

Evaluación de carbono almacenado en el suelo en sistemas agroforestales con *Coffea arabica* en tres municipios de Nariño, Colombia

Assessment belowground carbon stored in the soil in agroforestry systems *Coffea arabica* in three municipalities of Nariño, Colombia

Natalia Benavides Franco¹

1. Trabajo para optar el título de Ingeniería Agroforestal, Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. nataliabnavides3@hotmail.com

RESUMEN

El cambio climático es un problema ambiental al que debe hacer frente la sociedad, sin bien, hay alternativas para mitigar dicho fenómeno y en ese contexto, el suelo y los sistemas agroforestales presentan un papel importante. Por tal razón se realizó este estudio en los municipios de Sandoná, San Pablo y Buesaco del Departamento de Nariño, con el objetivo de evaluar el carbono almacenado en el suelo en cuatro sistemas productivos cafeteros: T1: monocultivo, T2: sistemas agroforestales (SAF) con plátano, T3: SAF con plátano y frutales y T4: SAF con plátano, frutales y leguminosas; en un diseño de boques al azar, con parcelas de muestreo de 1000 m², se tomó 10 submuestras a 30 cm de profundidad. No se obtuvo diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) por localidad; sin embargo, se destaca el T4 en las localidades de Sandoná y San Pablo con una mayor acumulación de carbono almacenado en el suelo con 87,7 y 86,96 t C ha⁻¹ respectivamente; mientras que en Buesaco la mayor acumulación de carbono se presentó en T3 con 86,83t C ha⁻¹. Cabe recalcar que se refleja la necesidad de realizar más estudios con la finalidad de conocer más opciones y mecanismos para optimizar el almacenamiento de carbono y con ello ratificar el potencial de los sistemas como proveedores de servicios ecosistémicos, teniendo en cuenta que los sistemas agroforestales presentan una potencialidad mayor para la captura de carbono en el suelo.

Palabras clave: agroecosistemas cafeteros, cambio climático, carbono, suelo.

ABSTRACT

Climate change is an environmental problem that society must face, without good, there are alternatives to mitigate this phenomenon and in this context, soil and agroforestry systems have an important role. For this reason this study was carried out in the municipalities of Sandoná, San Pablo and Buesaco of the Department of Nariño, with the objective of evaluating the carbon stored in the soil in four coffee production systems: T1: monoculture, T2: agroforestry systems (SAF) with banana, T3: SAF with banana and fruit trees and T4: SAF with banana, fruit trees and legumes; In a randomized bole design, with sampling plots of 1000 m², 10 subsamples were taken at 30 cm depth. No significant statistical differences were obtained ($p < 0.05$) by location; however, T4 stands out in the localities of Sandoná and San Pablo with a greater accumulation of carbon stored in the ground with 87.7 and 86.96 t C ha⁻¹ respectively; while in Buesaco the highest accumulation of carbon occurred in T3 with 86.83t C ha⁻¹. It should be noted that the need to conduct more studies in order to know more options and mechanisms to optimize carbon storage is reflected, and thus ratify the potential of systems as providers of ecosystem services, bearing in mind that agroforestry systems present a greater potential for the capture of carbon in the soil

Key words: coffee agroecosystems, climate change, allometric equations, tree diversity.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático inducido por las actividades antropogénicas es un problema mundial que afecta de forma negativa los procesos ecológicos, económicos y sociales; generado principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero como el metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y dióxido de carbono (CO₂); los cuales provocan el incremento de su concentración en la atmósfera, provocando el incremento de la temperatura media del planeta (Ibrahim *et al.*, 2007). Siendo el dióxido de carbono (CO₂) el gas que más contribuye al calentamiento global (Ortiz *et al.*, 2008).

En América Latina se ha avanzado en la investigación de diferentes conocimientos, técnicas y saberes que pueden contribuir a la solución de dicha problemática; entre ellos se destacan los sistemas agroforestales, reconocidos por la incorporación de diferentes niveles de biodiversidad, proporcionando variedad de servicios ecológicos, tales como el almacenamiento de carbono en el suelo, favoreciendo a la mitigación al cambio climático (Beer *et al.*, 2003; Benavides, 2013).

