillo) para venta en viveros, esto explicaría la disparidad de resultados obtenidos en los bosques.

Por otra parte, las diferencias ambientales también son factores importantes que determinan la densidad de esporas de HMA en estos sistemas; se sabe que a mayor temperatura y luminosidad sobre los suelos, se incrementa la producción de esporas de HMA (Guadamarra y Álvarez, 1999). Las zonas de cultivo de café producen poca sombra con respecto a los bosques, por tanto, existe un aumento en la temperatura y las condiciones de luz sobre estos suelos, permitiendo que más esporas se reproduzcan en dichas zonas cultivables (Cardoso *et al.*, 2003). En forma adicional, la rápida degradación de las zonas de bosque generada por la ampliación de la frontera agrícola,

Tabla 3. Índices de Simpson, Shannon y densidad de esporas de micorrizas arbusculares en 100 g de suelo seco en fincas de la zona rural de Dagua, Valle del Cauca, Colombia.

Finca	Zona	Simpson D	Shannon H'	Densidad esporas	DPM	DGM
Manejo agroecológico (finca)						
El Brillante	Cultivo	0.375	1.4	6.71	3.936	3.197
	Bosque	—	—	—	4.24	3.634
	Erosión	1	—	1.43	2.58	1.637
El Cedro	Cultivo	0.1333	2.373	13.4	3.498	3.28
	Bosque	0.2397	1.633	27.8	3.461	2.553
	Erosión	0.3333	1.99	3.57	2.664	1.92
La Esperanza	Cultivo	0.3197	1.5	31.92	3.961	3.225
	Bosque	0.28	1.332	6.9	3.57	2.858
	Erosión	0.5	0.6931	2.7	2.815	1.116
Villamaría	Cultivo	0.4176	1.322	56.23	4.656	4.335
	Bosque	1	—	1.8	4.599	4.249
	Erosión	—	—	—	2.433	1.558
Manejo agrícola intensivo (finca)						
La Meseta	Cultivo	—	—	—	2.815	1.936
	Bosque	0.22	1.748	11.55	1.713	1.7
	Erosión	—	—	—	2.43	1.554

Valores de índices de estabilidad de agregados por finca divididos según su manejo agrícola.

sumado a los efectos perjudiciales e indirectos resultantes de la actividad agrícola (Bethlenfalvay, 1993), ocasionan una reducción en la diversidad y una abundancia de las esporas de micorrizas en los bosques. La baja densidad y diversidad de esporas halladas en suelos erosionados es un resultado razonable y están de acuerdo con los resultados obtenidos por Munyanziza *et al.* (1997). Los índices de Simpson fueron similares entre sí en las zonas de cultivo, bosque y suelo erosionado, mostrando bajos niveles de dominancia entre morfoespecies.

Análisis de estabilidad de agregados

Se observaron diferencias en los valores de los índices de estabilidad de agregados DPM ($P = 0.023$), DGM ($P = 0.0007$) y densidad de esporas de micorrizas ($P = 0.0231$) entre las zonas de cultivo, bosque y erosión. Con el análisis de post Anova se observó que los valores más altos en los índices de estabilidad de agregados ocurrieron en las zonas de cultivo ($P = 0.0044$ DPM y 0.0013 DGM) y bosque ($P = 0.0048$ DPM y 0.0002 DGM) seguidos de los suelos erosionados. No se encontraron diferencias en los valores de abundancia y riqueza de esporas entre las zonas de estudiadas ($P = 0.0656$ y 0.0529). No obstante se observó que la abundancia y riqueza de esporas tendió a ser mayores en las zonas de cultivo y a disminuir en las zonas de bosque y suelo erosionado (Figura 1). Estas diferencias son influenciadas por el manejo realizado previamente en los cultivos, el cual puede causar alteraciones diferentes en las propiedades del suelo (Osorio, 2009). Por tanto, en la finca La Meseta los manejos agrícolas intensivos pueden estar causando alteraciones al disminuir el tamaño medio de los agregados y,

por ende, la estabilidad de estos. En dicha finca, el tamaño fue de 2.8 mm para DPM y 1.9 mm para DGM (Tabla 2), cuando el tamaño óptimo de agregados en suelos de cultivo debe estar alrededor de 3 mm (Jaramillo, 2001). En contraste, en las fincas El Brillante, La Esperanza, Villamaría y El Cedro, se registraron valores en los índices de estabilidad de agregados por encima de los 3 mm en las zonas de cultivo, lo que sugiere una mayor estabilidad y manejos agrícolas que causan menor impacto negativo sobre el suelo. Como resultado de los manejos agroecológicos en estas fincas, la diversidad de micorrizas en las zonas de cultivo fue mayor que en la finca con manejo agrícola intensivo.

