

EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE SUELOS ESTABLECIDOS CON CAFÉ BAJO SOMBRA Y A PLENA EXPOSICIÓN SOLAR¹

Diego Alejandro Cardona-Calle*; Siavosh Sadeghian-Khalajabadi**

RESUMEN

CARDONA C., D. A.; SADEGHIAN KH., S. Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. Cenicafé 56(4):348-364. 2005.

En plantaciones de café con sombrío de guamo (*Inga spp*) y a libre exposición solar, ubicadas en ocho unidades cartográficas de suelos, se midieron 33 propiedades físicas y químicas en los primeros 40cm de profundidad con el objeto de determinar el efecto de estos dos agroecosistemas. En suelos con cafetales a la sombra se encontraron mayores valores de porosidad total y humedad, mientras que las variables resistencia a la penetración, densidad aparente, temperatura y los contenidos de potasio y azufre, fueron menores que en los cafetales a libre exposición. La mayores diferencias entre agroecosistemas se encontraron en los 10cm superiores del perfil. El contenido de materia orgánica fue más alto en los cafetales con sombra. La unidad de suelo influyó en la respuesta al uso y manejo del suelo.

Palabras clave: Café, agroecosistemas, unidad de suelo, *Inga spp.*, propiedades físicas, propiedades químicas

ABSTRACT

In coffee plantations with shade of guamo (*Inga spp*) and to free solar exposure, located in eight soil cartographic units, 33 physical and chemical properties in first 40cm of depth were evaluated with the objective of determining the effect of two agroecosystems. In eight soil units in coffee with shade and to free solar exposure 33 physical and chemical properties in first 40cm of depth with the intention of both evaluating the differences in the physical properties and the contents of nutrients were evaluated due to of the soil in these agroecosystems. In soils with coffee plantations in the shade were greater values of total porosity and humidity, whereas the variables resistance to the penetration, apparent density, temperature and the contents of potassium and sulfur, were minors who in the coffee plantations to free exposure. The greater differences between agroecosistemas were in 10cm superior of the profile. The content of organic matter was upper in the coffee plantations with shade. The ground unit influenced in the answer to the use and handling of the soil.

Keywords: Coffee agroecosystems, soil unit, *Inga spp.*, physical properties, chemical properties

¹ Fragmento de la tesis "Caracterización de la fertilidad del suelo y ciclo de nutrientes en monocultivos de café (*Coffea arabica*) y bajo sombrío de guamo (*Inga spp*).

* Ingeniero Forestal, Universidad Distrital.

** Investigador Científico I. Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

A través del tiempo, la caficultura colombiana ha evolucionado en diferentes aspectos, entre los que se destaca el cambio de los cafetales tradicionales bajo sombra hacia sistemas más productivos a libre exposición solar, donde se emplean variedades desarrolladas para tales condiciones y con mayores rendimientos. No obstante, en muchas áreas cafeteras del país se emplean los sistemas con sombrío, debido a que en estos sitios existen restricciones climáticas y/o edáficas para la producción de café a plena exposición solar.

Como es de esperarse, las intervenciones realizadas en los ecosistemas ocasionan cambios sobre diversos aspectos. Algunos autores citados por Jaramillo y Cháves (6) han encontrado que la transformación de bosques en cultivos intensivos producen alteraciones en el microclima, el ciclo hidrológico, el balance de energía y la fauna y la flora del suelo; así como la reducción en el reciclaje de nutrientes, el contenido de materia orgánica y las bases intercambiables. De la misma forma, los cambios en los sistemas de uso y manejo de los cultivos traen consigo modificaciones sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

Schroth *et al.* (13), afirman que los sistemas de uso del suelo basados en cultivos asociados con árboles de sombra son más eficientes para mantener la fertilidad del suelo que los cultivos anuales, y entre los beneficios de las asociaciones se cuenta la fijación de nitrógeno por especies leguminosas, especialmente en condiciones de deficiencia de este elemento. Diferentes investigadores han comparado algunas características del suelo en distintos sistemas de cultivo de café. Mogollón *et al.* (7), encontraron mayor cantidad de nitrógeno potencialmente disponible en cafetales bajo sombrío de *Inga villosissima* comparados con cultivos establecidos bajo sombra de *Citrus sinensis* en Venezuela.

Sadeghian *et al.* (12), indican que los suelos que albergan cafetales con sombrío poseen mejores condiciones de retención de humedad, densidad, porosidad, estabilidad y permeabilidad que aquellos con cultivos a libre exposición solar los cuales a su vez, mostraron mayores valores de acidez.

Durante años, los cafeteros han atribuido bondades en términos de fertilidad de suelos a los sistemas de café bajo sombra, fundamentalmente al de aquellos que utilizan guamo (*Inga spp*), especie que continúa siendo la más usada para tal fin. Sin embargo, éstas no han sido claramente establecidas.

Dentro del marco de referencia descrito se planteó esta investigación que buscó caracterizar la fertilidad del suelo sembrado con cafetales con y sin sombrío de guamo, para establecer las diferencias que existen entre ellos y poder definir pautas para su evaluación y manejo.

MATERIALES Y MÉTODOS

En ocho localidades de la zona cafetera colombiana (Tabla 1), se seleccionaron cafetales a libre exposición solar y con sombrío de guamo (*Inga spp*), teniendo como criterio los siguientes aspectos:

- Cercanía entre los dos tipos de plantación (libre exposición y bajo sombra).
- Tiempo de uso del suelo: mínimo 10 años bajo el tipo de cultivo correspondiente.
- Densidad del cafetal: en lotes con sombrío fue de 2.500 a 5.000 plantas/ha y en los monocultivos de 5.000 a 10.000 plantas/ha.
- Densidad del sombrío: mínimo 50 árboles de guamo por hectárea y máximo 300.
- Extensión de los lotes: el área mínima considerada fue de 0,5ha en ambos casos.

- Variedad de café: los sistemas tradicionales cultivados con las variedades Típica, Borbón, Caturra o Colombia y los sistemas a libre exposición establecidos con la variedad Caturra o la variedad Colombia.

- Manejo: en los cafetales con sombra se realizaban una o dos desyerbas por año, se fertilizaban con dosis bajas, y al sombrero se le realizaban podas de baja intensidad. En los cafetales al sol se hacían las prácticas normales de fertilización, el control de arvenses, el control fitosanitario y demás tecnologías recomendadas por Cenicafé.

En la Tabla 1 se presenta la información general sobre los suelos y las localidades de muestreo y, en la Figura 1 se detalla la georeferenciación de los sitios evaluados.

En cada uno de los 16 lotes seleccionados se hicieron las excavaciones en las cuales se recolectaron muestras de suelo disturbado y sin disturbar en las siguientes profundidades: 0-5cm, 5-10cm, 10-15cm, 15-20cm, 20-30cm y 30-40cm. Para lo anterior, se utilizó un barreno de núcleo y cilindros de 5cm de altura y 4,83cm de diámetro. Además, se midieron la temperatura y la resistencia a la penetración. Debe señalarse que hubo

inconvenientes en la evaluación de estas dos últimas propiedades en las Unidades 200 y Suroeste, razón por la cual no se obtuvieron los valores correspondientes.

Se analizaron 33 propiedades indicadoras de la fertilidad del suelo, 15 físicas y 18 químicas, cuya agrupación según su naturaleza y los métodos empleados de evaluación están consignados en la Tabla 2.

Con la información obtenida se realizó un análisis de estadística descriptiva en diferentes niveles de detalle. Con los promedios generales de las seis profundidades se compararon ambos agroecosistemas mediante la prueba de diferencia mínima significativa (D.M.S.) al 5%; igualmente, se describió el comportamiento de las diferentes características a través del perfil.