En Colombia, la variabilidad climática genera un impacto socioeconómico, debido a que la agricultura depende del régimen de lluvias y la temporada de verano; este desequilibrio en los tiempos climáticos ha ocasionado la proliferación de plagas, cambios en los ciclos vegetativos de los cultivos, disminución del rendimiento de cultivos y amenaza a la seguridad alimentaria, entre otros (IDEAM, 2009).

Lo cual, ha suscitado la búsqueda de alternativas dentro de las cuales se contempla la adopción de prácticas agrícolas que permiten la acumulación adicional el carbono en el suelo (contiene casi tres veces y medio más carbono que la atmósfera) y el océano (Hernández *et al.*, 2002; FAO, 2002).

La agroforestería se convierte en una estrategia importante para el almacenamiento y captura de Carbono, la biodiversidad de especies arbóreas con potencial para ser asociadas en diferentes diseños agroforestales, son estímulo a la acumulación adicional de carbono en el suelo que es determinante para la existencia y descomposición de la materia orgánica, como fuente primaria del almacenamiento de carbono así contribuye de manera singular a este proceso de captura de C (Farfán, 2012).

Por otra parte, a pesar de la cantidad de investigaciones sobre este tema, aún falta conocer mejor el potencial de los sistemas agroforestales respecto a la captura de carbono en el suelo. Por lo anterior esta investigación se centra en evaluar la cantidad de carbono almacenado en el suelo de tres fincas con sistemas agroforestales cafeteros, en los municipios de Sandoná, San Pablo y Buesaco del departamento de Nariño, como alternativa para mitigar el cambio climático generado por uno de los GEI como lo es el CO₂.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se llevó a cabo en un total de 12 agroecosistemas con cafetales de aproximadamente 20 años de edad, distribuidos en tres municipios del departamento de Nariño, los cuales fueron seleccionados con base a sus rasgos característicos de productividad, rendimiento y representatividad del sistema productivo en la región, como se presenta a continuación en el Figura 1 y la Tabla 1:

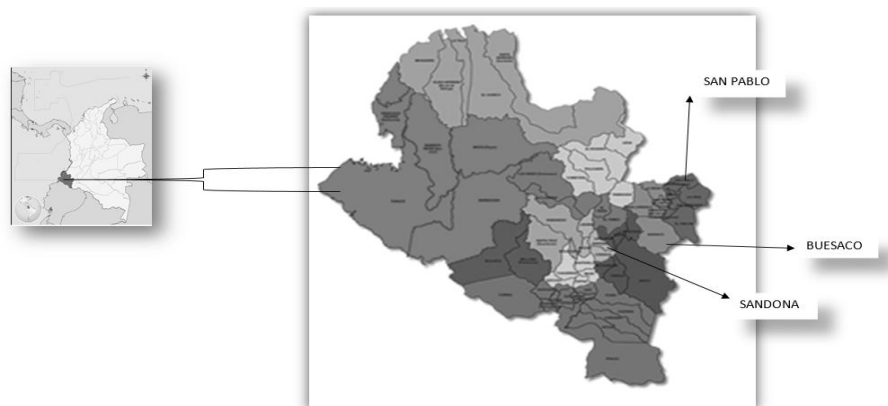


Figura 1. Mapa de las zonas cafeteras estudiadas en el departamento de Nariño.

Tabla 1. Localización de municipios para evaluar el almacenamiento de carbono en el suelo de diferentes sistemas productivos de café.