Las características de las prácticas agroecológicas son clave para determinar las diferencias en los valores de los índices DPM, DGM, diversidad y densidad de esporas en los suelos de las zonas erosionadas y de cultivo. Dichas características permiten establecer en las zonas de cultivo una mayor cobertura vegetal y facilitan la presencia de agentes aglutinantes temporales como raíces y redes de micelios micorrícicos sobre el suelo. A su vez, estos agentes proporcionan materia orgánica al sistema permitiendo que la microbiota contenida en el suelo desarrolle una estructura de agregados porosos de forma redondeada, típica de los horizontes A, denominada estructura migajosa, la cual brinda una mayor estabilidad al suelo (Jaramillo, 2001).

Generalmente los suelos dependen, en gran medida, del material orgánico para mantener la estabilidad estructural. Por tanto, la pérdida de la capa orgánica puede generar una reducción en los agregados de 0.25 a 2 mm de diámetro, los cuales se encargan de brindar mayor estabilidad (Wilson *et al.*, 2009). Se observó igualmente que los suelos de la zona boscosa presentan similitudes en el estado de agregación y estabilidad con los de la zona de cultivo (Figura 1). Esta similitud se debe a que, al igual que en los bosques, en las plantaciones cafeteras existen bajas o nulas prácticas de arado, lo que favorece la permanencia de un alto porcentaje de macroagregados estables, e indica la ausencia de disturbio en estos suelos, en especial en las redes de micelios y raíces (Verbruggen y Kiers, 2010).

Relación entre índices de diversidad de HMA y estabilidad de agregados

El índice de estabilidad estructural DGM presentó relación significativa en relación con la diversidad ($r = 0.579$; $P = 0.023$) y densidad de esporas de micorrizas arbusculares ($r = 0.66$; $P = 0.007$). Por otro lado, el DPM también presentó relación significativa con la densidad de esporas de hongos micorrícicos ($r = 0.54$; $P = 0.038$). Con este análisis se observó que las variables de estabili-

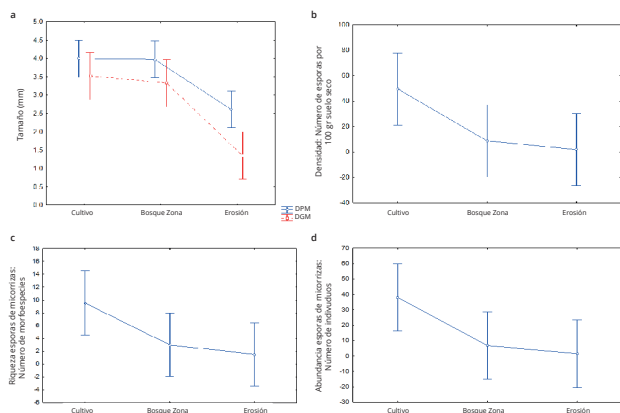


Figura 1. Valores de los índices de estabilidad DPM y DGM (tamaño de los agregados en milímetros mm) (a), densidad de esporas (b), riqueza (c) y abundancia (d) entre las zonas de cultivo, bosque y erosión de las fincas evaluadas en la zona rural de Dagua, Valle del Cauca, Colombia.

DPM, DGM = Índices de los diámetros geométrico medio (DGM) y ponderado medio (DPM).

dad de agregados aumentan proporcionalmente a medida que lo hace la densidad o la diversidad de esporas de micorrizas arbusculares evaluadas en los suelos de las fincas (Tabla 4).

Tabla 4. Correlaciones significativas ($P < 0.05$) entre densidad de esporas por 100 g de suelo y DPM y DGM e índice de diversidad de Shannon y DGM.

Indice	DPM	DGM	Densidad	Diversidad H
DPM	1.00			
DGM	0.95	1.00		
Densidad	0.54 ^b	0.67	1.00	
Diversidad H	0.48	0.58	0.80	1.00

a. Índices de los diámetros geométrico medio (DGM) y ponderado medio (DPM).

b. Los valores significativos y de importancia para el análisis se muestran en letra cursiva.

