

**Fertilidad del suelo con prácticas agroecológicas
y manejo convencional en el cultivo de café**

**Soil fertility with agroecological practices and
conventional cultivation management in coffee crop**

Roberto C. Larios-González¹, Francisco Salmerón-Miranda², Leonardo García-Centeno²

¹ Dirección de Investigación, Extensión y Posgrado, ² Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía
Universidad Nacional Agraria, (Para correspondencia: roberto.larios@ci.una.edu.ni)



RESUMEN

Las prácticas agroecológicas en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.), son necesarias para el mantenimiento y aumento de la fertilidad de los suelos y el manejo sostenible de las plantaciones. Este estudio se realizó de junio de 2009 a enero de 2010 en el Jardín Botánico y en el Centro Experimental Campos Azules, en Masatepe, Nicaragua. El propósito fue evaluar dos prácticas agroecológicas y un manejo convencional en el cultivo de café y su influencia en la fertilidad física, química y biológica del suelo. Se utilizó un arreglo unifactorial en diseño bloques completo al azar (BCA) con tres repeticiones. Las variables fueron densidad aparente, porosidad, retención de agua, materia orgánica, nitrógeno total, carbono orgánico, pH, capacidad de intercambio catiónico y cuantificación de bacterias y hongos. No existen diferencias entre los componentes de la fertilidad física y química del suelo, sin embargo, los sistemas con prácticas agroecológicas registran mayor porosidad y retención de humedad, y menor densidad aparente; así como valores más altos de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, carbono orgánico, nitrógeno total y pH. No se registra diferencia en las poblaciones de bacterias, pero sí de hongos en el período lluvioso. El rendimiento acumulado de café no difiere pero existe una tendencia en los sistemas agroecológicos al aumento. Los resultados sugieren que la implementación de prácticas agroecológicas contribuye de manera sustancial con la fertilidad global del suelo.

Palabras clave: agroecología, sostenibilidad, fertilidad del suelo, biodiversidad.

ABSTRACT

The implementation of agroecological practices in coffee plantations (*Coffea arabica* L.), is critical for the maintenance and enhancement of soil fertility and the sustainable management of the system. The study was conducted from June 2009 to January 2010 at two sites, the Jardín Botánico and the Campos Azules Experimental Centre, in Masatepe, Nicaragua. Both places are located between the coordinates 11°54' north latitude and 86°09' west longitude. The purpose was to evaluate the effect of two agroecological practices and a conventional cultivation management practice on the physical, chemical and biological fertility of the soil in coffee plantations. A univariate arrangement was used in a Randomized Complete Blocks (RCB) design with three replicates. The variables were bulk density, porosity, water retention, organic matter, total nitrogen, organic carbon, pH, cation exchange capacity, soil's macrofauna diversity, quantification of bacteria and fungi. There are no differences between the components of physical and chemical soil fertility; however, systems with agroecological practices showed higher porosity and moisture retention, and lower bulk density; and higher values of organic matter, cation exchange capacity, organic carbon, total nitrogen and pH. No difference was recorded in bacteria populations, but higher populations of fungi in the conventional management in the rainy season. The cumulative yield of coffee did not differ between the systems evaluated, but there is a trend of increasing in agroecological systems and even outperform the conventional management. The results suggest that the implementation of agroecological practices substantially contributes to the overall soil fertility.

Keywords: Agroecology, sustainability, soil fertility, biodiversity.

PRODUCCIÓN DE PLANTAS

El café (*Coffea arabica* L.), es uno de los principales rubros de exportación en Nicaragua y generador de empleo rural. Se cultiva con diversos sistemas de manejo difiriendo en la intensidad de aplicaciones de insumos agrícolas y tecnologías.

Los sistemas convencionales han ocasionado impactos negativos sobre el ambiente Altieri (1999), mientras que los sistemas con enfoque agroecológico lo preservan o mejoran, permitiendo su perdurabilidad.

En este estudio se clasifica al manejo convencional cuando se aplican fertilizantes sintéticos y se cultiva a plena exposición solar, y consideramos a las prácticas agroecológicas, cuando utilizamos las especies de árboles de sombra [*Inga laurina* (Sw.) Willd] y [*Samanea saman* (Jacq) Merr., J. Wash] más aplicaciones de abonos orgánicos.

Este experimento representa una evaluación de medio término de una investigación proyectada a 20 años; concebido inicialmente para contribuir al debate de las desventajas de la caficultura convencional versus los beneficios de la caficultura amigable con el ambiente (enfoque agroecológico), utilizando los criterios de sostenibilidad, calidad y rentabilidad, para evaluar interacciones entre especies y enmiendas para el manejo de plagas y la nutrición (Hagggar y Staver, 2001); comprende doce sistemas con prácticas agroecológicas y dos manejados de forma convencional.

De los 14 sistemas se seleccionaron tres: el sistema orgánico intensivo considerado como práctica agroecológica uno, el sistema orgánico extensivo como práctica agroecológica dos y el manejo convencional extensivo clasificado como convencional. El objetivo fue evaluar la influencia de estos tres sistemas en el rendimiento acumulado de café oro y algunos componentes de la fertilidad del suelo, considerando que en estas condiciones de suelo y clima, las prácticas agroecológicas conservan o mejoran la fertilidad del suelo, y el rendimiento del cultivo se manifiesta de forma sostenible.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Jardín Botánico y en el Centro Experimental Campos Azules, en el municipio de Masatepe, Masaya, Nicaragua entre las coordenadas 11°54' de latitud norte y 86°09' de longitud oeste. El período evaluado fue de julio del 2009 a enero del 2010. La zona está clasificada como baja y seca con un período lluvioso de seis meses, siendo las precipitación promedio de 1 500 mm, temperatura media anual de 24°C y humedad relativa entre 70 y 80% (INETER, 2010). Climáticamente Koppen clasifica la zona como tropical de sabana. El suelo se clasifica taxonómicamente como Andisol, sub grupo Typic Durandepsts.