Se realizó un análisis de componentes principales para identificar las características de mayor peso en la variación total y un análisis de agrupación (cluster) al nivel de agroecosistema y de unidad; los grupos resultantes se compararon mediante la prueba de Duncan al 5%.

Tabla 1. Unidades cartográficas de suelo, clasificación y ubicación.

| Unidad de Suelo | Clasificación Taxonómica | Material Parental | Departamento | Municipio | Vereda |
|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------|--------------------|
| Suroeste | Typic Dystropept | Sedimentario-volcánico | Antioquia | Fredonia | Murrupal |
| Chinchiná | Typic Dystrandept | Cenizas volcánicas | Caldas | Chinchiná | La Quebra |
| Timbío | Hydric Fulvudands | Cenizas volcánicas | Cauca | El Tambo | San Joaquín |
| Guadalupe | Typic Dystropept | Arenisca de grano fino | Huila | Pitalito | Palmar del Criollo |
| Montenegro | Typic Dystrandept | Cenizas volcánicas | Quindío | Buenavista | Río verde |
| San Simón | Eutropepts | Granito hornbléndico biotítico | Tolima | Ibagué | Perico |
| Fondesa | Typic Dystrandept | Cenizas volcánicas | Valle | El Cairo | Albán |
| 200 | Typic Dystropept | Basalto hornbléndico biotítico | Valle | Dagua | La Virgen |

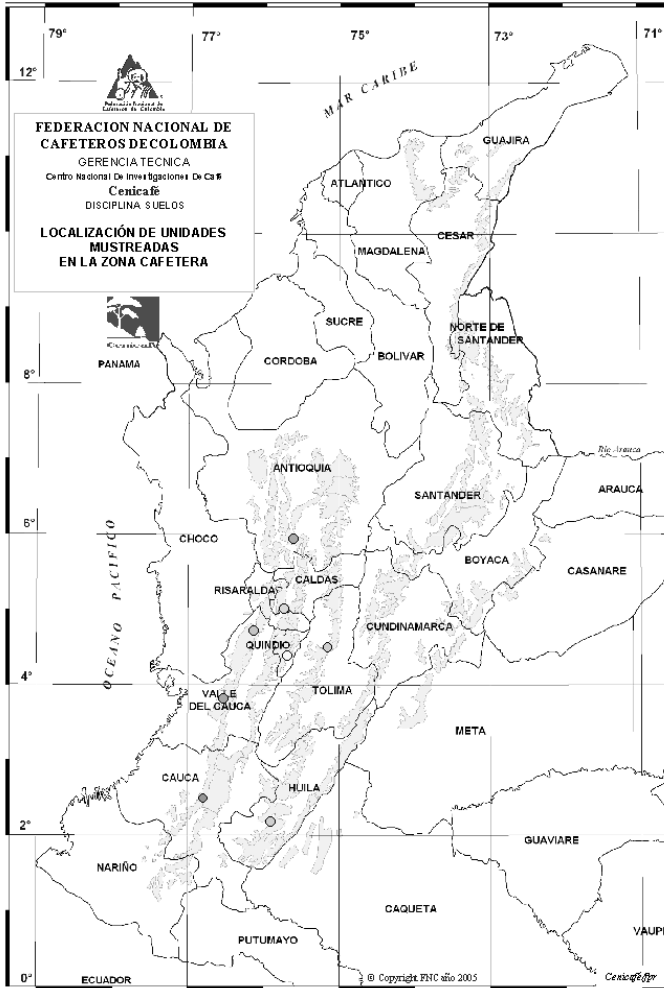


Figura 1.
Ubicación de unidades de suelo estudiadas

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al comparar los promedios generales de las propiedades del suelo (ocho localidades y seis profundidades), se registraron diferencias significativas entre los dos agroecosistemas para ocho características, cinco físicas y tres químicas. Los suelos de los cafetales con sombrío tuvieron mayores valores de porosidad total, humedad y contenido de sodio, mientras que en los cafetales a plena

exposición solar se encontraron mayores valores de resistencia a la penetración, densidad aparente y temperatura, así como altos contenidos de potasio y azufre.

En la Unidad Guadalupe las variables materia orgánica, humedad volumétrica y porosidad total mostraron mayores valores en los cafetales establecidos bajo sombra (Figura 2), mientras que esta respuesta se observó en la Unidad Chinchiná para la variable humedad volumétrica.

Tabla 2. Propiedades evaluadas y métodos empleados.

| PROPIEDAD | MÉTODO |
|---|--|
| FÍSICAS | |
| Propiedades volumétricas | |
| Densidad real | Picnómetro |
| Densidad aparente(SD) | Cilindro |
| Porosidad total | Indirecto |
| Microporos | Indirecto |
| Mesoporos | Indirecto |
| Macroporos | Indirecto |
| Propiedades texturales | |
| Arena | Bouyoucos |
| Limo | Bouyoucos |
| Arcilla | Bouyoucos |
| Propiedades Estructurales | |
| Distribución de agregados en seco | Tamiz |
| Estabilidad de agregados en húmedo | Yoder |
| Propiedades hidrológicas | |
| Humedad del suelo | Estufa |
| Conductividad hidráulica(SD) | Permeámetro cabeza constante |
| Propiedades mecánicas | |
| Resistencia a la penetración | Penetrómetro |
| Propiedades térmicas | |
| Temperatura | Termómetro |
| QUÍMICAS | |
| Materia orgánica* | Colorimetría (Walkey y Black) |
| Capacidad intercambio catiónico | Colorimetría (reactivo Nessler) |
| PH | Potenciométrico |
| Indicadores de la disponibilidad de nitrógeno | |
| - Nitrógeno total (N) | Kjeldahl |
| - Nitratos (NO ₃ ⁻) | KCl 2 M y Devarda |
| - Amonio (NH ₄ ⁺) | KCl 2 M y Devarda |
| Fósforo disponible (P) | Bray II y coloración Bray Kurtz |
| Azufre (S) | Fosfato monocalcico 0.008 M y Turbidimetría |
| Bases intercambiables y aluminio (Al) | |
| - Calcio (Ca), Magnesio (Mg), | Acetato de amonio 1N, pH 7, |
| - Potasio (K) y Sodio (Na) | Espectrofotometría absorción atómica |
| - Aluminio de cambio (Al) | KCl 1N espectrofotometría de Espectrofotometría absorción atómica |
| Elementos menores | |
| - Hierro (Fe), Cobre (Cu), Zinc (Zn) y Manganeso (Mn) | EDTA 0,01 M en acetato de amonio 1N, espectrofotometría de absorción atómica |
| - Boro (B) | Colorimetría (agua caliente y coloración con azometina) |

SD: Muestras sin disturbar

* La materia orgánica fue analizada como propiedad química independiente, como un indicador de la disponibilidad de nitrógeno y como una propiedad física de tipo volumétrica.

