

CAPTURA Y EMISION DE CARBONO EN SUELOS DE CAFETALES BAJO DIFERENTES TIPOS DE SOMBRA EN VENEZUELA

José Pastor Mogollón^{1,2}✉, Tania Fernández¹, Heleny Garrido¹, Dayberlis Quintero¹, Arnoldo Cordero¹, Yonathan Castillo¹, Thay Veliz¹, & Isabel Alejos¹.

1 Fundación CIEPE, División CAETRA; 2. Departamento de Química y Suelos, UCLA.

✉: jmogollon15@gmail.com

Palabras claves: bajo sombra; reservas de carbono; cambio climático.

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo estimar la captura y emisión de carbono en el suelo de cafetales bajo diferentes tipos de sombra que se vienen implementando en el estado Falcón, Venezuela. Se evaluó: a) un cafetal bajo sombra de leguminosas; b) café bajo sombra de musáceas; c) café alternado con cítricos como sombra, y d) la vegetación natural boscosa. En cada sitio se delimitó una parcela de 2.500 m², y dentro de cada una de estas se tomaron 6 muestras de suelo a dos profundidades, de 0-15 y de 15-30 cm. Se realizaron los siguientes análisis: carbono orgánico, pH, y acidez cambiante, respiración basal, carbono de la biomasa microbiana y densidad aparente del suelo. Los resultados encontrados demostraron que los suelos de cafetales bajo sombra de leguminosas son sumideros de carbono, almacenando 83 t ha⁻¹ de C a 30 cm de profundidad, teniendo así una eficiencia del 100% con respecto a los suelos del bosque usados como referencia. El cambio de uso de la sombra tradicional, de leguminosas por musáceas y cítricos, produjo una disminución en la eficiencia de captura de carbono en el suelo, de 60% y 48%, respectivamente. Los suelos de café-cítricos tuvieron la mayor emisión de CO₂ con valores de 82,4 mg C-CO₂ kg⁻¹ día⁻¹, seguidos de café-musáceas con 63,7 mg C-CO₂ kg⁻¹ día⁻¹, y café-leguminosas con 50,8 mg C-CO₂ kg⁻¹ día⁻¹ siendo catalogado el sistema café-cítricos como el menos eficiente en cuanto a la captura de carbono.

CARBON CAPTURE AND EMISSION IN SOILS OF COFFEE PLANTATION UNDER DIFFERENT TYPES OF SHADE IN VENEZUELA

Keywords: Coffee Under Shade; soil carbon reserve; climate change.

ABSTRACT

The present study aimed to estimate the capture and emission of carbon in the soil of coffee plantations under different types of shade that are being implemented in the state of Falcón, Venezuela. The following were evaluated: a) a coffee plantation under the shade of legumes; b) coffee under the shade of musaceae; c) coffee alternated with citrus as shade, and d) natural wooded vegetation. At each site, a 2,500 m² plot was delimited, and within each of these, 6 soil samples were taken at two depths, 0-15 and 15-30 cm. The following analyzes were carried out: organic carbon, pH, and changeable acidity, basal respiration, carbon of the microbial biomass and apparent density of the soil. The results found showed that the coffee plantation soils under the shade of legumes are carbon sinks, storing 83 t ha⁻¹ of C at 30 cm depth, thus having an efficiency of 100% with respect to the forest soils used as a reference. The change in the use of traditional shade, from legumes to musaceae and citrus, produced a decrease in the efficiency of carbon sequestration in the soil, of 60% and 48%, respectively. The coffee-citrus soils had the highest CO₂ emission with values of 82.4 mg C-CO₂ kg⁻¹.day⁻¹, followed by coffee-musaceae with 63.7 mg C-CO₂ kg⁻¹ day⁻¹, and coffee-legumes with 50.8 mg C-CO₂ kg⁻¹ day⁻¹, the coffee-citrus system being classified as the least efficient in terms of carbon capture.

Rec : 01/11/2022

Acep : 30/11/2022



INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas ambientales de mayor relevancia en la actualidad, está asociado al cambio climático, y él mismo está íntimamente relacionado a las actividades humanas que han aumentado las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) (IPCC, 2013).

Sobre la base de la consideración anterior, se ha señalado a la agricultura como una actividad que además de causar gran cantidad de emisiones de GEI, al mismo tiempo es altamente vulnerable a consecuencia del cambio climático, ya que este ocasiona una mayor variación de las lluvias, aumento de tormentas, y sequías prolongadas, lo cual favorece la aparición de plagas que afectan la producción de cultivos; todo esto se traducirá en una reducción de la producción y de los rendimientos de las cosechas (Isaza y Cornejo, 2014).

En este sentido, el IPCC (2014) ha indicado que la agricultura es una fuente importante de emisiones de gases que contribuyen al efecto invernadero, ya que libera grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) a través de la quema de la vegetación, principalmente en zonas de donde se ha estado realizando la deforestación de ecosistemas boscosos para convertirlos en tierras de cultivo y pastizales. También es responsable de un 55% de las emisiones de metano (CH₄), y aunque persiste en la atmósfera durante un tiempo más corto, es aproximadamente veinte veces más potente que el CO₂ en su acción de

calentamiento y, por lo tanto, un importante factor a corto plazo del calentamiento global (Sosa-Rodríguez y García-Vivas, 2019).

En la región de Latinoamérica se han experimentado y medido los efectos del cambio climático en la agricultura y específicamente en el sector cafetalero; al respecto Imbach *et al.* (2017) realizaron modelaciones donde se estimó que las regiones idóneas para la producción de café (*Coffea arabica*) se reducirán hasta un 88 % para el año 2050. De igual forma, Sánchez *et al.* (2018) indican que la variabilidad climática no sólo influye en la producción del cultivo, al propiciar alta presencia de granos de café de baja densidad en años secos, sino que además causa un efecto en la estructura de precios del mercado mundial por factores asociados a la calidad del grano.

Una de las propuestas que ha tenido más auge en años recientes en la agricultura es la adaptación de los sistemas agrícolas basada en ecosistemas (AbE) como una opción ante los cambios en el clima. De esta manera Villareyna *et al* (2020) definen la AbE como la utilización de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos como parte de una estrategia de adaptación a los efectos adversos del cambio climático. En el caso de la mitigación, una de las maneras de atenuar el efecto con que el CO₂ atmosférico participa en el cambio climático, es a través de la captura del carbono (C) mediante la fotosíntesis, y mantenerlo el mayor tiempo posible secuestrado, ya sea en el suelo o en forma de biomasa, la cual incluye todo tipo de vegetación y organismos animales. En el caso particular del compartimento suelo, este ha

sido considerado el mayor sumidero terrestre de dióxido de carbono (CO₂), el cual es considerado uno de los gases de efecto invernadero que interviene en el calentamiento global (Viguera *et al.*, 2017).