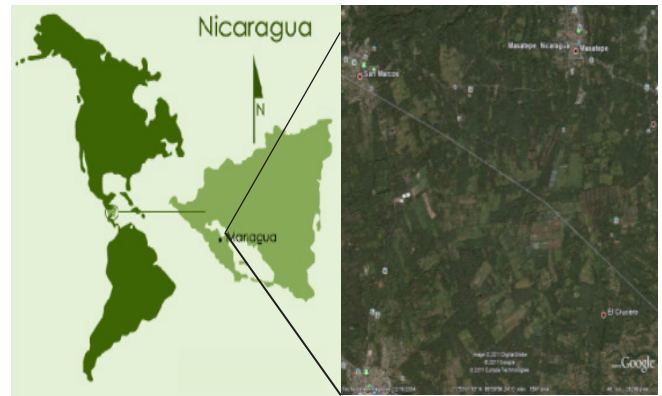


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio, Fuente: Google Earth, 2011; Google imágenes, 2011.

La variedad de café fue Pacas, caracterizada por presentar fructificación precoz, porte bajo, aspecto compacto y cerrado, follaje abundante, sistema radicular bien desarrollado y frutos de color rojo y se adapta a zonas bajas. La distancia de siembra fue de dos metros entre surco y 1.25 metros entre planta (4 000 plantas por hectárea).

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos

Descripción	Tratamientos	Clasificación
<i>Inga laurina</i> + <i>Samanea saman</i> + 9 080 kg ha ⁻¹ PC + 7 280 kg ha ⁻¹ G + biofermentado 10 l ha ⁻¹	Práctica agroecológica 1	Orgánico intensivo
<i>Inga laurina</i> + <i>Samanea saman</i> + 9 080 kg ha ⁻¹ PC	Práctica agroecológica 2	Orgánico extensivo
78 kg ha ⁻¹ 27-9-18 + 140 kg ha ⁻¹ + 12-30-10 + 80 kg ha ⁻¹ urea + 20 + kg ha ⁻¹ KCl + 25 g de Zn + 30 g B	Convencional	Pleno sol

PC: pulpa de café, G: gallinaza, urea: (46 % N), KCl: cloruro de potasio (60% de K₂O), Zn: zinc, B: boro.

La especie *Inga laurina*, es un árbol fijador de nitrógeno, de rápido crecimiento y usado en sistemas agroforestales con café por su adaptabilidad a una amplia variedad de condiciones ecológicas (OFI y CATIE, 2003). *Samanea saman*, es excelente para sombra en cafetales, además es considerado como una madera comercial y de uso preferencial en artesanías (OFI y CATIE, 2003). Ambas especies fueron establecidas de manera intercalada en cada hilera con distancia de cuatro metros entre surco y 3.75 metros entre árbol, para una densidad poblacional inicial de 666 plantas por hectáreas. Luego como parte del manejo se realizó un raleo del 50 por ciento definiendo una población de 333 árboles por hectárea.

Se utilizó un arreglo unifactorial con tres réplicas en diseño de Bloques Completos al Azar (BCA). El área de las parcelas varió en función de la disponibilidad de área en cada sitio (réplica) y osciló entre los 500 y los 840 m².

PRODUCCIÓN DE PLANTAS

Variables evaluadas. Como componentes de la fertilidad física del suelo se evaluó la porosidad, densidad aparente y retención de humedad a capacidad de campo (CC). En la fertilidad química se evaluó materia orgánica, carbono orgánico, nitrógeno total, pH y capacidad de intercambio catiónico. La cuantificación de las poblaciones de bacterias y hongos fue evaluada como componentes de la fertilidad biológica del suelo. También se evaluó el rendimiento acumulado de café oro, expresado en kg ha⁻¹ correspondiente a la sumatoria de los rendimientos obtenidos desde la primera cosecha (2002-2003) hasta la cosecha del ciclo agrícola 2009-2010.

Muestreo de suelo. En julio del 2009 (época lluviosa) y enero 2010 (época seca) se colectaron las muestras usando un barreno helicoidal. Cada muestra (1.5 kg) estuvo compuesta por la mezcla de ocho sub muestras, cuatro colectadas bajo el área de goteo de las plantas de café y cuatro en el centro de la calle a una profundidad entre 0 y 0.30 m. El análisis físico, químico y microbiológico se determinó en el laboratorio de suelos y agua y en el de microbiología de la Universidad Nacional Agraria en Managua, Nicaragua.

Para la determinación de la densidad aparente las muestras se colectaron en el mismo período a profundidades de 0 a 0.10 m y 0.10 a 0.20 m, mediante el método del cilindro (LBSA-UNA, 2011), usando la columna de suelo como indicador de volumen (100 cm³) y el peso del suelo contenido en ese volumen. Este muestreo fue repetido dos veces en cada parcela, realizando dos calicatas bajo el área de goteo de las plantas de café y dos en el centro de las calles. La determinación de la densidad aparente se realizó considerando la relación entre el peso del suelo seco por el volumen de ese suelo y permitió obtener la porosidad total del suelo (η) según la siguiente fórmula.

$$\eta = -1 \frac{Da}{Dr} \times 100$$

Donde: η = porosidad, Da = densidad aparente y Dr = densidad real. Esta última determinada a través del método del picnómetro.

En el caso de la materia orgánica (MO) y el carbono orgánico se determinaron por el método de Walkley-Black. El nitrógeno total (Nt) por el método de Kjeldhal modificado y el pH (H₂O) por el método potenciométrico. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) según la técnica de solución extractora de acetato de amonio y, a través del método de la

olla de presión, se calculó la retención de humedad a capacidad de campo.

Las poblaciones de microorganismos (expresadas en notación científica), se cuantificaron por el método de dilución seriada de suelo e inoculación profunda en placas de petri. Para esto se usaron medios de cultivo AN (Agar nutritivo), medio general para bacterias y PDA (Papa Dextrosa Agar), medio general para hongos.