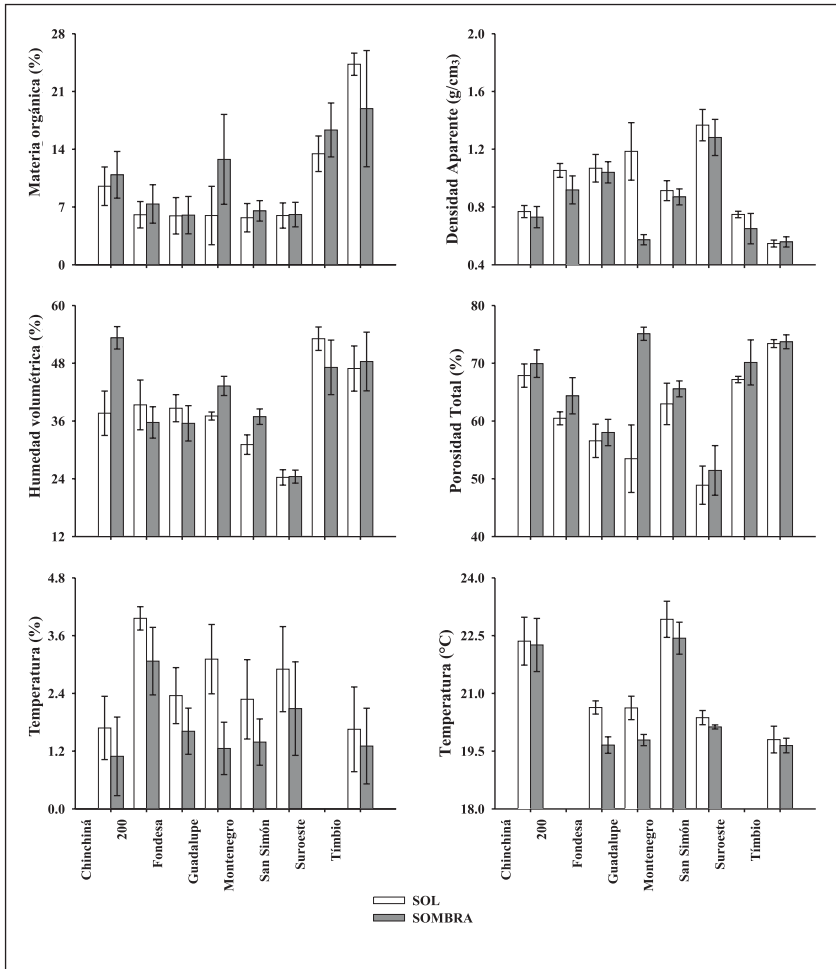


Figura 2. Promedio general de la materia orgánica y las características físicas que presentaron diferencia significativa entre agroecosistemas, para las ocho unidades de suelos estudiadas.

En los cafetales establecidos a plena exposición solar en la Unidad Guadalupe se observaron los mayores valores para las variables resistencia a la penetración, densidad aparente y temperatura; para esta última variable también se observó un comportamiento similar en la Unidad Fondesa.

El contenido de materia orgánica fue superior en los suelos de cafetales bajo sombra de siete unidades de suelo, condición que fue más evidente en las Unidades Chinchiná, 200, Guadalupe y Suroeste. Solamente en la Unidad Timbio se observó una tendencia

contraria, comportamiento que se atribuyó a la siembra de los cafetos en un lote con bajos contenidos de materia orgánica y limitantes físicas. En este caso, el establecimiento de los árboles de sombra se realizó con el fin de mejorar las condiciones del terreno y propiciar un ambiente más favorable para el crecimiento de las plantas.

En cafetales al sol se evidenció una mayor compactación del suelo, pues en siete de las ocho localidades, estos tuvieron valores más altos de densidad aparente y resistencia a la penetración.

La temperatura del suelo siempre fue mayor en cafetales a plena exposición solar. Esta respuesta puede deberse según Do Prado y Veiga (3), a la creación de un microclima especial en los cultivos bajo sombra, con una menor velocidad del viento y mayor humedad relativa, entre otros, aspectos que afectan la temperatura del suelo.

Los mayores valores de porosidad encontrados en todos los cafetales bajo guamo puede afectar positivamente otras propiedades del suelo. Algunos autores (9, 15), señalan que la porosidad determina condiciones de aireación y drenaje para el desarrollo de las plantas, así como el crecimiento de raíces, pelos radicales y desarrollo de los microorganismos.

De otra parte, la humedad volumétrica del suelo fue mayor en los cafetales con sombrío en cinco sitios, lo que indica una mejor economía hídrica en éstos. Los mayores promedios registrados a plena exposición en las Unidades 200, Fondesa y Suroeste obedecen a su porcentaje superior de meso y microporos (Tabla 4), responsables del almacenamiento de agua. Debe destacarse que en el análisis de humedad gravimétrica, siete localidades mostraron valores superiores en cafetales bajo sombrío de guamo.

En las Tablas 3 y 4 se muestran los promedios de las variables físicas y químicas estudiadas en los dos agroecosistemas de las ocho unidades de suelo.

Tabla 3. Valores promedio de las propiedades físicas evaluadas por agroecosistema en cada unidad.

| Propiedad | Sistema | Chinchiná | 200 | Fondesa | Guadalupe | Montenegro | San Simón | Suroeste | Timbío |
|------------------------------------|---------|-----------|-------|---------|-----------|------------|-----------|----------|--------|
| Densidad real (g/cm ³) | Sombra | 2,42 | 2,58 | 2,47 | 2,30 | 2,52 | 2,64 | 2,16 | 2,12 |
| | Sol | 2,39 | 2,67 | 2,46 | 2,53 | 2,47 | 2,67 | 2,27 | 2,05 |
| Microporos (%) | Sombra | 34,97 | 36,32 | 28,00 | 37,41 | 26,54 | 22,40 | 31,74 | 30,79 |
| | Sol | 28,30 | 39,84 | 25,12 | 34,81 | 24,15 | 17,23 | 34,41 | 31,74 |
| Mesoporos (%) | Sombra | 19,94 | 6,08 | 14,00 | 10,14 | 16,74 | 12,72 | 17,37 | 17,05 |
| | Sol | 18,49 | 4,96 | 18,70 | 5,43 | 12,98 | 11,98 | 15,80 | 13,62 |
| Macroporos (%) | Sombra | 15,03 | 21,96 | 16,01 | 27,56 | 22,28 | 16,33 | 21,03 | 25,88 |
| | Sol | 21,07 | 15,67 | 12,76 | 15,51 | 25,84 | 19,67 | 16,96 | 28,05 |
| Arena (%) | Sombra | 51,08 | 18,87 | 40,10 | 45,45 | 56,63 | 49,96 | 32,31 | 46,51 |
| | Sol | 49,10 | 13,16 | 36,28 | 21,00 | 64,01 | 55,43 | 28,36 | 49,00 |
| Limo (%) | Sombra | 33,14 | 22,13 | 31,98 | 36,92 | 21,67 | 16,60 | 33,54 | 29,94 |
| | Sol | 33,70 | 22,62 | 32,55 | 27,74 | 20,77 | 17,41 | 29,68 | 27,63 |
| Arcilla (%) | Sombra | 15,78 | 59,00 | 27,92 | 17,63 | 21,70 | 33,43 | 41,03 | 23,55 |
| | Sol | 17,20 | 64,23 | 31,17 | 51,26 | 15,23 | 27,16 | 41,96 | 23,38 |
| Distribución de agregados (mm) | Sombra | 3,65 | 4,15 | 3,77 | 2,28 | 2,13 | 3,56 | 2,73 | 2,58 |
| | Sol | 3,37 | 4,83 | 3,54 | 3,58 | 1,83 | 3,35 | 3,13 | 2,60 |
| Estabilidad de agregados (mm) | Sombra | 3,16 | 3,00 | 3,22 | 3,20 | 3,09 | 2,58 | 3,13 | 3,17 |
| | Sol | 3,14 | 2,66 | 3,22 | 2,90 | 3,22 | 2,90 | 2,85 | 3,26 |

Tabla 4. Valores promedio de las propiedades químicas evaluadas por agroecosistema en cada unidad.