Es evidente entonces que los sistemas agroforestales representan una de las alternativas más eficientes para conseguir la reducción de las emisiones de GEI, siendo denominados como proyectos de captura de C como un servicio ambiental; en este caso, los cafetales bajo árboles de sombra son uno de los agroecosistemas más favorables para este propósito (Vásquez-Luna *et al.*, 2018). En este orden de ideas, se ha señalado en la literatura que al utilizar la especie *Inga jinicuil* como sombra en cafetales, la captura de carbono (CC) puede ser de 198 t ha⁻¹; y en sitios con cultivo de café, en asociación con *Inga* sp., *Erythrina* y musáceas la captura asciende a 116 t C ha⁻¹ y en sitios con *Inga* sp. y estratos de bosque, alcanza 92 t C ha⁻¹ (Hernández *et al.*, 2012). Por otra parte, Mariño (2014) señala que una hectárea de cafetal genera 39 kg de O₂ día⁻¹ y se esperaría una fijación mínima de 7 t C ha⁻¹ año⁻¹ para un ciclo de 20 años.

En Venezuela, al igual que en muchos países de Centro y Sur de América, el café tradicionalmente se cultiva bajo sombra de árboles del género *Inga*, *Cordia*, *Cedrela* y *Erythrina* aunque también de árboles frutales como aguacate (*Persea americana*), cítricos (*Citrus sinensis*) y bananos (*Musa paradisiaca*); conocido como sistema cafetalero multiestrato o policultivo tradicional, el cual mantiene la biodiversidad funcional y estructural del ecosistema (Paolini, 2017; Mogollón, 2008), y en menor grado se desarrolla una producción cafetalera

en el país a plena exposición solar (Solórzano y Querales, 2010).

Sin embargo, hasta la fecha no se ha realizado ningún estudio en el país que relacione el papel de los cafetales como sumideros de carbono o emisores de dióxido de carbono hacia la atmósfera. De tal manera que el objetivo de esta investigación fue estimar las reservas de carbono en el suelo, así como las tasas de emisión de CO₂, en sistemas cafetaleros bajo diferentes tipos de sombra los cuales se vienen implementando en la Sierra Falconiana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y características del área de estudio.

El estudio se realizó en la Finca Taca-Taca, ubicada en el municipio Petit del estado Falcón, en las coordenadas geográficas 11°10'25'' N y 69°40'08'' O, a una altura promedio de 1.078 msnm. Los suelos evaluados, ya fueron estudiados previamente (Mogollón, 2008) y corresponden a una misma clase textural denominada franco-arcillosa (FA), siendo clasificados como Typic Distropepts. La zona presenta una temperatura promedio anual de 23 °C y una precipitación promedio anual de 1.100 mm (Mogollón *et al.*, 1997).

Las muestras de suelos fueron colectadas en cafetales que se vienen manejando bajo tres sistemas de manejo de la sombra: a) un cafetal con la variedad típica con una densidad de 3.500 plantas ha⁻¹, bajo sombra de leguminosas, como guamo (*I. villosissima*) y bucare (*Erythrina poeppigiana*) establecido por más de 50 años; b) un cafetal con la variedad caturra con una densidad de siembra de 4.500 plantas ha⁻¹, bajo sombra de

musáceas y otras especies de menor importancia; con un tiempo estimado bajo este uso de 10 años; c) un cafetal de la variedad catuaí amarilla, con una densidad de 4.000 plantas ha⁻¹ alternado con cítricos (350 plantas ha⁻¹) como sombra, establecido desde hace quince años, y que anteriormente se hallaba sometido a la sombra de *I. villosissima*; d) se evaluó, además una parcela con vegetación natural boscosa, no intervenida desde hace más de 70 años.

Muestreo de Suelos

En cada sitio experimental fue delimitada una parcela de 2.500 m², y dentro de cada una de estas se tomaron 20 muestras simples, a dos profundidades de muestreo, de 0-15 y de 15-30 cm, considerando para ello la banda de fertilización de la planta de café, y el hecho de que cada planta muestreada tuviera la influencia de la planta usada como sombra.

Estas fueron llevadas al laboratorio, y se separaron en dos porciones. Una fue secada al aire durante 72 horas, y posteriormente pasada por un tamiz de malla 2 mm. Con esta muestra se realizaron los siguientes análisis: carbono orgánico, textura, pH, acidez cambiante, fósforo disponible, nitrógeno total, nitrato y amonio disponible.

La otra porción de la muestra fue tamizada por una malla de 2 mm, a la humedad de campo y almacenada bajo refrigeración (4°C) por un máximo 72 horas, tiempo en el cual se realizaron los análisis de respiración basal y carbono de la biomasa microbiana.

Análisis Estadístico de los Datos

El estudio fue de carácter cuasi-experimental y se evaluó como un diseño completamente aleatorio, donde cada uno de los cafetales bajo distintos tipos de sombra, así como el lote con vegetación boscosa natural, fue

considerado como un tratamiento. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software INFOSAT 1.1 (INFOSAT, 2002). Las diferencias entre los diferentes lotes se analizaron mediante análisis de varianza (ANVA) de un factor utilizando la prueba de medias de Tukey para separar los tratamientos en función de la magnitud de los valores obtenidos. Adicionalmente se aplicó la correlación de Pearson para observar el grado de asociación entre algunas de las variables estudiadas.

Análisis de Laboratorio

Se realizaron análisis de laboratorio a cada una de las muestras colectadas en campo para las diferentes condiciones de manejo, a objeto de caracterizar los suelos.

El pH se determinó usando el método potenciométrico, en una relación suelo:agua de 1:2 (Bates, 1973). La acidez intercambiable (H⁺ + Al³⁺) fue extraída con 1M de KCl y determinada por titulación con NaOH (McLean, 1982). El carbono orgánico se determinó por el método de combustión húmeda con ácido sulfúrico concentrado y dicromato de potasio propuesto por Walkley-Black (1934). El nitrógeno total fue determinado por digestión de las muestras con ácido sulfúrico concentrado y catalizador de selenio a 350°C por 2 h, posteriormente se destiló con un equipo Kjeldahl semiautomático (Bremner, 1996).

La densidad aparente se determinó a partir del método de Umland tomando muestras no disturbadas en el campo, a las dos profundidades de muestreo, según la metodología propuesta por Blake y Hartge (1986). Esta variable permitió convertir las unidades de concentración (% y µg g⁻¹), del carbono orgánico del suelo y carbono de la

biomasa microbiana, a reservas ($t\ ha^{-1}$) en el suelo. El análisis textural se realizó por el método de sedimentación de las partículas de suelo, comúnmente conocido como método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962). La respiración basal (RB), se midió de acuerdo al método descrito por Alef (1995), fundamentado en el CO_2 liberado durante la incubación del suelo (al 60% de la capacidad de campo) en un sistema cerrado. El carbono de la biomasa microbiana (C-BM) se obtuvo por el método de la respiración inducida por sustrato (Anderson y Domsch, 1978).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Carbono Orgánico del Suelo (COS)

En el Cuadro 1 se observan los valores del carbono orgánico del suelo, para las dos profundidades evaluadas. Los valores más altos de carbono orgánico en el suelo, en términos de concentración se encontraron en los suelos superficiales bajo bosque y de café bajo sombra de leguminosas (guamo y bucare) con valores de 4,39% y 4,24% respectivamente, no existiendo diferencias estadísticas entre estos sitios; se encontraron valores intermedios para café con sombra de plátano (2,25%), y los valores más bajos de COS se encontraron en los suelos de café-cítricos con 1,48%. Para la segunda profundidad de muestreo, siempre los valores de COS fueron más bajos con respecto a la capa superficial y los mismos siguieron este orden: Bosque>Café-Guamo>Café-Plátano>Café-Cítricos, con valores de 2,22%, 1,54%, 1,14% y 1,04% respectivamente.