Las relaciones encontradas entre las variables de estabilidad de agregados, la densidad y diversidad de esporas de micorrizas sugieren que las comunidades de especies de HMA pueden influenciar la agregación del suelo en diferentes escalas. En primer lugar, los productos bioquímicos secretados por las micorrizas se consideran un mecanismo importante en la agregación del suelo, entre ellos, la glomalina, una proteína fúngica que actúa como agente aglutinante formando cadenas de pequeñas bolsas pegajosas ('sticking string bags') que son secretadas por las hifas logrando estabilizar los agregados (Picone, 2003). Al igual que la glomalina, existen otros compuestos que se encuentran en las micorrizas, como polisacáridos, hidrofobinas y mucilagos, que podrían tener un rol funcional en la estabilidad de agregados (Rilling y Mummey, 2006). De otra parte, el crecimiento de amplias redes de micelio de hongos micorrícicos debidas a una alta densidad de esporas, genera una acción mecánica directamente sobre la materia orgánica del suelo, aglomerando partículas pequeñas que se enlazan con hifas y residuos vegetales que, a su vez, forman agregados. Conforme estos agregados aumentan en tamaño, la contribución de las micorrizas incrementa en importancia (Cardoso *et al.*, 2003).

Por otra parte, la baja cantidad de materia orgánica, como en el caso de las zonas erosionadas, constituye en un factor desfavorable que impide el mantenimiento de comunidades de hongos formadores de micorrizas y, por ende, de la estabilidad de agregados que mantienen en condiciones óptimas la estructura del suelo. No se descarta que algunos bosques hayan sufrido procesos de degradación del suelo por remoción de la capa orgánica para usos como substrato en viveros y jardines.

En el análisis de Permanova no se detectaron diferencias estadísticamente significativas en la estructura de las comunidades de especies de HMA entre los sistemas ($P > 0.31$). Las elevadas abundancias de morfoespecies de *Glomus* y *Entrophospora*, las cuales son independientes del grado de disturbio o tipo de uso del suelo, pueden ser un factor determinante en la ausencia de dichas diferencias en la estructura de las comunidades de hongos formadores de micorrizas (Muleta *et al.*, 2008).

Conclusiones

Las fincas con manejos agroecológicos brindan características adecuadas para sustentar una mayor densidad de esporas de micorrizas arbusculares. Una de esas características es la estabilidad estructural que en los suelos del estudio alcanzó valores más altos en fincas con estos tipos de manejos, en comparación con suelos en fincas con manejos agrícolas intensivos.

La relación positiva entre estructura de suelo y densidad de esporas micorrícicas sugiere que éstas tienen un papel fundamental para generar más agregación y estabilidad previniendo procesos erosivos.

Agradecimientos

A los propietarios de las fincas en la zona rural de Dagua por permitir la realización del estudio; al profesor Raúl Posada de la Universidad Minuto de Dios en Bogotá por brindar las bases de identificación taxonómica; a Edier Soto, por su asesoría estadística; al Laboratorio de Aguas y Suelos Agrícolas (LASA) de la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (Eidenar), y al Laboratorio de Biología de la Universidad del Valle por facilitar los equipos; al Grupo de Ecología en Agroecosistemas y Hábitats Naturales (Geahna) por la retroalimentación académica. Este proyecto fue financiado por la Universidad del Valle, a través de la Vicerrectoría de Investigaciones con el Proyecto Estrategias agroecológicas para la sostenibilidad y adaptación a la variabilidad y el cambio climático en la cuenca alta del río Dagua.

Referencias

- Altieri, M.; y Koohafkan, P. 2008. *Enduring farms: climate change, smallholders and traditional farming communities*. Penang: TNW, Penang, Malasia. 63 p.
- Altieri, M.; y Nicholls, C. 2002. Un método agroecológico rápido para la evaluación de la sostenibilidad de cafetales. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*. 64:17 - 24.
- Andrade, S.; Mazzafera, P.; Schiavinato, M.; y Silveira, A. 2009. Arbuscular mycorrhizal association in coffee. *J. Agric. Sci.* 147:105 - 115.