Municipio	Coordenadas	Altitud (msnm)	Temperatura Promedio (°C)	Tipo de suelo
Buesaco	N: 1°23'05" W: 77°09'23"	1692	18	Arcilloso
San Pablo	N: 1°36'06" W: 77°00'15"	1700	20	Limoso
Sandoná	N: 1°17'05" W: 77°28'16"	1817	18.1	Limoso

Para la selección de fincas se buscó sistemas agroforestales cafeteros establecidos a priori con base en la composición botánica del dosel de sombra y la referencia López *et al.* (2003), Somarriba *et al.* (2013) y Pinoargote *et al.* (2017); quienes determinan cuatro tipos de cafetales: C1 (cultivo a pleno sol), C2 (cultivo, musáceas y árboles multipropósito), C3 (cultivo, árboles multipropósito y maderables) y C4 (cultivo, árboles multipropósito, maderables, frutales y musáceas). Se realizó visitas de campo por finca, se evaluó la densidad del cafetal, diversidad de especies de plantas, mediante mediciones dasométricas (altura, diámetro a la altura del pecho - DAP), área basal (a una altura de 1.30m) por tipo de leñosa perenne multipropósito (frutal, forraje, leña, maderable, ornamental y musácea), porcentaje de sombra (método visual) y análisis de suelos (análisis físico químico del suelo).

Diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques al azar con cuatro tratamientos (cuatro sistemas de producción de café) y tres repeticiones (los tres municipios) como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Tratamientos para evaluar el almacenamiento de carbono en el suelo de diferentes sistemas productivos de café en tres municipios del departamento de Nariño.

Municipios	Tratamientos
B1: Buesaco	T1: cafetal a pleno sol
	T2: cafetal y musáceas
	T3: cafetal y árboles multipropósito
	T4: cafetal, musáceas y árboles multipropósito
B2: Sandoná	T1: cafetal a pleno sol
	T2: cafetal y musáceas
	T3: cafetal y árboles multipropósito
	T4: cafetal, musáceas y árboles multipropósito
B3: San Pablo	T1: cafetal a pleno sol
	T2: cafetal y musáceas
	T3: cafetal y árboles multipropósito
	T4: cafetal, musáceas y árboles multipropósito

Se tomó como unidad experimental una parcela de 10000 m² (100 x 100m) según la metodología propuesta por Aguilar y Guharay (2009). Para el muestreo de suelo, en cada tratamiento se realizó la recolección de 10 submuestras aleatoriamente, a 30 cm de profundidad, las cuales fueron homogenizadas para sacar una muestra de 1 kg, que era respectivamente etiquetada y llevada a los laboratorios especializados de la universidad de Nariño para evaluar el contenido de carbono por unidad de volumen de suelo mediante el método de combustión (MacDicken, 1997); para lo cual es necesario conocer la densidad aparente del suelo, que se realizó utilizando el método del “cilindro de volumen conocido” (Forsythe, 1975).

Análisis estadístico

Se realizó análisis de varianza y comparación de medias de Tukey para observar diferencias estadísticas entre los tratamientos y zonas cafeteras. Mediante a Análisis de Componentes Principales (ACP) se obtuvo las correlaciones entre caracteres de la población (Bautista y Ramos, 1988); mediante el software estadístico Spad 3.5.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización agroforestal de los sistemas productivos. Se inventarió un total de 359 individuos de 37 especies correspondientes a 25 familias; identificando un promedio de cuatro especies por cafetal que se clasificaron por uso así: 58% frutales, 13% forrajeras, 13% ornamentales, 13% maderables y 1% dendroenergéticos (leña) (Tabla 3).

Tabla 3. Caracterización de especies en fincas cafeteras de tres municipios del departamento de Nariño.

Nombre científico	Nombre común	Uso
<i>Annona cherimola</i> Miller	Chirimoya	Frutal
<i>Bixa orellana</i> L.	Achote	Frutal
<i>Carica papaya</i> L	Papaya	Frutal
<i>Citrus latifolia</i> Tanaka ex Q. Jiménez	Lima	Frutal
<i>Citrus limon</i> (L.) Osbeck	Limón	Frutal
<i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck	Naranja	Frutal
<i>Coffea arabica</i> L	Café	Frutal