Tal como lo señalan Pérez y López (2004), el horizonte superficial de los suelos explotados agrícola y generalmente presenta valores más altos de COS, generalmente entre 0,05 y

5,8%, y también que este contenido decrece a medida que se profundiza en el perfil del suelo, tal como ha sido reportado en este estudio.

El mayor contenido de COS encontrado en el sistema de café bajo sombra de árboles de la familia de las leguminosas podría estar relacionado al mayor aporte de biomasa vegetal como hojarasca que se produce en estos sistemas de manejo; en tal sentido, Cardona y Sadeghian (2005a) señalan que se pueden llegar a producir $11\ t\ ha^{-1}$ de residuos orgánicos, cuyas características son altos contenidos de ligninas lo que hace que sean más resistentes a la degradación microbiana y por ende ocurra una mayor acumulación en el suelo de compuestos carbonatados que contribuyen a la formación de carbono orgánico en el suelo.

Los valores de COS encontrados en este estudio resultaron superiores a los reportados por Alvarado *et al.*, (2013) en suelos cafeteros de Colombia, quienes encontraron valores entre 1,2 y 3,0 % en capas de suelo de 0-30 cm de profundidad. Sin embargo, los valores encontrados en esta investigación, contrastan con los encontrados por Sadeghian (2011) quien reporta valores de 7,1 % y 7,0 % de COS en cafetales bajo sombrero parcial de guamo (*Inga sp.*) o de plátano (*Musa AAB*), respectivamente.

Nitrógeno Total (N total)

En el Cuadro 1 se muestra los valores de N total del suelo. No hubo diferencias significativas para esta variable en los suelos de bosque, café con sombra de leguminosas y café con musáceas, con valores de 0,40, 0,37

y 0,33% respectivamente. Los valores más bajos y estadísticamente diferentes se encontraron en los suelos de café asociados con cítrico (0,15%). Por otra parte, siempre se

encontraron valores más bajos de N total en la capa más profunda de los suelos evaluados (15-30 cm).

Cuadro 1. Análisis químicos de suelo en los diferentes sistemas de manejo de sombra evaluados

Tipo de Manejo	COS (%)	N total (%)	pH	Al ³⁺ (cmol kg ⁻¹)
Bosque (0-15 cm)	4,39 a [‡]	0,40 a	6,18 a	0,13 d
Bosque (15-30 cm)	2,22 b	0,10 b	5,93 b	0,21 d
Café-Guamo (0-15 cm)	4,24 a	0,37 a	6,13 a	0,22 d
Café-Guamo (15-30 cm)	1,54 c	0,08 b	5,83 b	0,63 c
Café-Plátano (0-15 cm)	3,25 b	0,33 a	6,02 b	0,14 d
Café-Plátano (15-30 cm)	1,14 c	0,08 b	5,52 c	1,56 b
Café-Cítrico (0-15 cm)	1,48 c	0,15 b	5,58 c	1,66 b
Café-Cítrico (15-30 cm)	1,04 c	0,09 b	5,12 d	2,21 a

[‡] Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

La mayoría de las explotaciones cafetaleras ubicadas en Venezuela, y sobre todo las establecidas en el estado Falcón, se encuentran sometidas a un manejo bajo árboles de sombra con predominancia de árboles de la familia Leguminosae (*Inga* sp., *Erythrina* sp., entre otras). Además, se utilizan bananos (*Musa* sp.) y cítricos (*Citrus* sp.) con el mismo fin. Los árboles utilizados para dar sombra al cultivo de café pueden jugar un papel muy importante en el ciclo del nitrógeno, debido a que aportan cierta cantidad de N al suelo a través de la caída de hojarasca, la producción de residuos de raíces

y la fijación biológica para el caso de leguminosas (Mogollón *et al.*, 1997). De esta forma, representan un factor importante para el mantenimiento de la fertilidad de los suelos y la sostenibilidad del sistema.

En el marco de las observaciones anteriores, también se ha señalado en la literatura que la presencia de especies fijadoras de nitrógeno atmosférico en el sistema agroforestal permite mejorar el balance en este elemento. Las cantidades estimadas de nitrógeno, en cafetales bajo condiciones normales, con manejo de especies fijadoras como *Erythrina poeppigiana* o *Inga edulis*, están alrededor de

los 100 kg N ha⁻¹ (Villareyna, 2016), y las mismas pueden variar desde 56-555 kg N ha⁻¹ (Nygren *et al.*, 2012).

pH:

Los suelos óptimos para la producción de café deben tener un pH entre 5,5 y 6,5. Valores de pH por debajo de 5 o por encima de 6,5 dificultan la nutrición de los cafetos (Duicela, 2011). Sin embargo, en la práctica se cultiva café en suelos con un pH menor a 4 y por encima de 8. En la región tropical donde se cultiva café, a menudo los suelos son ácidos, y ricos en hierro y óxido de aluminio (por ejemplo: andisoles, inceptisoles, oxisoles, etc.). Estos tipos de suelo son además caracterizados por baja capacidad de intercambio catiónico (Wintgens, 2004).

Los suelos evaluados presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en relación al pH (Cuadro 1); se encontraron suelos ligeramente ácidos en la capa superficial de las parcelas de bosque, café con sombra de guamo, y café bajo sombra de plátano. Mientras que en la capa superficial del cafetal asociado con cítricos, el pH del suelo es fuertemente ácido ($\text{pH} \leq 5,5$). La misma tendencia se presentó en la capa de 15-30 cm de profundidad, donde se observó un mayor proceso de acidificación de los suelos con el cambio del tipo de sombra de leguminosas hacia cítricos, encontrándose los suelos más ácidos.

La disminución significativa del pH en los suelos de café asociados con cítricos, podría estar relacionada a la acidez generada por la nitrificación del amonio proveniente de la fertilización con urea en esta asociación de cultivos, donde se aplican 250 g

urea/planta/año, situación que no ocurre en los otros sistemas evaluados. Para el caso de los cafetales bajo sombra de leguminosas y sobra de plátanos no se aplica fertilizante químico, sino que se hace uso de vermicompost sólido a razón de 3 kg/planta/año. En tal sentido, Sadeghian *et al.* (2006), señalan que el descenso del pH en suelos cultivados con café fertilizado con urea, es el resultado de un excedente de iones H⁺ que se generan en la nitrificación, provenientes de la fertilización nitrogenada y que no son neutralizados por la liberación de iones OH⁻ en el proceso de absorción de NO₃⁻ por las raíces de las plantas.