| Propiedad | Sistema | Chinchiná | 200 | Fondesa | Guadalupe | Montenegro | San Simón | Suroeste | Timbío |
|---|---------|-----------|--------|---------|-----------|------------|-----------|----------|--------|
| pH | Sombra | 5,20 | 5,08 | 5,48 | 5,17 | 4,88 | 5,58 | 4,33 | 5,08 |
| | Sol | 4,95 | 4,70 | 5,30 | 4,42 | 5,50 | 5,87 | 4,92 | 5,05 |
| CIC (cmolc.kg ⁻¹) | Sombra | 21,33 | 18,67 | 16,00 | 31,00 | 14,67 | 15,17 | 28,00 | 26,50 |
| | Sol | 19,17 | 16,83 | 16,83 | 15,67 | 13,33 | 12,33 | 24,67 | 31,50 |
| Nitrógeno (%) | Sombra | 0,52 | 0,27 | 0,25 | 0,48 | 0,32 | 0,20 | 0,60 | 0,70 |
| | Sol | 0,44 | 0,21 | 0,27 | 0,19 | 0,29 | 0,18 | 0,50 | 0,88 |
| Nitratos (µg/g suelo) | Sombra | 269,12 | 97,19 | 14,68 | 145,39 | 31,67 | 99,95 | 121,36 | 207,70 |
| | Sol | 114,63 | 87,02 | 16,85 | 110,86 | 9,53 | 72,40 | 79,96 | 279,06 |
| Amonio (µg/g suelo) | Sombra | 51,72 | 40,24 | 18,80 | 44,07 | 15,55 | 47,63 | 37,83 | 48,06 |
| | Sol | 33,62 | 39,06 | 16,23 | 45,98 | 11,80 | 33,82 | 46,78 | 53,60 |
| Fósforo (mg.kg ⁻¹) | Sombra | 4,17 | 3,50 | 22,17 | 4,50 | 15,33 | 11,33 | 9,67 | 7,33 |
| | Sol | 16,00 | 59,83 | 45,33 | 2,00 | 11,50 | 24,00 | 6,83 | 6,00 |
| Azufre (mg.kg ⁻¹) | Sombra | 4,17 | 13,75 | 7,60 | 1,35 | 7,85 | 0,72 | 9,13 | 3,38 |
| | Sol | 13,53 | 27,30 | 10,57 | 3,23 | 2,85 | 0,92 | 12,73 | 4,42 |
| Calcio (cmol _c .kg ⁻¹) | Sombra | 1,77 | 3,37 | 7,02 | 2,32 | 1,83 | 10,30 | 0,48 | 0,97 |
| | Sol | 0,15 | 2,88 | 6,37 | 0,73 | 2,87 | 9,38 | 2,98 | 3,35 |
| Magnesio (cmol _c .kg ⁻¹) | Sombra | 0,42 | 1,40 | 1,37 | 0,67 | 0,22 | 3,58 | 0,23 | 0,48 |
| | Sol | 0,05 | 0,72 | 1,12 | 0,47 | 0,57 | 2,85 | 0,63 | 1,02 |
| Potasio (cmol _c .kg ⁻¹) | Sombra | 0,13 | 0,10 | 0,75 | 0,22 | 0,21 | 0,23 | 0,24 | 0,21 |
| | Sol | 0,09 | 0,85 | 0,67 | 0,27 | 0,46 | 0,19 | 0,27 | 0,22 |
| Sodio (cmol _c .kg ⁻¹) | Sombra | 0,02 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,02 |
| | Sol | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |
| Aluminio (cmol _c .kg ⁻¹) | Sombra | 0,52 | 0,77 | 0,07 | 0,62 | 1,33 | 0,25 | 8,35 | 1,28 |
| | Sol | 0,95 | 1,37 | 0,18 | 4,38 | 0,30 | 0,25 | 3,27 | 1,23 |
| Hierro (mg.kg ⁻¹) | Sombra | 267,00 | 310,33 | 591,33 | 149,83 | 225,67 | 320,50 | 330,50 | 201,50 |
| | Sol | 207,50 | 347,33 | 735,83 | 376,33 | 127,17 | 284,33 | 324,33 | 310,33 |
| Cobre (mg.kg ⁻¹) | Sombra | 4,67 | 7,17 | 4,67 | 1,33 | 3,00 | 2,00 | 8,17 | 4,50 |
| | Sol | 13,50 | 14,67 | 9,00 | 0,00 | 0,83 | 1,83 | 4,50 | 2,83 |
| Manganeso (mg.kg ⁻¹) | Sombra | 29,00 | 93,83 | 87,33 | 21,50 | 24,83 | 46,67 | 51,83 | 31,83 |
| | Sol | 11,17 | 208,67 | 74,83 | 9,17 | 18,83 | 26,50 | 18,17 | 37,83 |
| Zinc (mg.kg ⁻¹) | Sombra | 9,00 | 4,00 | 9,83 | 3,00 | 3,67 | 2,33 | 6,33 | 3,17 |
| | Sol | 1,67 | 5,50 | 8,17 | 1,17 | 1,50 | 1,17 | 4,33 | 7,17 |
| Boro (mg.kg ⁻¹) | Sombra | 0,65 | 0,22 | 1,22 | 0,17 | 0,65 | 1,13 | 0,27 | 0,15 |
| | Sol | 0,62 | 1,38 | 1,27 | 0,28 | 0,77 | 0,82 | 0,33 | 0,15 |

La diferencia entre los dos agroecosistemas en términos de porosidad, se observó en la sumatoria de las tres fracciones que la componen (porosidad total), y no en cada una de ellas por separado (micro, meso o macroporos).

La distribución del tamaño de partículas (arenas, limos y arcillas), mostró una tendencia

semejante en los dos sistemas de cultivo de café.

Desde el punto de vista estructural todos los suelos de cafetales con guamo se clasificaron como estables, con excepción de la Unidad San Simón, en la cual ambos agroecosistemas fueron moderadamente estables; igual clasificación se utilizó para

los cafetales a plena exposición solar en las Unidades 200, Guadalupe y Suroeste.

En los suelos con cafetales con guamo se encontró un mayor porcentaje de humedad. No obstante, no hubo un patrón definido del movimiento del agua a través del perfil, de acuerdo con los resultados de conductividad hidráulica.

Las propiedades químicas registraron un menor grado de diferencia entre agroecosistemas y sus tendencias fueron menos definidas. A escala general, se encontraron suelos moderadamente ácidos, con pH dentro del rango recomendado para café (18). La CIC mostró valores con tendencia superior en la mayor parte de las plantaciones con guamo, lo cual ha sido registrado por otros investigadores en diferentes sistemas agroforestales (4, 12), y que ha sido atribuido al porcentaje superior de materia orgánica.

El alto coeficiente de correlación (0,96¹) entre nitrógeno total y materia orgánica, corroboró que esta última es un buen indicador de la disponibilidad de nitrógeno en el suelo, cuyos valores tendieron a ser superiores en cafetales bajo sombra. Igualmente, las formas iónicas, nitrato y amonio, mostraron promedios con tendencia superior en lotes donde había establecido guamo. Los contenidos de nitrógeno total y nitratos disminuyeron conforme aumentó la profundidad, como en el caso de la materia orgánica.

A pesar que los valores de fósforo en cafetales al sol fueron mayores en cuatro localidades, posiblemente por efecto de la fertilización, no se encontró diferencia entre agroecosistemas. Tal resultado es producto de la alta variación encontrada para este elemento, con coeficientes de variación de

100 y 219%, para cafetales a la sombra y a libre exposición solar, respectivamente. Sadeghian *et al.* (11) tampoco encontraron diferencias para este nutrimento al comparar los mismos tipos de cafetal.

La prueba de comparación indicó niveles de azufre más altos en los cultivos a libre exposición; probablemente como consecuencia de una mayor mineralización propiciada por las temperaturas más elevadas en estos suelos.