<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken	Nogal cafetero	Maderable
<i>Cyphomandra betacea</i> (Cav.) Sendtn.	Tomate de árbol	Frutal
<i>Eugenia jambos</i> L	Pomaroso	Maderable
<i>Euphorbia cotinifolia</i> L	Pillo, liberal	Ornamental
<i>Fraxinus chinensis</i> Roxb	Urapan	Maderable
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Chicharro	Ornamental
<i>Heliocarpus americanus</i> L	Pillo	Maderable
<i>Inga edulis</i> Mart.	Guamo	Frutal
<i>Lafoensia acuminata</i> (Ruiz & Pav.) DC.	Guayacan	Maderable
<i>Mangifera indica</i> L	Mango	Frutal
<i>Manilkara huberi</i> (Ducke) Standl	Nispero	Frutal
<i>Matisia cordata</i> Bonpl.	Zapote	Frutal
<i>Musa × paradisiaca</i> L	Plátano	Frutal
<i>Myrcianthes rhopaloides</i> (K Mc V.)	Arrayan	Maderable
<i>Myrciaria dubia</i> (Kunth) McVaugh	Guayabo	Ornamental
<i>Myrsine</i> sp	Mote	Leña
<i>Palicourea amethystina</i> (Ruiz & Pav.) DC.	Cajeto	Ornamental
<i>Persea americana</i> Mill. Var Hass	Aguacate	Frutal
<i>Pinus patula</i> Schltl. & Cham.	Pino	Maderable
<i>Pouteria lucuma</i> (Ruiz & Pav.) Kuntze	Maco	Ornamental
<i>Psidium guajava</i> L	Guayaba	Frutal
<i>Saurauia parviflora</i> Triana & Planch.	Moquillo	Ornamental
<i>Senna pistaciifolia</i> (Kunth) H.S. Irwin & Barneby	Pichuelo	Ornamental
<i>Senna spectabilis</i> (DC.) H.S. Irwin & Barneby	Vainillo	Ornamental
<i>Solanum ovalifolium</i> Dunal	Cujaco	Ornamental
<i>Tabebuia chrysantha</i> (Jacq.) G. Nicholson	Guayacan	Maderable
<i>Trichanthera gigantea</i> (Bonpl.) Nees	Nacedero	Forraje
<i>Vasconcellea cundinamarcensis</i>	Chilacuan	Frutal
<i>Verbesina arborea</i> Kunth	Colla blanca	Forraje
<i>Viburnum pichinchense</i> Benth.	Pelotillo	Ornamental

Se encontró mayor densidad de especies arbóreas/arbustivas en el tratamiento 4 con un total de 108 individuos/ha; este tipo de asociaciones permite optimizar el uso de la tierra mediante las diversas interacciones que ocurren entre componentes arbóreos y el café, diversificando las opciones de ingresos y los servicios ambientales producidos (Muschler, 2001; Leal y Navas, 2000; Altieri y Nicholls, 2000).

Carbono total almacenado en el suelo. Al analizar la variable carbono almacenado en el suelo no se encontró diferencias significativas en los tratamientos ($p < 0,05$) para cada municipio. Sin embargo, se destaca el tratamiento T4 en Sandoná y San Pablo con una mayor acumulación de carbono en el suelo (87,7 t C ha⁻¹ y 86,96 t C ha⁻¹, respectivamente);

en Buesaco la mayor acumulación de carbono se presentó en el tratamiento 3 (86,83 t C ha⁻¹), como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Carbono total almacenado en el suelo de diferentes sistemas productivos de café en tres municipios del departamento de Nariño.

Localidad	Tratamiento	Carbono total (t C ha ⁻¹)	N (kg·ha ⁻¹)	MO (%)
Sandoná (B1)	1	76,14 ^a	0,19	4,86 ^a
	2	62,21 ^a	0,15	3,84 ^a
	3	69,09 ^a	0,16	4,23 ^a
	4	87,70 ^a	0,21	5,36 ^a
San Pablo (B2)	1	60,27 ^a	0,14	3,54 ^a
	2	74,493 ^a	0,19	4,82 ^a
	3	49,77 ^a	0,1	2,72 ^a
	4	86,96 ^a	0,19	4,96 ^a
Buesaco (B3)	1	38,55 ^a	0,08	2,16 ^a
	2	77,98 ^a	0,18	4,62 ^a
	3	86,83 ^a	0,18	4,61 ^a
	4	66,63 ^a	0,15	3,94 ^a

T1: Café libre; T2: Café Plátano; T3: Café, plátano, frutales; T4: Café, plátano, frutales, leguminosas.
Medias con letras diferentes dentro de la misma columna difieren entre sí, según la prueba de Tukey ($\leq 0,05$).