Análisis estadístico. Los datos se analizaron de forma univariada mediante una prueba de comparación por diferencias mínimas significativas ($\alpha=0.05$), así como de manera multivariada a través de un análisis de componentes principales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Densidad aparente del suelo (g cm³). No se registran diferencias significativas sin embargo, en ambos momentos de muestreo se obtienen los valores más bajos de densidad aparente en los sistemas con prácticas agroecológicas (cuadro 2).

Paz y Sánchez (2007) reportan que valores bajos de densidad aparente son normales en suelos con altos contenidos de materia orgánica. El rango encontrado de densidad aparente (0.62 y 0.71 g cm³) concuerdan con lo reportado por estos autores, quienes indican que valores por debajo de

Cuadro 2. Componentes de la fertilidad física del suelo de 0 a 0.3 metros de profundidad según tratamiento y época de muestreo

Componente / tratamiento	Julio 2009				Enero 2010			
	PAE1	PAE2	C	DMS	PAE1	PAE2	C	DMS
Da (g cm ³)	0.64	0.66	0.71	0.20	0.62	0.62	0.67	0.11
η (%)	72.00	70.00	68.00	9.81	73.00	73.00	72.00	4.32
CC (%)	42.00	43.00	40.0	9.25	45.00	47.00	39.00	12.71

PAE1: Práctica agroecológica uno, PAE2: Práctica agroecológica dos, C: Convencional, DMS: Diferencia mínima significativa, Da: Densidad aparente, η : Porosidad, CC: Retención de humedad.

0.9 g cm³ en suelos Andisoles son normales, y presentan alta fertilidad física por la presencia de alófana, por ser suelos profundos y de baja densidad aparente.

De esta manera se evidencian los beneficios que las prácticas agroecológicas aportan a la fertilidad física del suelo y su contribución con la mejora en la relación suelo-planta-atmósfera.

PRODUCCIÓN DE PLANTAS

Porosidad del suelo (%). De la Rosa (2008), establece que la porosidad del suelo se mide por la relación entre el volumen que ocupan los poros y el volumen total, y que la densidad aparente relaciona el espacio poroso con el peso, de forma que cuando la densidad aparente aumenta, el volumen de poros disminuye y viceversa.

No se presentan diferencias estadísticas por efecto de los tratamientos sobre la porosidad del suelo. Los valores oscilan entre 68 y 73% (cuadro 2) y son clasificados por Cairo (1995) como muy altos (> 65%), y se observa que la porosidad tiende a disminuir en el sistema convencional, comportamiento reportado por Labrador (2001), debido a que menores niveles de materia orgánica ocasionan menor actividad biológica y menor porosidad en el suelo. Cardona y Sadeghian (2005), encontraron valores de porosidad de 67% en suelos manejados orgánicamente (práctica agroecológica), declarando que a mayor nivel de materia orgánica se incrementa la porosidad.

Este componente de la fertilidad del suelo es fundamental para lograr una mejor expresión en las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo, favoreciendo el crecimiento y desarrollo de los cultivos, como lo expresan Pained y Wild (1992), al plantear que suelos con mayor porosidad favorecen el desarrollo de organismos edáficos, almacena mayor humedad por más tiempo, mejora la aireación, el intercambio entre el cultivo y el suelo, así como el aumento del volumen de exploración de las raíces.

Esto se traduce como un componente de la fertilidad física del suelo que permitiría contrarrestar los efectos negativos sobre las cosechas causadas por períodos de sequía, debido al aumento de la capacidad de retención de agua que brindan los sistemas con prácticas agroecológicas, así como el aumento en la capacidad de resiliencia ante eventos extremos de precipitación.

Retención de humedad del suelo (%). No se establecen diferencias estadísticas para este componente. Los mayores valores de retención de agua se observaron en los tratamientos con prácticas agroecológicas (cuadro 2). Según Cairo (1995), estos valores se clasifican como altos, mientras que el suelo del sistema convencional se considera de mediana capacidad de retención de humedad.

Esta tendencia podría ser explicada por el hecho que los sistemas con prácticas agroecológicas presentan mayor contenido de materia orgánica (cuadro 3) con respecto al sistema convencional. Hecho que respalda la magnitud de retención

de humedad al estar ésta asociada a los niveles de materia orgánica (Taboada y Álvarez, 2008), lo que influye en los aspectos del balance de agua (Labrador, 2001), clave para la sostenibilidad de los sistemas productivos al haber mayor disponibilidad de agua para las plantas, los macro y microorganismos del suelo, en un mayor lapso de tiempo (Gliessman, 2002).

Estos resultados evidencian que las prácticas agroecológicas son una estrategia que permite mantener y mejorar la fertilidad física del suelo, contribuyendo a contrarrestar los efectos del cambio climático, principalmente, porque mejora la captación y conservación de agua en el suelo, con la posibilidad de permitir que los sistemas agrícolas se adapten a los nuevos patrones de precipitación, temperatura y eventos climatológicos extremos, permitiendo mayor eficiencia en el uso y disponibilidad de agua para los cultivos.

Fertilidad química del suelo. No se registran diferencias significativas para los componentes de la fertilidad química del suelo, sin embargo, existe una tendencia ascendente de sus valores en las parcelas con prácticas agroecológicas (cuadro 3).

Cuadro 3. Componentes de la fertilidad química del suelo de 0 a 0.3 metros de profundidad según tratamiento y épocas de muestreo

Componente / tratamiento	Julio 2009				Enero 2010			
	PAE1	PAE2	C	DMS	PAE1	PAE2	C	DMS
pH	6.05	5.76	5.63	0.92	6.03	5.84	5.85	0.99
MO (%)	8.93	8.47	7.63	4.25	9.35	8.08	7.37	3.24
CO (%)	5.17	4.93	4.43	2.44	5.42	4.68	4.21	2.01
CIC (cmol kg ⁻¹)	43.15	37.00	37.44	7.12	40.32	34.79	36.11	8.43
Nt (%)	0.53	0.47	0.41	0.18	0.46	0.40	0.36	0.16

PAE1: Práctica agroecológica uno, PAE2: Práctica agroecológica dos, C: Convencional, DMS: Diferencia mínima significativa, MO: Materia orgánica, CO: Carbono orgánico, CIC: Capacidad de intercambio catiónico, Nt: Nitrógeno total.

pH del suelo. En el sistema agroecológico uno se registran los mayores valores de pH (6.05 y 6.03) en comparación con sistemas agroecológico dos (5.76 y 5.84) y el convencional (5.63 y 5.85).