Aluminio Intercambiable (Al³⁺)

Los suelos ácidos con valores de pH menores de 5,5 se caracterizan por presentar concentraciones de aluminio soluble (Al³⁺) que puede resultar tóxicas para las plantas, así mismo, se alteran las poblaciones y las actividades de los microorganismos que intervienen en la mineralización de la materia orgánica (Sadeghian, 2016). Para el caso de los suelos estudiados se encontró que el aluminio intercambiable (Cuadro 1) siempre fue menor de 1 cmol kg⁻¹ en los suelos de bosque, como en café-guamo y café-plátano en la capa superficial (0-15 cm). Sin embargo, al asociar el café con cítricos, los niveles de Al³⁺ se incrementan significativamente, hasta alcanzar valores de 1,66 y 2,21 cmol kg⁻¹ para la capa de 0-15 y 15-30 cm respectivamente.

En este mismo orden de ideas, se ha señalado en la literatura la fuerte relación que existe entre el pH del suelo y los incrementos en la acidez intercambiable (Reyes *et al.*, 2007). En este estudio se encontró que el sistema de

sombra de café que presentan los valores de pH más ácidos (café-cítricos), tienen a su vez los valores de Al^{3+} intercambiable más elevados.

La acidificación del suelo en el sistema de café asociado con cítricos como sombra pudiera estar relacionada con lo expuesto por Álvarez *et al.* (2000) acerca de que los residuos de las plantas de naranja, en el proceso de reposición de hojarasca, generan complejos órgano-húmicos de fuerte estabilidad, es decir, mayor presencia de materia orgánica difícilmente mineralizable, y una alta producción de ácidos orgánicos (cítrico, fumárico, málico, malónico, succínico) los cuales contribuyen al proceso de acidificación del medio edáfico.

Densidad aparente (t/m^3)

En el caso de la densidad aparente (D_a), en el Cuadro 2 se observa claramente que hubo diferencias significativas en este parámetro, entre los cafetales bajo diferentes tipos de sombra ($p < 0,05$). Los valores más bajos de D_a se reportan en los suelos bajo sombra de leguminosas ($1,23 t/m^3$), cuyos valores fueron similares a los encontrados en los suelos superficiales del bosque ($1,25 t/m^3$).

Estos valores de D_a más bajos en los suelos con manejo de la sombra con árboles de la familia leguminosas (*Inga villosissima* y *Erythrina poeppigiana*), estarían relacionados a los mayores valores de materia orgánica. La acumulación de materia orgánica en el suelo trae algunos efectos positivos entre los cuales tenemos la formación de agregados, el aumento de la

porosidad, adecuado intercambio gaseoso, infiltración de agua, y la disminución de la D_a (Mendoza-Dávila *et al.*, 2021). Todos estos factores permiten excelente desarrollo radicular y favorecen adecuado establecimiento y desarrollo de la biota del suelo (Pardo, 2017).

Similares resultados han sido reportados en la literatura; al respecto Cardona y Sadeghian (2005b) señalan que en la zona cafetera de Colombia en suelos con café bajo sombra se encontraron menores valores de densidad aparente, que en suelos muestreados en cafetales a plena exposición solar.

Al realizar un análisis de regresión lineal entre las dos variables (D_a y COS) encontramos una estrecha correlación, la cual se visualiza en la Figura 1. Al incrementar los niveles de materia orgánica en el suelo, se reduce la densidad aparente. Por otra parte, los menores valores de D_a encontrados en los suelos de cafetales con sombra parcial de musáceas y cafetales con sombra parcial de cítricos estarían asociados además de los menores aportes de materia orgánica en estos sistemas de manejo, a la mayor compactación a que son sometidos los suelos producto de las labores agrícolas (desmalezado, aporte de insumos, pisoteo constante), las cuales son más intensivas en estos sistemas de manejo.

Porcentaje de Espacio Poroso Total (%EPT)

El espacio poroso total mostró diferencias significativas en la capa superficial entre los sistemas de manejo de la sombra en cafetales (Cuadro 2). No hubo diferencias estadísticas entre los valores que se encontraron en el cafetal bajo sombra de leguminosas y los

medidos en el suelo del bosque, con valores de 53,5% y 52,8%, respectivamente. Al introducir las musáceas y cítricos como sombra de café, se observa una disminución significativa en el %EPT. De manera general, podemos decir que el %EPT disminuyó con la profundidad del suelo, así como con los cambios del tipo de árboles usados como sombra.

Cuadro 2. Análisis físicos de suelo en los diferentes sistemas de manejo de sombra evaluados

Tipo de Manejo	Da (t m ³)	EPT (%)	Arcilla (%)	Arena (%)	Limo (%)	Clase Textural
Bosque (0-15 cm)	1,25c‡	52,8a	36c	35b	29 ^a	FA
Bosque (15-30 cm)	1,46b	44,9b	33c	36b	31a	FA
Café-Guamo (0-15 cm)	1,23c	53,5a	40c	40b	20b	FA
Café-Guamo (15-30 cm)	1,47b	44,4b	34c	49a	17b	FAa
Café-Plátano (0-15 cm)	1,45b	45,4b	35c	39b	26a	FA
Café-Plátano (15-30 cm)	1,50b	43,4b	36c	48a	16b	Aa
Café-Cítrico (0-15 cm)	1,58 ^a	40,4c	39b	32c	29a	FA
Café-Cítrico (15-30 cm)	1,57 ^a	40,6c	43a	32c	25a	A

‡ Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Esto corrobora que los suelos bajo estos sistemas de manejo de la sombra en café, están más compactados, por efectos indirectos al disminuir la cantidad de materia orgánica en el suelo, así como los efectos

directos que ocasionan las labores agrícolas en estos sistemas más intensivos.

En este orden de ideas, Schroth *et al.* (2001) afirman que el espacio poroso es una

propiedad importante para el desarrollo y distribución de las raíces, por tanto, este órgano de la planta puede verse afectado si la densidad aparente de los suelos aumenta y el porcentaje de poros se reduce, tal y como sucedió en los cafetales bajo sombra de musáceas y cítricos evaluados en este trabajo de investigación.

Textura de Suelo

Los suelos evaluados en los distintos cafetales, presentaron una textura similar en

los primeros 15 centímetros. En el Cuadro 2 se muestra el análisis textural, el cual arrojó que los suelos son franco-arcillosos (FA). El café requiere de suelos con textura media (suelos francos), buena estructura (de tipo granular), de coloración oscura y alta cantidad de macro y microporos (permeabilidad moderada), y con buen drenaje superficial, que favorezca la presencia de un ambiente oxidante (Villarreyana, 2016).

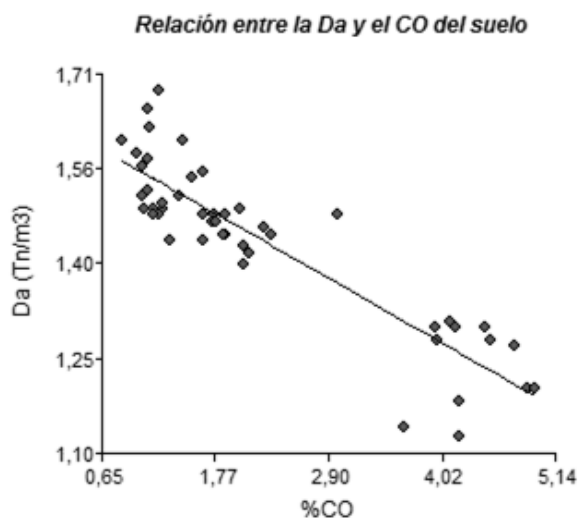


Figura 1. Relación entre la Densidad aparente (Da) y el Carbono Orgánico para los suelos de cafetales bajo distinto tipo de sombra. $Da = 1,65 - 0,09 (\%CO)$; $p < 0,0001$ y $r^2 = 0,80$

Respiración del Suelo (Emisión de CO₂)

La tasa de producción de CO₂ es importante porque es indicativa de la tasa de descomposición de la MOS y en consecuencia, de la cantidad de carbono que

se pierde del sistema suelo. Las medidas de la respiración del suelo (RS) ayudan a determinar la contribución del suelo al balance del CO₂ en la atmósfera (Burbano-Orjuela, 2018).