De acuerdo con Hagggar *et al.* (2013), las tasas de almacenamiento de carbono dependen de factores agroclimáticos como densidad de plantas, fertilidad, tipo de suelo, características del sitio, la edad y manejo silvicultural al que se vea sometido el sistema productivo.

El valor promedio de almacenamiento de carbono en el suelo encontrado en este estudio (69,72t C ha⁻¹), es muy similar a los resultados adquiridos por Ortiz *et al.* (2008) que reportan que los cacaotales asociados con árboles de laurel almacenan entre 43 y 62 t.C ha⁻¹ en 25 años, Estos resultados nos indican que la captura de carbono, está relacionada a la edad de la plantación a la diversidad de las especies propias de cada sistema, condiciones edafoclimáticas, diversidad de especies entre otras.

Alvarado *et al.* (2013), al estimar el almacenamiento de carbono orgánico de suelos en los sistemas de producción de café bajo sistemas agroforestales (SAF con nogal cafetero, SAF

con plátano y monocultivo) se encontró mayor almacenamiento de carbono (entre 33.6 y 72.3 t C·ha⁻¹); resultados similares a los encontrados en la presente investigación (entre 38,55 y 87,70 t C ha⁻¹). De igual manera, en su investigación Alvarado *et al.* (2013), encontraron que el carbono orgánico almacenado en los primeros 30 cm de suelo no presentó diferencias estadísticas entre sistemas de producción de café.

En profundidades 0-30 cm del suelo Ávila *et al.* (2001) en SAF de café con *Eucalyptus deglupta* y *Erythrina poeppigiana* a diferentes edades, reportan carbono almacenado en el suelo de 66,2 y 87,3 t C ha⁻¹ respectivamente. Por su parte, Connolly y Corea (2007), en SAF con café en Nicaragua, reportaron 142.8 t C·ha⁻¹. La diferencia entre valores de almacenamiento puede estar asociada a diversas condiciones edafoclimáticas (Poveda *et al.*, 2013), encontraron acumulación en suelos entre 3,9 t C·ha⁻¹ y 90,0 t C ha⁻¹, notándose un amplio rango de almacenamiento.

En esta investigación los valores de carbono son similares a los reportados por Carvajal *et al.* (2009) entre 37 t C ha⁻¹ - 43 t C·ha⁻¹ en los primeros 30 cm del suelo en paisajes andinos colombianos. Corral *et al.*, (2006) en dos zonas agroecológicas del litoral ecuatoriano reportan 66,9 t C ha⁻¹; 72,0 t C ha⁻¹ y 78,8 t C·ha⁻¹ en SAF con café y pachaco (*Schizolobium parahybum*), café y guadua (*Guadua spp*), y café y nogal cafetero (*Cordia alliodora*) respectivamente. Andrade *et al.* (2008) en Talamanca, Costa Rica, estimaron en 48,8 t C ha⁻¹ y 61,7 t C·ha⁻¹ el COS almacenado en SAF con banano (*Musa paradisiaca*) y cacao (*Theobroma cacao*), respectivamente, lo cuales son similares a los encontrados en esta investigación.

Por otra parte, al no encontrarse diferencias significativas en las variables evaluadas en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo de cafetales (p<0,05) de los diferentes tratamientos estudiados en esta investigación, contrasta notablemente con lo reportado por Hergoualc'h *et al.* (2012) en Costa Rica a 1180 msnm, quienes al evaluar el almacenamiento de carbono en los 10 cm superiores del suelo en cafetales de siete años, reportan un mayor acumulación en SAF con *Inga densiflora* (25,2 t C ha⁻¹) en comparación con cafetales bajo monocultivo (9,8 t C ha⁻¹). Los resultados contrastantes pueden asociarse

a la profundidad de toma de muestras, debido a que en el presente estudio se realizó a 30 cm en los cuales la materia orgánica proveniente de los árboles como hojarasca no está tan concentrada como a los 10 cm de profundidad, ya que el C del suelo se encuentra en su mayoría almacenado en en la capa superficial con tendencia a disminuir hacia las capas inferiores (Carvajal *et al.*, 2009).