Los valores de pH cercanos a la neutralidad observados en el sistema con prácticas agroecológica uno coinciden con lo reportado por Ojeda *et al.*, (2007); Young, (1989), quienes indican que en los ecosistemas con presencia de árboles, la materia orgánica se mantiene a niveles satisfactorios, favoreciendo el reciclaje de las bases y permitiendo una reducción de la acidez del suelo.

PRODUCCIÓN DE PLANTAS

Este reciclaje inicia con la absorción de los elementos bases lixiviados a zonas profundas del suelo, a través del sistema radicular de los árboles de sombra, el cual se desarrolla más allá de la zona explorada por las raíces de las plantas de café y su posterior deposición y mineralización en la superficie del suelo, permitiendo valores mayores de pH con respecto al sistema convencional.

Esto se confirma al comparar los valores de pH con los contenidos de materia orgánica (cuadro 3), el cual es más bajo en la medida que la cantidad de materia orgánica disminuye, coincidiendo con Reyes *et al.*, (2007), quienes reportan que las aportaciones adicionales de abonos orgánicos, más la biomasa de las especies vegetales, incrementan los valores de pH a un nivel mayor con respecto a otros sistemas.

Carbono orgánico del suelo (%). En el cuadro 3 se observa que los contenidos de carbono orgánico oscilan entre 4.21 y 5.42 por ciento, no difiriendo estadísticamente, pero sí observándose una tendencia en aumento en los sistemas con prácticas agroecológicas, lo que se explica por el mayor aporte de carbono desde la biomasa aérea de los árboles de sombra y la hojarasca proveniente de las plantas del café.

Dalal y Carter (1999), establecen que las mayores pérdidas del carbono orgánico en el suelo, ocurre por el uso frecuente de fertilizantes químicos y suelos desprotegidos, como es el caso del sistema manejado convencionalmente. En este sentido, los sistemas con prácticas agroecológicas tienden a fijar carbono en el suelo, lo que contribuye indirectamente a mitigar los efectos del calentamiento global al fijar mayor cantidad de este elemento.

El carbono como elemento principal de la materia orgánica, resulta del balance entre la incorporación al suelo del material orgánico fresco y la salida del carbono en forma de CO₂ a la atmósfera (Martínez *et al.*, 2008). Este carbono procede fundamentalmente de la descomposición de la biomasa formada por la transformación fotosintética del CO₂ atmosférico, e interviene en la fertilidad del suelo (De la Rosa, 2008).

Materia orgánica del suelo (%). El contenido de materia orgánica no difirió estadísticamente en los sistemas, observándose valores altos en todos ellos, sin embargo, existe una tendencia a la disminución en el sistema convencional. Henríquez *et al.*, (2010), explican que esta característica es debido a que la alófana, arcilla muy reactiva y presente en suelos volcánicos, es de mucha estabilidad, debido a que se hidrata, se liga a la materia orgánica y forma complejos organominerales difíciles de descomponer; además este tipo de suelo se caracteriza, por poseer importante acumulación de materia orgánica, lo que favorece su acumulación con enlaces muy estables, atribuidos a la alta superficie específica del material volcánico y carga variable Cremona y López (2004), así como el retraso en la biodegradación y mayor conservación de la materia orgánica en los suelos (Wada, 1985).

Si consideramos algunas prácticas agroecológicas como el uso de enmiendas orgánicas y la combinación de especies vegetales en un sistema productivo, es normal que en éstos sistemas los contenidos de materia orgánica sean mayores, como ocurre en los tratamientos uno y dos, y se esperaría que con el tiempo, estos niveles se mantengan o incrementen por el suministro continuo de las enmiendas y por el aporte de materia orgánica que hace el cultivo y los árboles de sombra.

Nitrógeno total (%). No se indican diferencias significativas (cuadro 3) en cuanto a los valores de nitrógeno total del suelo, pero se observa una tendencia de que los contenidos sean mayores en los sistemas con prácticas agroecológicas, y más marcadamente en el sistema agroecológico uno, que registra los valores más altos.

Según LABSA-UNA (2011), estos valores son considerados como altos, lo que se atribuye a que los suelos volcánicos presentan altos niveles de materia orgánica y por lo tanto de nitrógeno. De acuerdo con lo planteado anteriormente y para este tipo de suelo, no se detectaron valores bajos de nitrógeno total en los tres sistemas, pero se observa en las figuras 3 una tendencia a disminuir en el sistema convencional.

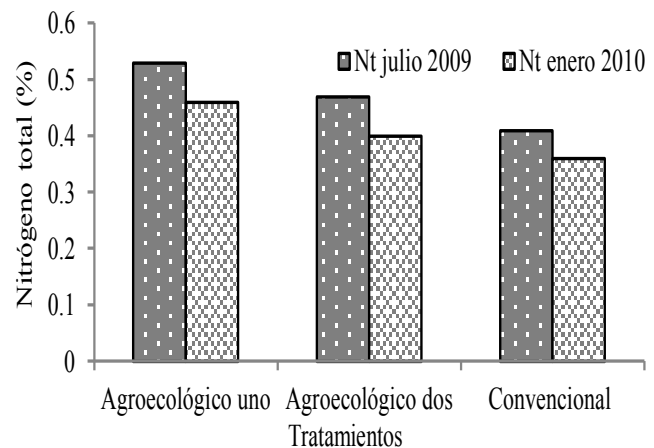


Figura 2. Nitrógeno total del suelo en función de los tratamientos, julio 2009, enero 2010.