- Arshad, M.; y Martin, S. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. *Agric. Ecosys. Environ.* 88:153 - 160.
- Beare, M.; Vikram, M.; Tiam, G.; y Srivastava, S. 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the tropics: the role of decomposer biota. *Appl. Soil Ecol.* 6:87 - 108.
- Bethlenfalvay, G. 1993. The mycorrhizal plant-soil system in sustainable agriculture. En: Ferrera, C. y Quintero, R. (eds.). *Agroecología, sostenibilidad y educación*. Colegio de Posgraduados, Montecillo, México, p. 127 - 137.
- Bolaños, B.; Rivillas, C.; y Vásquez, S. 2000. Identificación de micorrizas arbusculares en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé.* 51:245 - 262.
- Cardoso, I.; Janssen, C.; Oenema, B.; y Kuyper, T. 2003. Distribution of mycorrhizal fungal spores in soils under agroforestry and monocultural coffee systems in Brazil. *Agrofor. Syst.* 58:33 - 43.
- Cardoso, I y Kupier, T. 2006. Mycorrhizas and tropical soil fertility. *Agric. Ecosyst. Environ.* 116:72 - 84.
- Espinal, L. 1968. Visión ecológica del departamento del Valle del Cauca. Corporación Autónoma Regional del Cauca (CVC) y el Ministerio de Agricultura, Cali, Colombia, p. 65 - 67.
- Guadamarrá, P. y Álvarez, S. 1999. Abundance of arbuscular mycorrhizal fungi spores in different environments in a tropical rain forest, Veracruz, México. *Mycorrhiza.* 8:267 - 270.
- Helgason, T.; Daniell, T.; Fitter, A.; y Young, J. 1998. Ploughing up the wood-wide web? *Nature* 394:431.
- Jaizme, V. y Rodríguez, A. 2008. Integración de microorganismos benéficos (hongos micorríticos y bacterias rizosféricas) en agrosistemas de las Islas Canarias. *Agroec.* 3:33 - 39.
- Jaramillo, J. 2001. *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Medellín: Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. 613 p.
- Kemper, W. D. y Chepil, W. S. 1965. *Size distribution of aggregates*. In: *Methods of Soil Analysis. Part 1*. C. A. Black et al. (eds.). American Society of Agronomy Inc. Publisher. Wisconsin. Agronomy no. 9. p. 499 - 510.
- Maurer, B. A. y McGill, B. J. 2011. *Measurement of species diversity*. En: Magurran, A. E. y McGill, B. J (eds.). *Biological diversity, frontiers in measurement and assessment*. Oxford University Press Inc. Nueva York. Chap. 5. p. 55-65.
- Muleta, D.; Assefa, F.; Nemomissa, S. y Granhall, U. 2008. Distribution of arbuscular mycorrhizal fungi spores in soils of smallholder agroforestry and monocultural coffee systems in southwestern Ethiopia. *Biol. Fert. Soils.* 44:653 - 659.
- Munyanziza, E.; Kehri, H. y Bagyaraj, J. 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agro-ecosystem function in the tropics: the role of mycorrhiza on crops and trees. *Appl. Soil Ecol.* 6:77 - 85.
- Oehl, F.; Sieverding, E.; Ineichen, K.; Mäder, P.; Boller, T. and Wiemken, A. 2003. Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems of Central Europe. *Appl. Environ. Microbiol.* 69(5):2816 - 2824.
- Oehl F, Sieverding E, Mäder P, Dubois D, Ineichen K, Boller T, Wiemken A. 2004. Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Ecos. Ecol.* 138(4):574 - 583.
- Oehl, F.; Sieverding, E.; Palenzuela, J.; Ineichen, K.; y Da Silva, G. 2011. Advances in Glomeromycota taxonomy and classification. *Imafungus.* 2(2):191 - 199.
- Osorio, I. 2009. Generación de la línea base de indicadores para el monitoreo de calidad de suelos en el área de influencia del distrito de riego del Alto Chicamocha, Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 143 p.
- Picone, C. 2003. *Managing mycorrhizae for sustainable agriculture in the tropics*. En: Vandermeer, H. (ed.). *Tropical agroecosystems*. CRC press. EE.UU. p. 95 - 129.
- Redecker, D.; Shübler, A.; Stockinger, H.; Stürmer, L.; Morton, J.; y Walker, C. 2013. An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza* 23(7):515 - 531.
- Rilling, M. y Mummey, D. 2006. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytol.* 171(1):41 - 53.
- Sánchez De Práguer, M. 1999. Endomicorrizas en agroecosistemas Colombianos. Palmira: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Valle del Cauca. 227 p.
- Sánchez De Práguer, M.; Posada, R.; Velázquez, D.; y Narváez, M. 2010. *Metodologías básicas para el trabajo con micorriza arbuscular y hongos formadores de micorriza arbuscular*. Palmira: 1ª. ed, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Valle del Cauca. 139 p.
- Sieverding, E. 1983. Manual de métodos para la investigación de la micorriza vesículo-arbuscular en el laboratorio. Palmira: Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT, Palmira, Valle del Cauca. 121 p.
- Verbruggen, E.; y Kiers, E. 2010. Evolutionary ecology of mycorrhizal functional diversity in agricultural systems. *Evol. App.* 3:547 - 560.
- Wilson, W; Rice, C.; Rilling, M.; Springer, A.; y Harnett, D. 2009. Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments. *Ecol. Lett.* 12:452- 461.