Sin embargo, es evidente que los reportes de almacenamiento de carbono en este estudio realizado a altitudes de 1692, 1817 y 1700 msnm, fueron notablemente superiores tanto para monocultivo como SAF en comparación los reportados por Hergoualc'h *et al.* (2012) a 1180 msnm; debido muy posiblemente a diferentes condiciones agroclimáticas de las zonas, ya que de acuerdo con Ruiz y Somarriba (2002), el almacenamiento de carbono depende de variables como el uso del suelo, topografía y condiciones climáticas y Carvajal *et al.* (2009), reportan que los almacenamientos de carbono en el suelo varían con la altura sobre el nivel del mar, encontrando mayores contenidos en zonas altas.

De acuerdo con Alvarado *et al.* (2013); el incremento del carbono orgánico en el suelo (COS) en sistemas agroforestales se debe principalmente a la caída de hojarasca, así como también a la mortalidad y exudación de las raíces finas que depende de la distribución y actividad de mismas. Teniendo en cuenta lo anterior, el alto de contenido de COS registrado en el café bajo monocultivo de este estudio que no difiere significativamente de los SAF puede estar influenciado por la alta densidad de plantas de cafeto en los sistemas productivos, que, con un manejo adecuado mediante podas, incorporación como abono verde y prácticas de conservación de suelo, pueden generar mayor acumulación de carbono en el mismo.

Además, es importante considerar que de acuerdo con Andrade *et al.* (2008), las raíces finas (diámetro < 2 mm) son la principal fuente de acumulación de COS y en el caso de arbustos y herbáceas, se encuentran mayoritariamente en los primeros 30 cm de suelo; Delgado *et al.* (2016) reporta que la mayor cantidad de C en raíces finas está presente en la profundidad de 0-15 cm, disminuyendo progresivamente a medida que se profundiza en el suelo. Al respecto Siles *et al.* (2010) Encontraron que el 75 % de las raíces finas en un

perfil de suelo de 1 m, fue encontrado en los primeros 60 cm y tendencias similares son reportadas al evaluar la dinámica del COS en otros sistemas de producción en el trópico (De Camargo *et al.*, 1999; Fisher *et al.*, 2004; Ibrahim *et al.*, 2007; Maia *et al.*, 2009).

Las muestras de suelo se tomó a 30 cm de profundidad, se podría inferir que la ausencia de diferencias estadísticas entre sistemas productivos, debido a que el café es el mayor componente en los cuatro sistemas de producción evaluados, sus raíces finas se asocian a acumulación de materia orgánica por senescencia y se localizaban dentro del rango en que tomaron las muestras de suelo; observándose una mayor productividad biológica del sistema; como lo mencionan (Alvarado *et al.*, 2013; Rodríguez *et al.*, 2009).

Desafortunadamente no se puede comprar la captura de carbono en el suelo reportada por la mayoría de autores debido a que no tenemos incluida la variable edad y esto nos crea una gran incertidumbre ya que no conocemos los procesos de acumulación de carbono en cada suelo estudiado.

Relación entre carbono acumulado y análisis de suelos. Mediante análisis de las variables cuantitativas se identificó correlaciones directas significativas entre carbono total almacenado (C.T) e índice de Simpson (0,87), así como también entre materia orgánica (MO) y abundancia absoluta de especies (A.A) (0,96) (Tabla 5); variables importantes y estrechamente ligadas a procesos de captura y almacenamiento de carbono.

Tabla 5. Coeficientes de correlación entre variables cuantitativas seleccionadas en el suelo de diferentes sistemas productivos de café en tres municipios del departamento de Nariño.