Los mayores valores de nitrógeno en los sistemas con prácticas agroecológicas, es producto del continuo aporte de materiales orgánicos provenientes de las enmiendas aplicadas, hojarasca del cultivo y del aporte que los árboles de sombra hacen a través de hojas, ramas y raíces. Según Plaster (2000) el 97% del nitrógeno del suelo se encuentra en la materia orgánica, y según Gliessman (2002), tiene funciones importantes en la agricultura, ya que además de ser fuente de nutrientes, construye, promueve, protege y mantiene el ecosistema del suelo.

Capacidad de intercambio catiónico (cmol (+) kg⁻¹). No se registran diferencias estadísticas en los sistemas, sin embargo, según LABSA-UNA (2011), estos suelos presentan alta

PRODUCCIÓN DE PLANTAS

capacidad de intercambio catiónico. Al analizar los valores altos de materia orgánica y CIC, se deduce que estos suelos poseen buena fertilidad química.

Amberger (2006), plantean que esta condición es normal en suelos andisoles por la presencia de alófana (arcilla amorfa que confiere alta capacidad de intercambio catiónico), y gran capacidad de retención hídrica debido a su alta porosidad y su baja densidad aparente.

Amberger (2006), refiere que la capacidad de intercambio catiónico es un factor importante en la fertilidad del suelo. Entre más alta es la CIC, más capacidad tiene el suelo en retener cationes y proveer una adecuada nutrición a los cultivos (Gliessman, 2002).

Los valores de carbono orgánico se asocian con los de materia orgánica al igual que la capacidad que poseen los suelos de intercambiar sus elementos catiónicos. Si la capacidad de intercambio catiónico se refiere a la capacidad que tiene un suelo de intercambiar sus cationes desde la solución del suelo al complejo de intercambio y viceversa (Fuentes 1996), y considerando el aporte de la materia orgánica en elementos bases y su relación con el pH, la CIC es considerada como normal bajo estas condiciones químicas del suelo. La que es determinada por el tipo y cantidad de arcilla y materia orgánica del suelo (Sylvia *et al.*, 2005), lo que queda manifestado en los sistemas con prácticas agroecológicas.

Fertilidad biológica del suelo

Cuantificación de bacterias del suelo. Los resultados indican que no existen diferencias estadísticas en cuanto a las poblaciones de bacterias por efecto de los sistemas, sin embargo, en el mes de enero se presenta una tendencia de que las poblaciones sean mayores en los sistemas con prácticas agroecológicas.

Cuadro 4. Cuantificación de bacterias totales según tratamiento y época de muestreo

Tratamiento	UFC por gramo de suelo	
	Julio 2009	Enero 2010
Práctica agroecológica 1	11.6E6	26.6E6
Práctica agroecológica 2	5E6	18E6
Convencional	24.6E6	11.9E6
DMS	33.5E6	16.2E6

UFC: Unidades formadoras de colonia, DMS: Diferencia mínima significativa.

Las poblaciones de bacterias registradas están en correspondencia con los rangos reportados por Sylvia *et al.*, (2005), quienes indican que las poblaciones bacterianas en el suelo oscilan entre 1E6 y 1E8 de unidades formadoras de colonias por gramo de suelo.

En los sistemas con prácticas agroecológicas, las adiciones de pulpa de café y gallinaza han contribuido al aumento del sustrato orgánico del suelo y por lo tanto al aumento de la humedad, favoreciendo a las poblaciones bacterianas. Estos resultados coinciden con lo reportado por Cupull *et al.*, (2007), quienes encontraron que las aplicaciones de materia orgánica aumentan las poblaciones de bacterias en el suelo, y favoreciéndose por la mayor disponibilidad de agua que implican los niveles altos de materia orgánica en estos sistemas.

El sistema de manejo convencional presentó mayores poblaciones de bacterias (24.6E6 UFC) en julio, comparado con los sistemas agroecológicos uno y dos. Estos resultados son inesperados debido a que el manejo convencional solo consistió en aplicaciones de fertilizante mineral (N, P y K). Sin embargo, una posible explicación es que el suelo del área experimental de origen volcánico, por sus altos contenidos de materia orgánica (8.08 y 9.35%) combinado con la aplicación de fertilizante mineral, pudieron haber disminuido la relación C:N, facilitando las condiciones para el aumento de la población bacteriana.

(Sylvia *et al.*, 2005) reporta que adiciones de nitrógeno mineral al suelo son una fuente alimenticia para los microorganismos y que el carbono del suelo es utilizado como fuente de energía para reproducirse. En este estudio, los altos contenidos de carbono orgánico en combinación con las aplicaciones de nitrógeno mineral pudieron influenciar el aumento de las poblaciones de microorganismos. Por otro lado, el efecto positivo de los fertilizantes minerales sobre el aumento de la población de bacterias ha sido reportado por Mahajan *et al.*, (2007), quienes atribuyeron este efecto a la combinación de NPK en presencia de importantes cantidades de materia orgánica.

Cuantificación de hongos del suelo. Los rangos registrados en las poblaciones (cuadro 5) son similares a los reportados por Sylvia *et al.*, (2005), quienes plantean que las poblaciones fúngicas oscilan entre 1E4 y 1E6 por gramo de suelo. En ambas épocas de muestreo se registran mayores poblaciones en el sistema con prácticas agroecológica dos, y las poblaciones en los tres sistemas decrecen en el mes de enero, además se observan diferencias significativas en julio pero no en el mes de enero.

Cuadro 5. Poblaciones de hongos por tratamiento y época de muestreo

Tratamiento	UFC por gramo de suelo	
	Julio 2009	Enero 2010
Práctica agroecológica 1	8.4E5	8.3E4
Práctica agroecológica 2	1.7E6	1.5E5
Convencional	6.2E5	8.3E4
DMS	9.9E5	7.4E4

UFC: Unidades formadoras de colonia, DMS: Diferencia mínima significativa.

PRODUCCIÓN DE PLANTAS

Este comportamiento está asociado a una mayor cantidad de agua en el suelo en el mes de julio, debido a las precipitaciones ocurridas como parte del período lluvioso, lo que permitió la proliferación de las poblaciones fúngicas por efecto de la descomposición de las enmiendas orgánicas aplicadas, más la descomposición del material vegetal proveniente de las especies vegetales.