Los contenidos de calcio y magnesio en la mayoría de los suelos fueron adecuados para el café; los mayores valores se observaron en las Unidades Fondesa y San Simón, debido a la alta proporción de estos elementos en su material parental. El contenido de potasio fue mayor en los cultivos a plena exposición solar; en cuyo caso tres de las siete Unidades (200, Fondesa y Montenegro), presentaron contenidos superiores al nivel crítico establecido para este elemento bajo condiciones de Colombia (1).

Los niveles de sodio fueron mayores en suelos bajo sombra; no obstante, a pesar de mostrar diferencia, se registraron valores muy bajos, como es de esperar en la zona cafetera. El aluminio tuvo promedios un tanto superiores al valor máximo recomendable (1cmol_c.kg⁻¹) en lotes de las Unidades 200, Montenegro y Timbío. En el caso del café a plena exposición solar en la Unidad Guadalupe y en los cafetales en los dos sistemas de manejo en la Unidad Suroeste, se observaron contenidos muy altos de sodio; lo que podría afectar el crecimiento de las plantas, especialmente en la primera Unidad de suelos donde el contenido de materia orgánica fue relativamente bajo.

¹Altamente significativo, según la prueba de diferencia mínima significativa (D.M.S.) al 5%

No se encontraron diferencias entre promedios generales para los elementos menores. El hierro fue alto ($>100\text{mg.kg}^{-1}$) en todas las localidades y los contenidos de cobre fueron bajos ($<5\text{mg.kg}^{-1}$) en las Unidades Guadalupe, Montenegro y San Simón. El Manganeseo mostró niveles adecuados en la mayor parte de los sitios estudiados en los cafetales al sol en las Unidades Chinchiná y Guadalupe. El zinc mostró los menores contenidos en las Unidades Guadalupe, Montenegro y San Simón. El tenor de boro no fue contrastante entre agroecosistemas y fue bajo ($<0,5\text{mg.kg}^{-1}$) en las Unidades Suroeste, Guadalupe y Timbío.

Tendencias a través de la profundidad.

Las Figuras 3, 4, 5, 6, 7 y 8 muestran la tendencia de algunas propiedades en las diferentes profundidades.

Se observó un patrón de disminución de la materia orgánica a medida que aumentó la profundidad. En las Unidades Chinchiná, 200, Guadalupe, Montenegro y Suroeste, los suelos de cafetales con sombrero tuvieron un mayor contenido de materia orgánica en todos los estratos. En Timbío por el contrario, los valores fueron superiores en cafetales a plena exposición, debido a la razón antes expuesta; sin embargo, en los primeros 15cm se aprecian promedios similares, que confirman el incremento de la materia orgánica como consecuencia del sistema de siembra con guamo. Los suelos de San Simón, con alta proporción de arenas, además de tener un bajo contenido de material orgánico, presentaron un comportamiento similar en los dos sistemas de producción de café.

La materia orgánica influye de manera determinante sobre otras propiedades de tipo físico, químico y biológico (4, 16), lo que fue notorio especialmente en las

características volumétricas. De esta forma la porosidad total también mostró valores superiores en los primeros 10cm del suelo en cafetales bajo sombra en siete localidades y tendió a disminuir con la profundidad. Por el contrario, la densidad aparente fue menor en los cafetales con guamo y aumentó a medida que la materia orgánica disminuyó, razón por la cual los menores valores de ésta se encontraron en las primeras capas de suelo. Las Unidades Fondesa y Timbío exhibieron las menores variaciones y la Unidad Guadalupe fue la más contrastante.

Puede verse entonces cómo el incremento en el contenido de materia orgánica, producto de los mayores ingresos provenientes del guamo, se vio reflejado fundamentalmente en los primeros 10cm de suelo. La materia orgánica también fue determinante de algunas propiedades químicas como el contenido de nitrógeno y la CIC.

La humedad volumétrica fue similar a través de la profundidad en los dos agroecosistemas evaluados en cinco localidades; no obstante, en las Unidades Chinchiná, Guadalupe y Montenegro, los suelos con sombrero de guamo tuvieron mayor contenido de agua en todos los estratos. Al analizar la humedad gravimétrica en cafetales con guamo, ésta fue superior en las mismas localidades que la humedad volumétrica, pero adicionalmente fue mayor en los primeros 10cm de suelos con sombra en las Unidades 200, San Simón y Suroeste.

La tendencia más definida a través de la profundidad correspondió a la resistencia a la penetración, propiedad que fue mayor en todos los suelos de cafetales a libre exposición solar y se incrementó a través del perfil conforme se profundizó en éste. El contenido de arcilla y materia orgánica en el suelo influyen sobre esta característica, que alcanzó sus máximos valores en las

Figura 3.
Tendencia de la materia orgánica a través de la profundidad, en ocho unidades de suelos

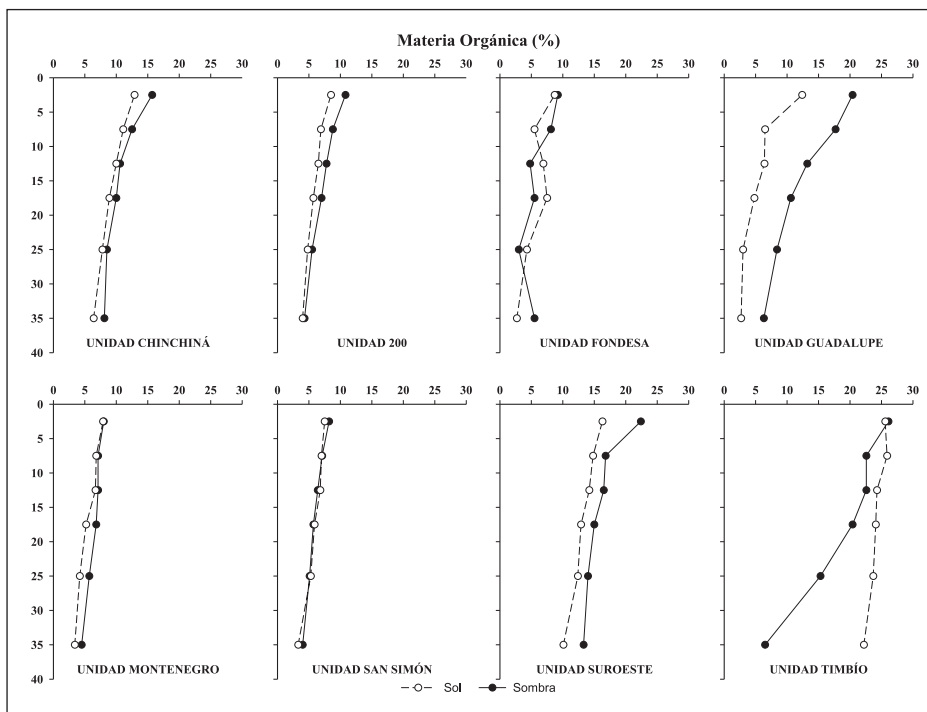
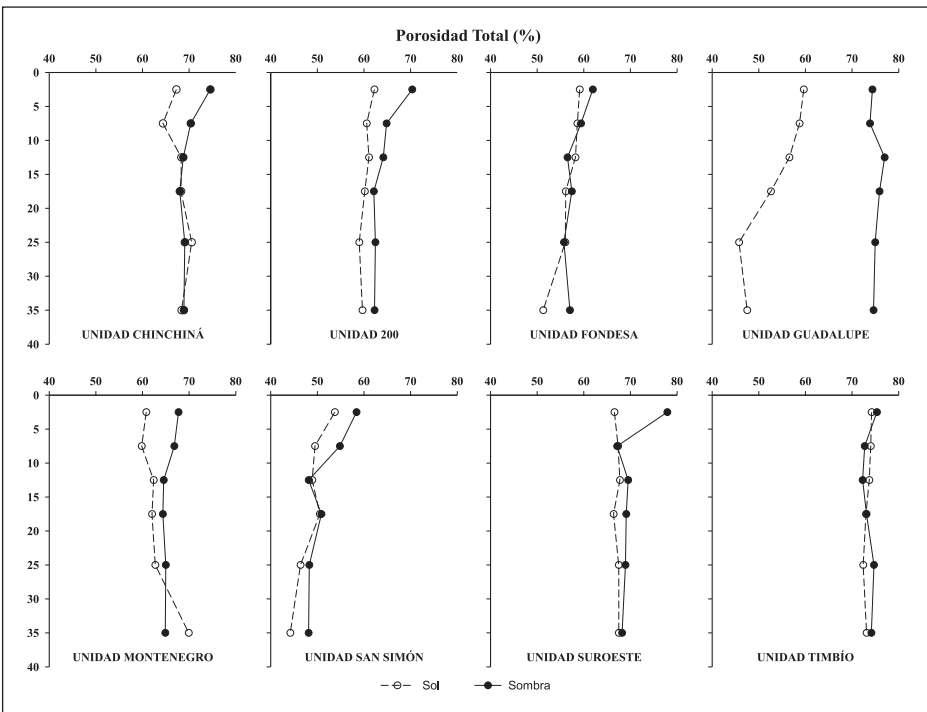