En el Cuadro 3 se observan los valores de la RS. No existieron diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes cafetales estudiados. Los valores más altos de respiración edáfica se encontraron en los suelos superficiales (0-15 cm) de café-cítrico y café-plátano (46,4 y 34,4 mg C-CO₂ kg⁻¹. día⁻¹, respectivamente). Y los valores más bajos de la RS en los suelos de Bosque (17,1 y 15,5 mg C-CO₂ kg⁻¹. día⁻¹ para las profundidades de 0-15 y 15-30 cm respectivamente). Mientras que en los suelos de café-leguminosas se obtuvieron valores entre 22,6 y 28,2 mg C-CO₂ kg⁻¹. día⁻¹.

Los resultados obtenidos para la variable RS indican que los suelos de café con sombra de leguminosas podrían estar actuando como sumideros de carbono, ya que presentaron valores más bajos en comparación a los de café-plátano y café-cítrico. Los suelos de bosque y de café-leguminosas serían sumideros naturales de carbono, teniendo en cuenta la calidad de las entradas de materia orgánica y los mecanismos naturales de estabilización del C en estos ecosistemas, confirmando lo expuesto por Vásquez *et al.* (2013) en relación a que los cambios en el uso de los suelos conllevan al aumento en las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Cuadro 3. Valores medios de Respiración de Suelo y Carbono de la Biomasa Microbiana en los suelos colectados en los diferentes sistemas de manejo de la sombra evaluados, a las dos profundidades de estudio.

Tipo de Manejo	RS mg C-CO ₂ kg suelo día ⁻¹	C-BM mg C kg ⁻¹ suelo
Bosque (0-15 cm)	17,10 e	602 a
Bosque (15-30 cm)	15,57 e	435 b
Café-Guamo (0-15 cm)	28,22 c	576 a
Café-Guamo (15-30 cm)	22,64 d	333 c
Café-Plátano (0-15 cm)	34,42 b	376 c
Café-Plátano (15-30 cm)	29,28 c	226 d
Café-Cítrico (0-15 cm)	46,43 a	264 d
Café-Cítrico (15-30 cm)	36,00 b	123 e

‡ Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Por otra parte, es importante acotar que los resultados de este estudio resultaron similares a los reportados por Pardo *et al.* (2019) quienes indican valores de RS entre 18 y 37 mg C-CO₂ kg⁻¹. día⁻¹ para cafetales ubicados en la región de Baruta, estado Miranda, Venezuela; y un poco más bajos a los referidos por Vásquez *et al.* (2013), quienes encontraron valores de 75 mg C-CO₂ kg⁻¹. día⁻¹ para cafetales bajo sombra en el Departamento de Magdalena, Colombia, y los reportados por Paolini (2017) quien encontró valores de 76 mg C-CO₂ kg⁻¹. día⁻¹ para un cafetal bajo sistema agroforestal y manejo orgánico en los andes trujillanos en Venezuela.

La gran diversidad de resultados encontrados en la literatura está relacionada con los factores que controlan la mineralización del carbono, tanto los intrínsecos al suelo (textura, pH, calidad y cantidad de la materia orgánica, contenidos de nutrientes, capacidad de intercambio catiónico, salinidad, presencia de metales pesados, tipo de suelo, entre otros), así como los de naturaleza climática (temperatura y precipitación), además del tipo de manejo del cultivo (incorporación de residuos, fertilización, pesticidas), tal como ha sido señalado por Singer y Munns (2006).

Carbono de la Biomasa Microbiana (C-BM)

En el Cuadro 3 se observa que esta variable mostró variaciones significativas por tipo de sombra en cafetales. Los valores más altos se encontraron en los suelos de bosque y en los cafetales bajo sombra de leguminosas, con valores de 602 y 576 mg C kg⁻¹ suelo respectivamente, y siendo similares estadísticamente. Los valores más bajos se presentaron en los suelos Café-Cítrico (265 mg C kg⁻¹ suelo para 0-15 cm y 123 mg C kg⁻¹ suelo para la profundidad de 15-30 cm). De manera general, los valores de C-BM microbiana disminuyeron significativamente con la profundidad del suelo. El hecho de conseguir mayores valores de carbono en biomasa microbiana en los cafetales bajo sombra de leguminosas puede estar relacionado como señalan Pardo *et al.* (2019) a la formación de un mantillo estable, a partir de la hojarasca y residuos vegetales, provenientes tanto de los arbustos de café como de los árboles de sombra.

Esta capa de residuos orgánicos regula la dinámica hídrica en el agroecosistema y permite un aporte permanente de carbono y sustancias orgánicas al suelo, usadas como fuentes de nutrientes y de energía por los microorganismos del suelo, tal como lo señalan Balota y Chaves (2011), favoreciendo el crecimiento y el desarrollo de las comunidades microbianas. Es así, como la vegetación y el tipo de suelo deben ser considerados factores claves, que pueden

modificar las características del suelo y son fundamentales para mantener una microbiota estable tal como indican Bastida *et al.* (2008). Los resultados de C-BM encontrados en este estudio resultaron ser más altos a los reportados por Durango *et al.* (2015) en suelos bajo bosque (423 mg C kg⁻¹) y café asociado con musáceas (111 mg C kg⁻¹), en un estudio realizado en Turrialba, Costa Rica. De igual manera fueron más altos a los reportados por Paolini (2017) quien señala valores de 463 mg C kg⁻¹ para un cafetal con manejo tradicional de la sombra en el estado Trujillo, Venezuela.

Por otra parte, los valores más bajos del C-BM encontrados en los suelos de café-cítricos estarían asociados al carácter de mayor acidez que presentan estos suelos; en este sentido, Mogollón y Martínez (2009) señalan que las condiciones de extrema acidez (bajos valores de pH), altos contenidos de aluminio intercambiable en la solución del suelo, y bajo contenido de nutrientes, generan un estrés edáfico que afecta la actividad microbiana, disminuyendo la biomasa microbiana del suelo. Esto se corrobora al realizar la prueba de regresión lineal entre el C-BM y el pH como indicador de la acidez. En la Figura 2 se muestra la relación que existe entre estas dos variables. Se encontró una relación significativa explicada según la siguiente ecuación: $C-BM = 352,9 + 33,7(pH)$; con un valor de R^2 de 0,70 y una probabilidad $p < 0,0001$.