En el período de mayo a junio se registraron 436 mm de precipitaciones lo que significa que existieron adecuadas condiciones de humedad para que se produjera la mineralización de la materia orgánica, siendo esto un estímulo para el crecimiento de las poblaciones de hongos; así lo establece Alejandro (1980), quien explica que las poblaciones fúngicas aumentan bajo condiciones de adecuada humedad e inmediatamente después de adicionar materia orgánica al suelo, disminuyendo luego de este incremento.

Rendimiento acumulado de café oro (kg ha⁻¹). El análisis del rendimiento acumulado corresponde a la sumatoria de las cosechas desde el ciclo 2002-2003 (primera cosecha) hasta el ciclo 2009-2010. No se registran diferencias significativas (DMS = 3 899; p = 0.2203) por efecto de los sistemas, sin embargo, el manejo convencional registra el mayor rendimiento acumulado (9 776 kg oro ha⁻¹) seguido de la práctica agroecológica uno (8 759 kg oro ha⁻¹), como se indica en la figura 3.

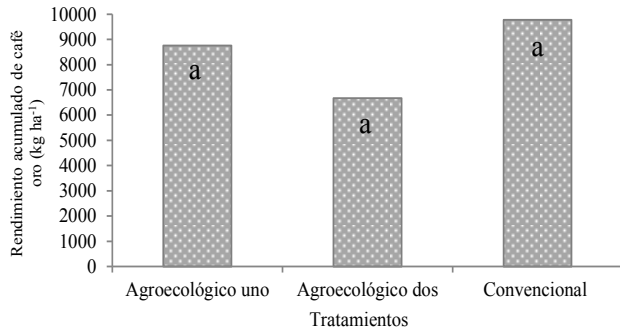


Figura 3. Rendimiento acumulado de café oro (kg ha⁻¹), ciclos agrícolas del 2002-2003 al 2009-2010.

La diferencia en el rendimiento acumulado entre el sistema convencional y la práctica agroecológica uno es de 10.4% (en promedio 127.13 kg oro ha⁻¹ = 2.8 qq oro ha⁻¹ por ciclo) diferencia considerada por Gliessman (2002), como aceptable en sistemas agroecológicos, ya que la producción en estos sistemas se manifiesta de manera sostenible y sin detrimento del ambiente, y podrían ser entre 10 y 20% menores que los de un sistema convencional (Fassbender, 1993). Además los sistemas agroecológicos brindan servicios ecosistémicos como la captura de CO₂, conservación del suelo al reducir el proceso erosivo, captación y retención de agua, reciclaje de nutrientes a través de la incorporación y descomposición de la materia orgánica, conservación y aumento de la biodiversidad, belleza escénica y en general, contribuyen con la salud del agroecosistema.

En un estudio sobre el análisis financiero de estos sistemas, Barrios *et al.*, (2012), registraron menor costo de manejo con las practicas agroecológicas y una rentabilidad financiera similar al sistema convencional. Tales sistemas probablemente incrementen los ingresos económicos al reducir los gastos por la compra de fertilizantes sintéticos y el uso de subproductos del sistema como combustible (leña), postes, estacas y madera y muestran una tendencia al incremento del rendimiento a través del tiempo e incluso a superar al convencional (Luna y López, 2012).

Según Altieri *et al.*, (1998) existen muchos casos de experiencias exitosas en el campo de la agroecología, que con el tiempo muestran niveles de producción estables, con rendimientos económicamente favorables que permiten alcanzar un nivel de vida aceptable, garantizando la protección y conservación del suelo e intensificación de la diversidad agrobiológica.

Análisis de componentes principales para la fertilidad del suelo. En la figura 4 se observa la relación entre los componentes de la fertilidad física, química y biológica del suelo. Cuando la magnitud de los vectores es semejante y el ángulo formado entre ellos es menor, significa que existe mayor relación entre los componentes de la fertilidad del suelo.

Podemos decir que existe una asociación entre los componentes de la fertilidad física [retención de agua (CC) y porosidad (η)] y su relación con la fertilidad biológica (poblaciones microbianas). También se evidencian la relación entre los componentes de la fertilidad química del suelo (MO, CO, Nt, CIC y pH); todos ellos como variables dependientes de los ambientes evaluados.

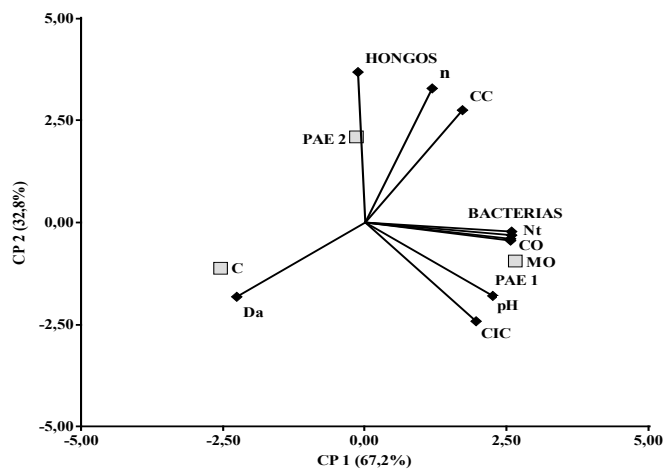


Figura 4. Análisis de componentes principales de variables físicas, químicas y biológicas del suelo.

Se establece que las variables están más asociadas principalmente al sistema agroecológico uno y agroecológico dos, lo que demuestra una tendencia en estos sistemas de presentar una mejor fertilidad física, química y biológica. Lo que se fundamenta porque en estos sistemas existen mayo-

PRODUCCIÓN DE PLANTAS

res contenidos de materia orgánica con respecto al sistema convencional, hecho que establece Ojeda *et al.*, (2007), al expresar que la materia orgánica influye proporcionalmente en los componentes de la fertilidad física, química y biológica del suelo de acuerdo a las cantidades presentes en él; y que el factor suelo está indefectiblemente asociada al mantenimiento del contenido de su materia orgánica (Reyes *et al.*, 2007).