Figura 4.
Tendencia de la porosidad total a través de la profundidad.



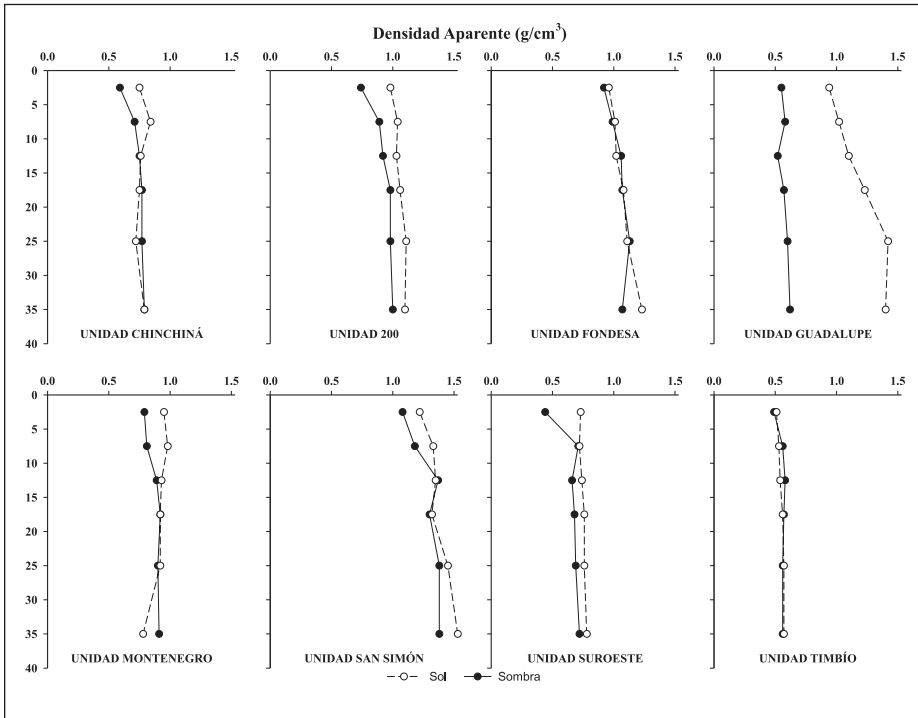


Figura 5. Tendencia de la densidad aparente a través de la profundidad.

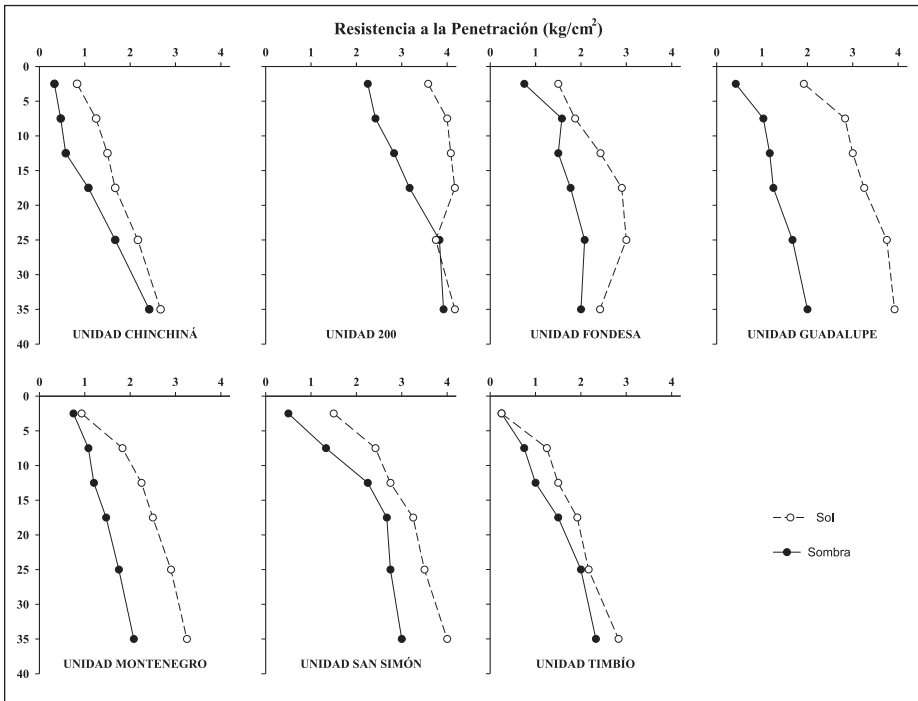


Figura 6. Tendencia de la resistencia a la penetración a través de la profundidad.

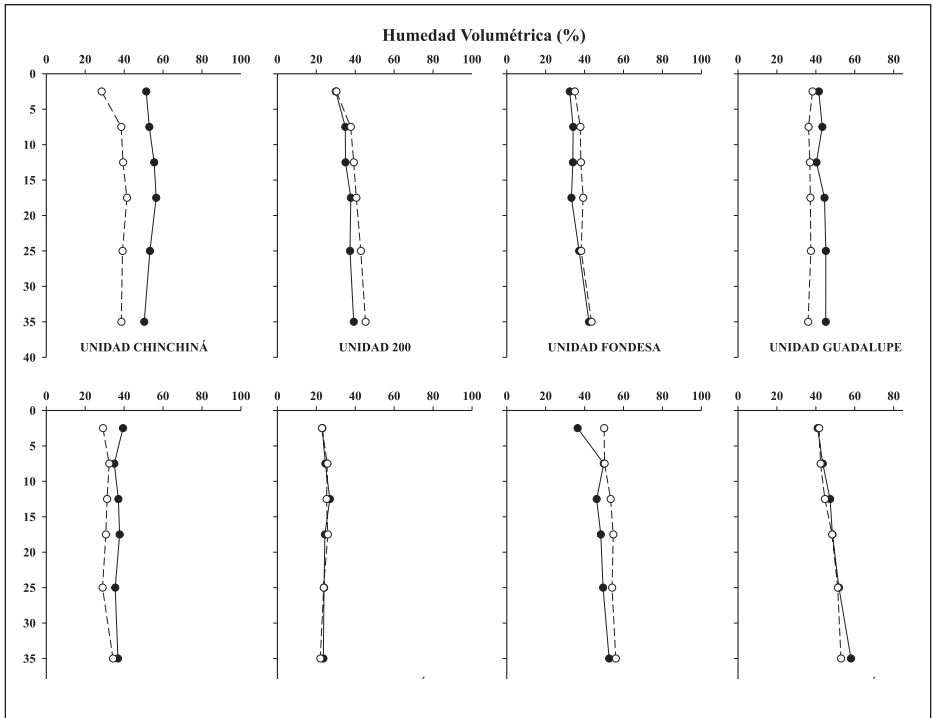


Figura 7.
Tendencia de la humedad volumétrica a través de la profundidad.