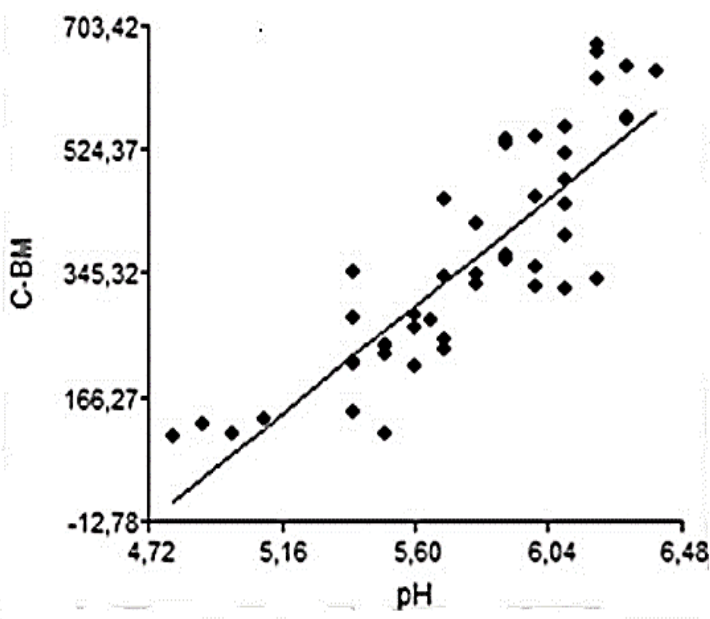


Figura 2. Relación entre el C-BM y el pH para los suelos estudiados a las dos profundidades de muestreo.

Reservas de Carbono Orgánico en el Suelo

Esta variable resulta de la conversión de la concentración (%) del carbono orgánico (CO) del suelo, a unidades de reserva ($t\ ha^{-1}$), a partir de los valores de densidad aparente del suelo (Da) y la profundidad de muestreo, según la fórmula matemática propuesta por la FAO (2017):

$$COS_{(Reservas)} = \%CO \times Prof\ (m) \times Da\ (t/m^3).$$

En el Cuadro 4 se presentan los valores de carbono expresados en reservas ($t\ ha^{-1}$) para los diferentes agroecosistemas cafetaleros evaluados, así como los porcentajes de pérdida de carbono con respecto al sistema de referencia representado por los suelos del Bosque. Hubo diferencias significativas tanto para los tipos de sombra evaluados, como en

la profundidad de muestreo. Los valores más altos se encontraron en los suelos superficiales (0-15 cm) de café-leguminosas ($61\ t\ ha^{-1}$), los cuales resultaron de la misma magnitud a los encontrados en los suelos de bosque ($62\ t\ ha^{-1}$), los cuales representan la línea base en este estudio. Cabe señalar que los valores de pérdida de C en la parcela Café-Plátano, se dieron en un lapso de tiempo de 10 años y en la parcela de café-cítricos en 15 años con este tipo de Uso de la Tierra, tomando en cuenta que antes de este tiempo, ambos sistemas eran parcelas bajo vegetación boscosa.

Los valores de reservas de C en el suelo encontrados en este estudio resultaron ser más bajos a los reportados por Fassbender

(1993) en agroecosistemas de *Café-Inga edulis* en Turrialba Costa Rica (104 t ha^{-1}); de igual manera fueron más bajos a los reportados por Alvarado *et al.* (2013), en sistemas de café bajo árboles sombra en Guatemala (92 t ha^{-1}).

A nivel mundial se viene utilizando el carbono acumulado hasta los 30 cm de profundidad como un indicador de las

reservas de carbono en el suelo, con fines comparativos de diferentes ecosistemas y tipos de uso de la tierra (FAO-ITPS, 2020). De esta manera, cuando se considera la profundidad del suelo de 0-30 cm como una sola capa (Figura 3), vemos como las reservas de COS en el agroecosistema café-leguminosas son de 83 t ha^{-1} , y del mismo tenor que las encontradas en el bosque (83 t ha^{-1}) ($p > 0,05$).

Cuadro 4. Valores de Carbono Orgánico del Suelo y porcentaje de pérdida de Carbono para los suelos colectados en los diferentes sistemas de manejo de la sombra evaluados, a las dos profundidades de estudio.

Tipo de Manejo	COS (t ha^{-1})	Perdida de Reservas del COS (%)	Tiempo bajo este uso *
Bosque (0-15 cm)	62 a ‡		
Bosque (15-30 cm)	28 b		
Café-Guamo (0-15 cm)	61 a	—	
Café-Guamo (15-30 cm)	22 c	19,8	50 años
Café-Plátano (0-15 cm)	33 b	49,5	10 años
Café-Plátano (15-30 cm)	17 d	39,6	
Café-Cítrico (0-15 cm)	23 c	62,9	
Café-Cítrico (15-30 cm)	16 d	41,8	15 años

‡ Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Para el caso de las reservas de C en la parcela café-musáceas fueron de $49,6 \text{ t ha}^{-1}$, y en café-cítricos de $39,5 \text{ t ha}^{-1}$, siendo

diferentes entre sí, y de igual manera más bajas estadísticamente ($p < 0,05$), a las de los suelos de bosque y café-leguminosas.

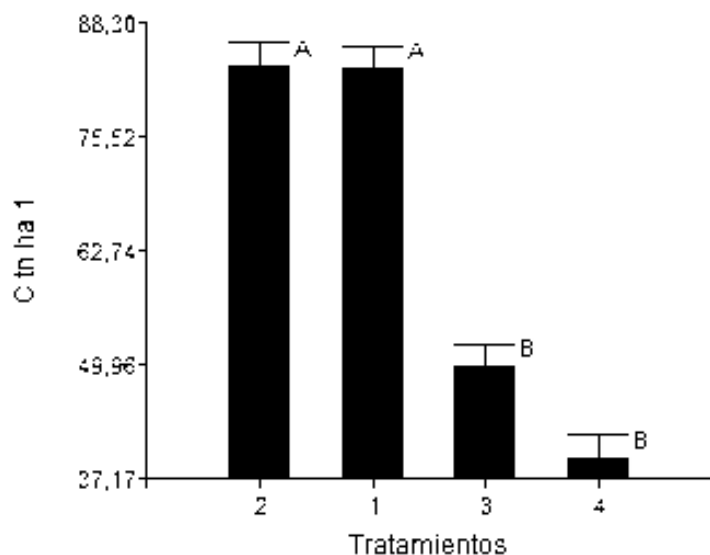


Figura 14. Reservas de Carbono Orgánico (CO) para los suelos de cafetales bajo distinto tipo de sombra a 30 cm de profundidad. Tratamientos: 1= Bosque; 2= Café-Leguminosas; 3 = Café-Musáceas; 4= Café-Cítricos.

Estimación de la Eficiencia en la Captura de Carbono en los Cafetales Bajo Sombra Evaluados

La eficiencia en la captura de carbono (CC) en los suelos de los cafetales evaluados, estimada en este trabajo estaría relacionada básicamente a dos parámetros, la tasa de emisión de CO₂ del suelo, y la cantidad de carbono almacenado en los primeros 30 centímetros de suelo; valores con respecto a los del C capturado y CO₂ emitido por los suelos del bosque, usados como sistema de referencia. Estos resultados se muestran en el Cuadro 5.