Un beneficio relacionado al manejo agroecológico del suelo es el aumento de la capacidad de almacenamiento de agua; regulación del pH, mayor capacidad de intercambio catiónico, incremento de la materia orgánica, disminución de la densidad aparente (Comese *et al.*, 2009), aumento de la porosidad y de los niveles de nutrientes.

Las especies de sombra *Inga laurina* y *Samanea saman* contribuyen con el aporte de nitrógeno al fijarlo de la atmósfera a través de mecanismos naturales de simbiosis (Ojeda *et al.*, 2007), generando cambios en los componentes químicos del suelo y mejorando la fertilidad mediante un comportamiento favorable del contenido de materia orgánica y modificando la fertilidad física favoreciendo la densidad aparente, la porosidad y la retención de humedad (Murray *et al.*, 2011).

Otros beneficios del manejo agroecológico del suelo es proveer de energía a los organismos edáficos, aumentando su actividad y diversidad debido a las mejoras en la fertilidad física, química y biológica del mismo (Comese *et al.*, 2009; Labrador, 2001), lo que supone que en la medida que un componente es mejorado en el suelo, otros se manifiestan más favorablemente, así al aumentar la materia orgánica y el pH del suelo, la capacidad de intercambio catiónico se incrementa; componente que puede alterar positivamente la fertilidad del suelo física y químicamente (Sylvia *et al.*, 2005).

La relación inversa de la densidad aparente y la porosidad es normal si consideramos que ambos componentes son inversamente proporcionales. Murray *et al.*, (2011) plantean que la densidad aparente es un componente de la fertilidad física que está en relación directa con el contenido de carbono y de materia orgánica del suelo, ya que al incrementar el contenido de materia orgánica, la densidad aparente disminuye y en consecuencia aumenta la porosidad y la retención de humedad.

El comportamiento de las poblaciones de hongos y bacterias, está relacionado con los componentes hidrofísicos del suelo, principalmente en los sistemas con prácticas agroecológicas, ya que éstos presentan mayor disponibilidad de agua. Gliessman (2002), señala que en los sistemas donde se efectúan prácticas agroecológicas como la adición de materia orgánica, el agua es atraída con mayor fuerza y su intensidad está determinada por el tamaño de las partículas y los contenidos de materia orgánica del suelo; ejerciendo una acción positiva sobre la porosidad, la hidrofilia de los coloides húmicos y sobre la estructura, permitiendo mayor retención de agua en el suelo (Fuentes, 1996) y una relación directa con las poblaciones de microorganismos del suelo.

CONCLUSIONES

Los sistemas con prácticas agroecológicas registran mayor porosidad, retención de humedad y menor densidad aparente, lo que permite mejor conservación de agua en el suelo.

En los sistemas agroecológicos los mayores contenidos de materia orgánica contribuyen con una mayor capacidad de intercambio catiónico, mayor contenido de carbono orgánico y nitrógeno total y pH cercano a la neutralidad, lo que se traduce en una mayor disponibilidad e intercambio de nutrientes.

La fertilidad física y química del suelo registrada en los sistemas agroecológicos favorecen a las poblaciones de bacterias y hongos.

El rendimiento acumulado de café no difiere entre los sistemas evaluados, sin embargo, los sistemas agroecológicos contribuyen con la fertilidad del suelo.

Se establece una relación entre los sistemas agroecológicos con los componentes físico-químicos del suelo, definiéndose asociaciones entre la fertilidad química del suelo y las poblaciones de bacterias; además se especifica una relación entre las poblaciones de hongos, la retención de humedad y la porosidad del suelo, ésta última relacionada inversamente con la densidad aparente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al pueblo y gobierno de Suecia por el financiamiento para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altieri, MA. 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture Ecosystems and Environments*. (en línea). Consultado 15 sep. 2008. Disponible en <http://www.ruualberta.ca/People/rehr450/docs/ecolrolebiodiv.pdf>
- Altieri, MA; Rosset, P; Thrupp, LA. 1998. El potencial de la agroecología para combatir el hambre en el mundo en desarrollo. (en línea). Consultado 15 mar. 2014. Disponible en <http://www.edualter.org/material/sobirania/potencial%20agroecologia.pdf>
- Amberger, A. 2006. Soil fertility and plant nutrition in the tropics and subtropics. *International Fertilizer Industry Association (IFA), International Potash Institute (IPI), Paris, FR.* 96 p.
- Barrios, M; Navarrete, E; Navarrete, L. 2012. Análisis financiero del manejo de diferentes sistemas agroforestales con café. In *Sostenibilidad y sinergismo en café agroforestal: un estudio de las interacciones entre el café, las plagas, la fertilidad del suelo y los árboles*. Masatepe, Masaya, NI. p. 22-32.
- Cairo, P. 1995. La fertilidad física del suelo y la agricultura orgánica en el trópico. Curso de posgrado. Universidad Nacional Agraria. Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente. Escuela de Suelos y Agua. Managua, NI. 231 p.