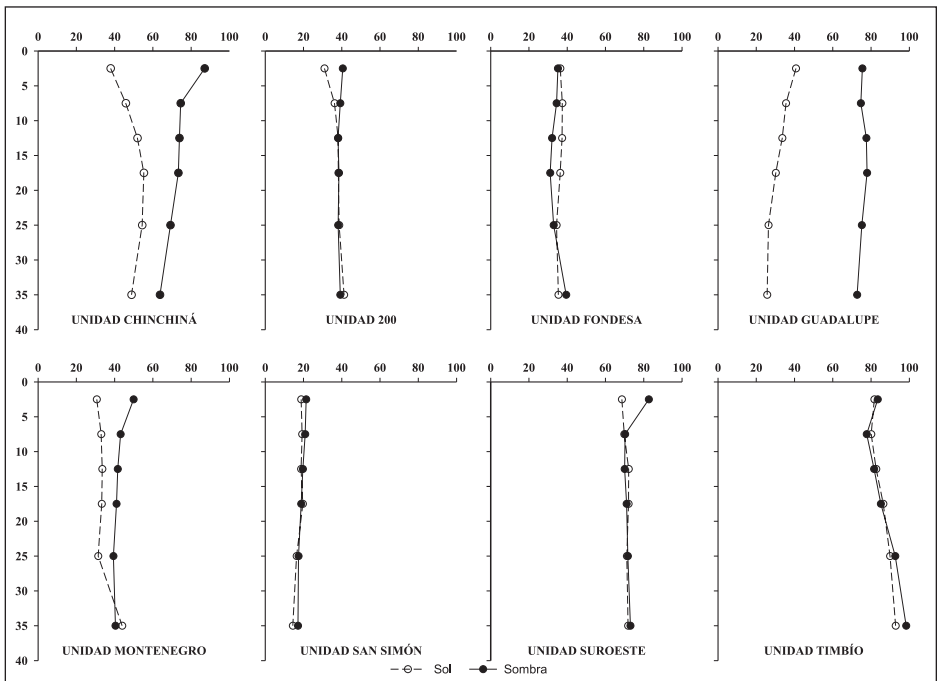


Figura 8.
Tendencia de la humedad gravimétrica a través de la profundidad.

Unidades 200, correspondiente a los suelos más arcillosos, y San Simón que tuvo el menor porcentaje de materia orgánica.

En los resultados expuestos se observa cómo el establecimiento de sombrero con guamo puede conservar o mejorar algunas propiedades del suelo.

Análisis de componentes principales. Las características de mayor peso en la variación total, de acuerdo a sus coeficientes de correlación superiores a 75% fueron: nitrógeno total, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, nitratos, densidad real, humedad y densidad aparente; estas propiedades formaron parte del primer componente, el cual explicó un 29% de la variación total.

El segundo componente principal explicó un 18% de la variación, y estuvo comprendido por las variables: magnesio, calcio y limo que mostraron los coeficientes de correlación más elevados. El tercer componente fue responsable del 14% de la variación y dentro de las variables que lo integran se encuentran: el manganeso y el azufre, como las de mayor peso.

En el análisis no se incluyó la porosidad total por tratarse de una propiedad derivada.

Entre las variables del primer componente se encuentra el nitrógeno, cuya estrecha relación con la materia orgánica del suelo permite calcular su contenido a partir del porcentaje de ésta (17, 10); de lo cual puede deducirse igualmente la relación con el ión nitrato. La CIC está dada, además del tipo y la cantidad de arcillas, por la materia orgánica, la cual cuenta con una alta capacidad de intercambio.

La densidad, tanto real como aparente, dependen entre otras variables del material parental y el contenido de materia orgánica,

de forma tal que cuando este último es alto los suelos pueden presentar densidades cercanas a $1,4\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (8). Del mismo modo, la disminución del contenido de material orgánico provoca alteraciones en la densidad (19). Por último, la retención de agua del suelo depende además de la textura y de la estructura, del contenido de materia orgánica, aspecto importante dado que ésta puede retener cerca de 20 veces su peso en agua (14). Es notorio entonces el papel que la materia orgánica está desempeñando en la fertilidad del suelo de los agroecosistemas evaluados y determina gran parte de las diferencias encontradas.

Cardona y Sadeghian (2), evaluaron el ingreso y la descomposición de la materia orgánica durante un año en dos de las localidades involucradas, Chinchiná y El Cairo; y encontraron un ingreso superior de residuos en cafetales bajo sombrero de guamo de $10,5$ y $11,2\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivamente, mientras que en cafetales al sol estos se cuantificaron en $4,2\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para Chinchiná y $4,6\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para El Cairo. Las tasas de descomposición del guamo ($k=0,58$ y $0,85$) fueron menores que las de café ($k=1,39$ y $1,70$) para El Cairo y Chinchiná, respectivamente, lo que significa que el material proveniente de guamo está pasando a constituir parte de la materia orgánica estable del suelo.

Análisis de agrupación (Cluster). El análisis de agrupación al nivel de agroecosistema y de unidad, se realizó con las variables de mayor representación dentro del primer componente (nitrógeno, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, nitratos, humedad, densidades real y aparente).

Se formaron dos grandes grupos. El primero o A, estuvo constituido por los dos agroecosistemas de la Unidad Timbío y el cafetal bajo sombra de la Unidad Chinchiná

(subgrupo 1). En el segundo gran grupo o B, se ubicaron los demás agroecosistemas, y éste a su vez se subdividió en dos subgrupos (2 y 3). En el subgrupo 2 se incluyeron los agroecosistemas de las Unidades 200, Guadalupe, San Simón, Suroeste y el cafetal a libre exposición solar de la Unidad Chinchiná. Finalmente, en el subgrupo 3 se ubicaron los dos agroecosistemas de las Unidades Fondesa y Montenegro.

Puede notarse que, antes del efecto de los agroecosistemas, existió una influencia notoria de las unidades de suelo en la conformación de los grupos.

En la Tabla 5 se muestra la comparación de los subgrupos resultantes para las variables que conforman el primer componente principal.

Los agroecosistemas del primer subgrupo se caracterizan por poseer altos contenidos de materia orgánica, especialmente en la Unidad Timbío; así como altos valores de humedad, nitrógeno y nitratos; la densidad real fue la menor de todas las evaluadas y la CIC fue mayor que en el tercer grupo. Los suelos reunidos en este conglomerado se caracterizaron a escala general por tener buenas propiedades físicas.

En el segundo subgrupo se reunieron suelos con niveles medios de materia orgánica, densidades que a pesar de ser superiores a las del grupo anterior son adecuadas para el cultivo de café, contenido de nitratos que todavía puede considerarse alto y con un contenido de humedad menor con respecto al primer subgrupo.

En el tercer subgrupo se identificaron suelos de bajos contenidos de materia orgánica, humedad y nitratos; con valores medios de densidad y CIC pero adecuados para el cultivo de café.

La respuesta del suelo al tipo de sistema de uso se vio reflejada fundamentalmente en una mayor retención de humedad y CIC en los agroecosistemas con guamo, así como un alto contenido de materia orgánica y menor densidad aparente.