Los valores de reserva del CO encontrados en los suelos de café bajo sombra de árboles de la familia leguminosa resultaron ser del mismo orden que los de la parcela bajo vegetación boscosa en promedio de 83 t ha⁻¹, es decir, que tienen un 100% de eficiencia de CC. Para los suelos de café bajo sombra de musáceas se reportó un porcentaje de eficiencia de CC de aproximadamente un 60%; y para el caso de los suelos de café con sombra parcial de cítricos, el carbono capturado en el suelo a 30 cm de profundidad fue de 39,50 t ha⁻¹ de C, lo que representa un 47,5% de eficiencia en la CC con respecto a la línea base representada por los suelos del bosque.

Cuadro 5. Valores de reservas de Carbono Orgánico del Suelo y porcentaje de eficiencia en la captura de carbono (CC); y tasa de emisión de CO₂ y % de eficiencia de la emisión de CO₂ para los suelos colectados en los diferentes sistemas de manejo de la sombra evaluados, a 30 cm de profundidad.

Tipo de Manejo	COS (t ha ⁻¹)	% Eficiencia en la CC	Tasa de Emisión de CO ₂ mg C-CO ₂ kg suelo día ⁻¹	% Eficiencia en emisión de CO ₂
Bosque (0-30 cm)	83,1	–	32,67	–
Café-Guamo (0-30 cm)	83,4	100	50,86	55,60
Café-Plátano (0-30 cm)	49,6	59,68	63,70	94,90
Café-Cítrico (0-30 cm)	39,50	47,53	82,42	152,00

Con respecto a la eficiencia en la emisión de CO₂ a la atmosfera, se esperaría que mientras menos CO₂ se emita del suelo, el sistema sería más eficiente. En tal sentido, los suelos que fueron más eficientes serían los de café-leguminosa, con una tasa de emisión del 55,6% mayor que los suelos de bosque, seguidos de los suelos de café-musáceas, con 94,9% más de emisión, y los suelos de café-cítrico con una tasa de emisión de CO₂ a la atmosfera de casi tres veces mayor a los suelos del bosque (152% mayor).

CONCLUSIONES

El sistema de cafetal bajo sombra de árboles de la familia leguminosas fue el sistema con los valores más altos de reservas de carbono en los suelos, los cuales resultaron de la misma magnitud a los encontrados en los

suelos de bosque, que representan la línea base en este estudio.

Los valores más bajos de CO en los suelos superficiales se encontraron en el sistema café-cítricos, representando pérdidas mayores al 60% de las reservas del COS en apenas 15 años bajo este tipo de uso.

Con respecto a la tasa de emisión de CO₂, el sistema más eficiente en relación a este parámetro (el que produce menos salida de CO₂ como gas de efecto invernadero) es el agroecosistema café-leguminosas con una tasa de 56% más CO₂ emitido, en comparación a los suelos del bosque, seguido del sistema café-musáceas con un 95% más de CO₂ emitido; y el menos eficiente sería el sistema de café bajo sombra parcial de cítricos, con una tasa de emisión de CO₂ casi tres veces mayor a los suelos de referencia (Bosque).

Las variables que más influyen en la menor acumulación de reservas de carbono en el suelo de café-musáceas y café-cítricos estarían asociadas a la menor producción de materia orgánica (menor tasa de producción de hojarasca), a la calidad de los residuos incorporados al suelo, y a la mayor acidez encontrada en estos sistemas.

Los valores obtenidos en este estudio pueden ser utilizados como valores referenciales para la estimación del carbono almacenado en el suelo de sistemas cafetaleros en Venezuela, ya que los sistemas evaluados en la sierra falconiana podrían ser catalogados como sistemas cafetaleros tradicionales en el país.

BIBLIOGRAFÍA

- Alef, K. 1995. Soil respiration. In: Alef, K., y P. Nannipieri. (Eds). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press, Harcourt Brace & Company Publishers. London, England. pp. 214-217.
- Alvarado, J.; Andrade, H.; y Segura, M. 2013. Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*. 16(1):21-31. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a02>
- Alvarez, E.; Monterroso, C.; y Fernández M. 2000. Fraccionamiento de aluminio en suelos de Galicia bajo distintas especies forestales. *Edafología*. 7(3):185-195.
- Anderson, J.P., and Domsch, K.H. 1978. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil. *Soil Biol. Biochem.* 10:215-221. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8)
- Balota, E.; y Chaves, J. 2011. Microbial activity in Soil cultivated with different summer legumes in Coffee Crop. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 54(1):35-44. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132011000100005>
- Bastida, F.; Zsolnay, A.; Hernández, T.; y García, C. 2008. Past, Present and Future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma*. 147:159-171. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>
- Bates, R. 1973. Determination of pH: Theory and Practice. 2nd Edition. John Wiley (Eds), New York. 145 p.
- Blake, G.; y Hartge, K. 1986. Bulk Density. p. 363-375. In: A. Klute (ed). *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph no. 9* (2nd ed) ASA and SSSA, Madison, WI. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>
- Bouyoucos, G. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agronomy Journal*. 54: 464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Burbano-Orjuela, H. 2018. El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Rev. Cienc. Agr.* 35(1): 82-96. <https://dx.doi.org/10.22267/rcia.183501.85>.
- Bremner, J.M. 1996. Nitrogen total. In Sparks, D.L., A.L., Page, P.A., Helmke, and R.H. Loeppert (Eds). *Methods of soil analysis, Part 3, Chemical methods*. SSSA, American Society of Agronomy, Madison, WI. 1149-1176. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c37>
- Cardona, D.; y Sadeghian, S. 2005a. Aportes de material orgánico y nutrientes en cafetales al sol y bajo sombrero de guamo. *Cenicafé*. 334:58-69.

Cardona, D., y Sadeghian, S. 2005b. Beneficios del sombrío de Guamo en suelos cafeteros. *Cenicafé*. 335:1-8.

Duicela, L. 2011. Manejo sostenible de fincas cafetaleras: Buenas prácticas en la producción de café arábico y gestión de la calidad en las organizaciones de productores. Porto Viejo, Ecuador, Imprenta CGRAF, Manta. COFENAC (Consejo Cafetalero Nacional). 309 p.

Durango, W.; Uribe, L.; Henríquez, C.; y Mata, R. 2015. Respiración, biomasa microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque en Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 39(1):37-46. <https://doi.org/10.15517/rac.v39i1.19543>

FAO-ITPS. 2020. Global Soil Organic Carbon Map (GSOC map) - Technical Report. Rome. 162 pp. <https://doi.org/10.4060/ca7597en>

FAO. 2017. Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, Italia. 90 p.

Fassbender, H. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. 2a. Ed. CATIE, Turrialba. 491 p.