PRODUCCIÓN DE PLANTAS

- Cardona-Calle, DA; Sadeghian-Khalajabadi, S. 2005. Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. (en línea). Consultado el 15 mar. 2014. Disponible en <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/197/1/arc056%2804%29348-364.pdf>
- Comese, RV; MG, González; ME, Conti. 2009. Cambios en las propiedades de suelo de huerta y rendimiento de Beta vulgaris var. Cicla (L) por el uso de enmiendas orgánicas. (en línea). Consultado 19 nov. 2011. Disponible en <http://web.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=4&hid=110&sid=0d1cf703-1e90-4dfc-af5e-206c5aa27318%40sessionmgr104>
- Cremona, MV; López, SG. 2004. Niveles de fósforo en Andosoles del valle de El Bolsón. Comunicación técnica N° 48, área recursos naturales suelos. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Centro Regional Patagonia Norte Estación Experimental Agropecuaria Bariloche, AR. 5 p.
- Cupull Santana, R; Ortiz Arbolaez, A; Sánchez Esmori, C; Andreu Rodríguez, CM; Cupull Santana, M del C. 2007. Incidencia de Trichoderma viride en las poblaciones de microorganismos en el suelo en injertos hipocotiledonares de café. (en línea). Consultado 01 oct. 2011. Disponible en <http://web.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=4&hid=110&sid=0d1cf703-1e90-4dfc-af5e-206c5aa27318%40sessionmgr104>
- Dalal, RC; Carter, JO. (1999). Soil organic matter dynamic and carbon sequestration in Australian tropical soil. In: Global climate change and tropical ecosystems. Ed. Lal, R; Kimble, JM; Stewart, BA. USA. P. 283-316.
- De la Rosa, D. 2008. Evaluación agroecológica de suelos para un desarrollo rural sostenible. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. EP. 404 p.
- Fassbender, HW. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. 1993. 2ª ed. Turrialba CR. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). (en línea). Consultado 19 abr. 2014. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0813E/A0813E.PDF>
- Fuentes Yagüe, JL. 1996. El suelo y los fertilizantes. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. EP. 242 p.
- Gliessman, SR. 2002. Agroecología: Procesos Ecológicos en Agricultura Sostenible. Turrialba, CR. CATIE. 359 p.
- Haggar, J; Staver, C. 2001. Sostenibilidad y sinergismo en sistemas agroforestales con café: estudio de interacciones entre plagas, fertilidad del suelo y árboles de sombra. Agroforestería en las Américas. 8(29):49-51.
- Henríquez, C; Cabalceta, G; Bertsch, F; Alvarado, A. 2010. Principales suelos de Costa Rica. (en línea). Consultado 18 sep. 2010. Disponible en http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/suelos-cr.html
- INETER (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales). 2010. Departamento de estadística de meteorología. Managua, Nicaragua.
- Labrador M, J. 2001. La Materia orgánica en los agrosistemas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaría General Técnica Centro de Publicaciones. 2 ed. Madrid, ES. Mundi-Prensa. 293 p.
- LABSA-UNA (Laboratorio de suelos y aguas, Universidad Nacional Agraria). 2011. Managua, NI.
- Luna R, FC; López M, JG. 2012. Fertilidad del suelo en tres sistemas de manejo en café (Coffea arabica L.) y su efecto en el rendimiento, Masatepe-Masaya. (en línea). Consultado 29 mar. 2014. Disponible en <http://cenida.una.edu.ni/Tesis/tnp351961.pdf>
- Mahajan, S; Kanwar, SS; Kumari, P; Sharma, SP. 2007. Long-term effect of mineral fertilizers and amendments on microbial dynamics in an alfi sol of Western Himalayas. Indian Journal of Microbiology 47:86-89.
- Martínez H, E; Fuentes E, JP; Acevedo H, E. 2008. Carbono orgánico del suelo. (en línea). Consultado 21 sep. 2013. Disponible en http://www.captura.uchile.cl/bitstream/handle/2250/7438/Martinez_Eduardo.pdf?sequence=1
- Murray Núñez, RM; Bojórquez Serrano JL; Hernández Jiménez, A; Orozco Benítez, MG; García Paredes, JD; Gómez Aguilar R; Ontiveros Guerra HM; Aguirre Ortega, J. 2011. Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México. Biociencia, (en línea). Consultado 31 mar. 2012. Disponible en <http://biociencias.uan.edu.mx/publicaciones/02-03/biociencias3-3.pdf>
- OFI; CATIE (Oxford Forestry Institute, UK, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CR). 2003. Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas. Eds. Cordero, J; Boshier, DH. Turrialba, CR. 1080 p.
- Ojeda Quintana LJ; AD, Oropesa; I, Castañeda; H, Eupierre; V, Chirino. 2007. Geomorfología, propiedades físicas y principales componentes de la fertilidad del suelo en un bosque semideciduomesófilo natural y en zonas de colecciones de plantas del Jardín Botánico de Cienfuegos. (en línea). Consultado 20 ene. 2011. Disponible en <http://web.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=15&hid=21&sid=8c1a403a-0891-4e39-8762-10ab45e1c351%40sessionmgr14>
- Pained, D; Wild, A. 1992. Estructura del suelo, laboreo y comportamiento mecánico condiciones del suelo y desarrollo de las plantas, según Russell. Madrid, ES. Edición Mundi-prensa. 1045 p.
- Paz, IV; Sánchez, MDP. 2007. Relación entre dos sistemas de sombrero de café y algunas propiedades físicas del suelo en la meseta de Popayán. (en línea). Consultado 22 dic. 2012. Disponible en <http://web.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=19&sid=f0a4d3ac-b0da-4f11-945a-d6df8075f2d3%40sessionmgr114&hid=122>
- Plaster, EJ. 2000. La ciencia del suelo y su manejo. 2da reimpression. Madriz, ES. p. 191-209.
- Reyes Hernández A.; PI, Cairo Cairo; J, Machado de Armas; O, Fundora Herrera; CR, Albuerno; AB, Manes Suárez; JR, Hernández; JE, Quesada Iznaga; G, Lino Fleites; L, Domínguez León. (2007). Efecto de los diferentes sistemas agroforestales sobre algunos indicadores de la fertilidad de un suelo ferralítico rojo amarillento lixiviado de Topes de Collantes. (en línea). Consultado 09 feb. 2011. Disponible en <http://web.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?hid=15&sid=ebd34578-0ef1-40db-a16c-6dcc-f5296e80%40sessionmgr11&vid=6>
- Sylvia, DM; Hartel, PG; Fuhrmann, JJ; Zuberer, DA. 2005. Principle and applications of soilmicrobiology. 2da ed. Ed. Perason Prentice Hall. New Jersey. USA. 640 p.
- Taboada, MA; Álvarez, CR. 2008. Fertilidad física de los suelos. 2 ed. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires. AR. 237 p.
- Wada, K. 1985. The distinctive properties of Andosols. Advances in Soil Science 2: 173-229.
- Young, A. (1989). Ten hypothesis for soil agroforestry research. Agroforestry Today. 1(1):3