La Unidad Guadalupe tuvo las diferencias más amplias entre agroecosistemas, y al parecer fue allí donde el contenido superior de materia orgánica en suelos con sombrío afectó de manera más notoria otras propiedades.

En la Unidad Suroeste, donde también se observaron diferencias entre agroecosistemas, las modificaciones fueron claras en términos de densidades real y aparente.

Aunque en principio podría pensarse que Unidades como Chinchiná no presentarían respuesta debido a poseen un conjunto de características físicas adecuadas para el cultivo del café, el resultado final fue contrario, puesto que se observó un contenido de humedad inferior en el suelo de los cafetales a libre exposición solar. Este aspecto puede ser de importancia en períodos de gran deficiencia de lluvia (Evento Cálido del Pacífico – El Niño), durante el cual Farrell y Altieri (5) registraron deficiencias severas de humedad, inferiores al 25% en cafetales al sol, mientras que los cafetales con sombra de guamo mostraron economía del agua en el suelo, por encima del valor crítico.

Los agroecosistemas de la Unidad Timbío se agruparon dentro de un mismo conjunto y mostraron similitud para las propiedades del componente. Sin embargo, debe recalcar el hecho que los suelos con guamo no reunían condiciones adecuadas para el cultivo del café, razón por la cual se estableció el sombrío, con el cual se produjo un mejoramiento de los mismos hasta obtener valores similares a los normales en la zona.

Las Unidades San Simón y 200 en el segundo grupo y Montenegro en el tercero, se agruparon en los niveles más bajos indicando semejanza en las propiedades involucradas en el análisis; en los tres casos se observó poca diferencia en el contenido de materia orgánica, lo que se reflejó en los resultados.

En la localidad donde fue estudiada la Unidad Fondesa, los beneficios del sombrero no se observaron en las propiedades del suelo; sin embargo, debe hacerse mención que en este sitio el uso del sombrero está asociado con la protección del cultivo ante condiciones climáticas desfavorables, razón por la cual se hace necesario el uso de un dosel superior.

De esta forma y en concordancia con los resultados observados, puede considerarse que el efecto del sombrero sobre las propiedades que confieren la fertilidad varió con la unidad de suelo, pero no fue manifiesto en todas ellas.

La respuesta al uso del sombrero en términos edáficos se observó en las Unidades Guadalupe, Suroeste y Chinchiná.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a las siguientes personas y entidades, que brindaron su apoyo y colaboración en las diferentes etapas del estudio:

A los caficultores, en cuyas fincas se tomaron las muestras de suelos.

A los jefes de las Estaciones Experimentales de Cenicafé: El Rosario, Ing. John Wilson Mejía; Paraguaicito, Ing. Juan Carlos García; El Tambo, Ing. Carlos Rodrigo Solarte y Naranjal,

Ing. Celso Arboleda; así como al personal que labora en las Estaciones. Igualmente, al técnico Diego Castaño, funcionario de la granja Albán en El Cairo Valle

A los Comités Municipales de Cafeteros de Cartago, Pitalito, Ibagué y Dagua; especialmente a los funcionarios Héctor Fabio Quesada, Ricardo Calderón, Luis Ever Rodríguez y Jairo Ramírez.

A los Ingenieros Juan Carlos Vélez, Edgar Hincapié, María Alejandra Patiño y Alveiro Salamanca.

Al personal de la Disciplina de Suelos de Cenicafé y de Multilab Agroanalítica.

LITERATURA CITADA

1. BRAVO G., E. Fertilidad de los suelos cafeteros y fertilización del cafeto en Colombia. Suelos Ecuatoriales 14(1):362-377. 1984.
2. CARDONA C., D.A.; SADEGHIAN KH., S. Ciclo de nutrientes y actividad microbiana en cafetales a libre exposición solar y bajo sombrero de guamo (*Inga spp*). Cenicafé 56 (2):127 – 141. 2005.
3. DORRONSORO, C. Introducción a la edafología. Granada, (España). Departamento de Edafología y Química Agrícola Universidad de Granada. Online Internet. Disponible en: <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema04/otraspp2.htm> (Consultado en marzo 2004).
4. FARRELL, J.G.; ALTIERÍ, M.A. Centro de Investigación, Educación y Desarrollo, CIED. Sistemas Agroforestales. Boletín Agroecológico # 57. Lima, Perú: CIED, 1998. Online Internet. Disponible en: <http://www.ciedperu.org/bae/b57ed.htm>. (Consultado en Marzo 2002).
5. JARAMILLO R., A. Distribución de la lluvia dentro de los cafetales. Avances Técnicos Cenicafé No. 262:1-4. 1999.
6. JARAMILLO R., A.; CHAVES C., B. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*Coffea arabica L.*) al sol y bajo sombra. Cenicafé 50(2):97-105. 1999.

7. MOGOLLÓN, J.; GARCÍA M., P.; SÁNCHEZ, L.; CHACÓN, N.; ARAUJO, J. Nitrógeno potencialmente disponible en suelos de cafetales bajo diferentes árboles de sombra. *Agronomía Tropical* 47(1):87-102. 1997.
8. MONTENEGRO G., H.; MALAGÓN C., D. Propiedades físicas de los suelos. Bogotá, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1990. 813 p.
9. PAYNE, D. Estructura del suelo, laboreo y comportamiento mecánico. In: WILD, A. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Madrid,, Ediciones Mundi-Prensa, 1992. 1045 p.
10. SADEGHIAN K., S. Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados en café. *Cenicafé* 54(3):242-257. 2003.
11. SADEGHIAN K., S.; MURGUEITIO R., E.; MEJÍA, C.; RIVERA, M. Ordenamiento ambiental y reglamentación del uso y manejo del suelo en la zona cafetera. In: SUELOS del eje cafetero. Pereira, Proyecto UTP-GTZ, 2001. p. 96-108.
12. SADEGHIAN K., S.; MURGUEITIO R., E.; MEJÍA, C.; CALLE, Z. Evaluación de los efectos socioambientales de la transformación de los agroecosistemas cafeteros en el departamento del Quindío. Cali, CIPAV, 1998. 89 p.
13. SCHROTH, G.; LEHMANN, J.; RODRIGUES, M.R.L.; BARROS, E.; MACEDO, J.L.V. Plant - soil interactions in multistrata agroforestry in the humid tropics. *Agroforestry Systems* 53: 85 - 102. 2001.
14. SHAXSON, F.; BARBER, R. Optimizing soil moisture for plant production, the significance of soil porosity. Roma, FAO, 2003. 125 p. (FAO Soils Bulletin No. 79). Online Internet. Disponible en: http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/DOCREP/006/Y4690E/y4690e00.htm (Consultado en enero 2005).
15. SUÁREZ V., S. La atmósfera del suelo y la productividad del café. *Avances Técnicos Cenicafé* No. 293:1-4. 2001.
16. SUÁREZ V., S. La materia orgánica en la nutrición del café y el mejoramiento de los suelos de la zona cafetera. *Avances Técnicos Cenicafé* No. 283:1-8. 2001.
17. VALENCIA A., G. Fisiología, nutrición y fertilización del cafeto. Chinchiná, Cenicafé - Agroinsumos del Café, 1999. 94 p.
18. VALENCIA A., G. Manual de nutrición y fertilización del café. Quito, INPOFOS, 1998. 61 p.
19. WILDNER, L. DO P.; VEIGA, M. DA DO PRADO WILDNER., L.; DA VEIGA., M. Erosión y pérdida de fertilidad del suelo. In: Erosión de suelos en América Latina. Roma, FAO, 1994. Online Internet. Disponible en: http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/T2351S/T2351S00.htm (Consultado en enero 2005).