Hernández, E.; Campos, G.; Enríquez, J.; Rodríguez, G.; y Velazco, V. 2012. Captura de Carbono por Inga jinicuil Schltdl en un Sistema Agroforestal de Café Bajo Sombra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 3 (9): 11-21. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i9.536>

Imbach, P.; Fung, E.; Hannah, L.; Navarro-Racines, C.; Roubik, D.; Ricketts, T.; and Locatelli, B. 2017. Coupling of pollination services and coffee suitability under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(39), 10438-10442. <https://doi.org/10.1073/pnas.1617940114>

INFOSTAT. 2002. InfoStat, versión 1.1. Manual del Usuario. Argentina: Grupo InfoStat, Universidad Nacional de Córdoba.

IPCC 2014. Summary for Policymakers. En: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O. y col (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 32 p.

IPCC. 2013. Cambio climático 2013 - Bases físicas. Disponible en: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf

Isaza, C.; y Cornejo, J. 2014. Cambio Climático y su Impacto en el Cultivo del Café. *Solidaridad Networks Ediciones*. 39 p.

Mariño, Y. 2014. Respuesta fotosintética de *Coffea arabica* L. a diferentes niveles de luz y disponibilidad hídrica. *Acta Agronómica*. 63(2):128-135. <https://doi.org/10.15446/acag.v63n2.38454>

McLean, E.O. 1982. Aluminun. In: Black, C.A. (Ed). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. Pp: 978-998. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

Mendoza-Dávila, K.; Sanabria-Quispe, S.; Pérez-Porras, W.; y Cosme-De La Cruz, R. 2021. Enmiendas orgánicas y su efecto en las propiedades de suelos alto andinos cultivados con papa nativa (*Solanum goniocalyx* Juz. et Buk.). *Agroindustrial Science*. 11(2):221-229. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2021.02.12>

Mogollón, J.P.; y Martínez, A. 2009. Variación de la actividad biológica del suelo en un transecto altitudinal de la Sierra de San Luis, estado Falcón. *Agronomía Tropical*. 59(4):469-479.

Mogollón, J.P. 2008. Efecto del cambio de uso de la tierra en agroecosistemas cafetaleros de la Hoya de Curimagua, estado Falcón, Venezuela. En: Física y Conservación de Suelos para la Planificación de Cuencas Hidrográficas. Compendio de los trabajos presentados en la VIII Escuela Latinoamericana de Física de Suelos, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México. Lobo, D., Gabriels, D., Oropeza, J.L., Ríos, J.D. (Eds).

Mogollón, J. P.; García-Miragaya, J.; Sánchez, L.; Chacón, N.; y Araujo, J. 1997. Nitrógeno potencialmente disponible en suelos de cafetales bajo diferentes árboles de sombra. *Agronomía Trop.* 47:87-102.

Nygren, P.; Fernández, M.; Harmand, J.M.; y Leblanc, H. 2012. Symbiotic dinitrogen fixation by trees: an underestimated resource in agroforestry systems? *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 94(2-3):123-160. <https://doi.org/10.1007/s10705-012-9542-9>

Paolini, J 2017. Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Terra Latinoamericana.* 36 (1):13-22. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.257>

Pardo, Y.; Paolini, J.; y Cantero, M. 2019. Biomasa microbiana y respiración basal del suelo bajo sistemas agroforestales con cultivos de café. *Revista UDCA, Actualidad y Divulgación Científica.* 22(1):1-8. <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1144>

Pardo, Y. 2017. Fluctuación temporal y efecto de las variedades de café sobre las propiedades bioquímicas y microbiológicas como indicadores de calidad del suelo en sistema agroforestales. Tesis de Grado presentada para optar al Título de Dr en Ciencia del Suelo. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 203 p.

Pérez, D.; y López, A. 2004. Caracterización biofísica y de suelos de los sistemas agroforestales de café en los municipios de Jinotega y Asturias. Trabajo de Diploma para optar al título de Ingeniero Agrónomo de la Universidad de la Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua. 60 p.

Reyes, A.; Cairo, P.; Machado, J.; Fundora, O.; Ríos C.; Manes, A.; Almaguer, J.; Quesada, J.; y Rodríguez, Y. 2007. Efecto de los diferentes sistemas agroforestales sobre los indicadores de la acidez de un suelo ferralítico rojo amarillento lixiviado de la localidad de Topes de Collantes. *Centro Agrícola,* 34(3): 11-16.

Sadeghian, S. 2016. La acidez del suelo, un limitante común para la producción de café. *Cenicafé.* 466:1-12.

Sadeghian, S. 2011. Respuesta de cafetales al sol y bajo semisombra a nitrógeno y su relación con la materia orgánica del suelo. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín, Colombia.* 64(1):5781-5791.

Sadeghian, S.; García, J.; y Montoya, E. 2006. Respuesta del cafeto a la fertilización con N, P, K y Mg en dos fincas del Departamento del Quindío. *Cenicafé.* 57(1):58-69.

Schroth, G; Lehmann, J; Rodrigues, M.; Barros, E; y Macedo, J. 2001. Plant-soil interactions in multistrata agroforestry in the humid tropics. *Agroforestry Systems.* 53: 85-102. <https://doi.org/10.1023/A:1013360000633>

Singer, M.; y Munns, D. 2006. Soils, an introduction. 6th Edition. Pearson-Prentice Hall (Upper Saddle River, New Jersey). p.158-168. Solórzano, N.; y Querales, D. 2010. Crecimiento y desarrollo del café (*Coffea arabica*) bajo la sombra de cinco especies arbóreas. *Revista Forestal Latinoamericana.* 25(1):61-80.

Sosa-Rodríguez, B.; y García-Vivas, Y. 2019. Emisión de gases de efecto invernadero en el suelo bajo el uso de abonos verdes. *Agronomía Mesoamericana.* 30(3):767-782. <https://doi.org/10.15517/am.v30i3.36103>

Vázquez-Luna, D.; Cuevas-Díaz M.; Perera-Escamilla, T.; Hernández-Romero, A.; Retureta-Aponte, A. 2018. Secuestro de carbono en suelo cafetalero con alta pendiente en la Sierra de Santa Marta. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*. 6(1):113-120.

Vásquez, J.; Macías, F.; y Menjivar, J. 2013. Respiración del suelo según su uso y su relación con algunas formas de carbono en el Departamento del Magdalena, Colombia. *Bioagro*. 25(3):175-180.

Viguera, B., Martínez-Rodríguez, M. R., Donatti, C., Harvey, C.A. y Alpízar, F. 2017. El clima, el cambio climático, la vulnerabilidad y acciones contra el cambio climático: Conceptos básicos. *Materiales de fortalecimiento de capacidades técnicas del proyecto CASCADA (Conservación Internacional-CATIE)*. 44 p.

Villareyna. R.; Avelino, J.; y Cerda, R. 2020. Adaptación basada en ecosistemas: efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en cafetales. *Agronomía Mesoamericana*. 31(2):499-516. <https://doi.org/10.15517/am.v31i2.37591>

Villareyna. R. 2016. Efecto de los árboles de sombra sobre el suelo, en sistemas agroforestales con café, incluyendo la fenología y fisiología de los cafetos. *Informe Proyecto Cascada. CATIE. Costa Rica*, 38 p.

Walkley, A., and Black I.A. 1934. An examination of the method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>

Wintgens, J. 2004. *Coffee: Growing, Processing, Sustainable production*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH. 976 p.