	MO	D.A.	C.T.	A.A	SHANNON	SIMPSON	No. ARBOLES
MO	1,00						
D.A.	-0,44	1,00					
C.T.	0,06	0,11	1,00				
A.A.	0,96	-0,18	0,09	1,00			
SHANNON	0,61	-0,35	0,31	0,55	1,00		
SIMPSON	0,21	0,26	0,87	0,31	0,19	1,00	
No. ARBOLES	-0,48	0,00	-0,56	-0,52	-0,04	-0,69	1,00

A partir de lo anterior, se puede inferir que a medida que incrementa la diversidad de especies vegetales en el sistema cafetero aumenta el carbono total almacenado en el suelo. Resultados similares son reportados por Wang *et al.* (2011) y Esparza y Martínez (2018), quienes señalan que hay una relación positiva entre los índices de diversidad y los reservorios de carbono. Laban *et al.*, (2018), reconocen que la biodiversidad y el carbono orgánico en los suelos son indispensables para el funcionamiento de los ecosistemas, y determinan en gran medida el papel de la tierra en la producción de alimentos, el almacenamiento de agua, y la mitigación del cambio climático; por lo tanto, son factores clave para liberar los numerosos beneficios económicos y ambientales.

De igual manera, se identificó que la dinámica de la materia orgánica en el suelo claramente se correlaciona con la abundancia de especies vegetales; debido a que la materia orgánica es el producto de la descomposición de plantas (FAO, 2002; por ende, al incrementar el número de especies vegetales por área, mayor es la cantidad del material que podría descomponerse. Ahora bien, de acuerdo con Lok *et al.*, (2013), El contenido de materia orgánica (1.4×10^{12} t C ha⁻¹) del suelo es uno de los factores fundamentales para la fijación y almacenamiento de carbono; y su importancia radica en que el carbono almacenado en el suelo principalmente como parte de la materia orgánica representa más de 1.4×10^{12} t C ha⁻¹, así el doble del que existe en la atmósfera (Post et al. 1982).

Con respecto a este tema, es importante considerar que según Milian (2015), el carbono puede mantenerse secuestrado durante más tiempo en el suelo si se ponen en práctica diversas estrategias que fomenten la formación de materiales recalcitrantes (materia orgánica muy persistente por su estabilidad o resistencia a los procesos de degradación microbianos o fisicoquímicos) y disminuyan la mineralización (descomposición de la materia orgánica en productos inorgánicos sencillos generando CO₂). De esta manera, lo que se obtiene es la ralentización del ciclo del carbono en las etapas que conciernen al suelo; lo cual se puede lograr mediante la incorporación constante de biomasa proveniente de árboles/arboles en el sistema.

La materia orgánica es un indicador clave de la calidad del suelo y de las funciones ambientales, entre ellas la fijación de carbono atmosférico; es decir, la actividad biológica que esta genera tiene gran influencia sobre las propiedades químicas y físicas del suelo (Suárez, 2002). El incremento de materia orgánica del suelo aumenta a través del tiempo en agroecosistemas caafeteros (Beer *et al.*, 2003).

En sistemas de conversión de sistema tradicional de caña de azúcar a un sistema agroforestal de café (*Coffea arabica*) con leñosas perennes de sombra *Erythrina poeppigiana* y *Cordia alliodora*, con un período de transición de diez años, la materia orgánica del suelo aumentó en un 9% y 21% respectivamente. La actividad de microorganismos tiende a aumentar debajo de los árboles, debido a que la materia orgánica es incrementada (un abastecimiento de alimentos mejorado) y al ambiente de crecimiento (temperatura y humedad del suelo) (Altieri, 1999; Beer *et al.*, 1998).

Por otra parte, mediante análisis de componentes principales (ACP) se pudo establecer que el 75,19% de la variabilidad total entre los sistemas productivos evaluados, está representada por tres factores o componentes. El primer factor que representa el 35,19% de la variabilidad, está determinado por variables asociadas a especies arbóreas/arbustivas del sistema como índice de Shannon, altura de especies, abundancia absoluta, índice de Simpson con correlaciones variable factor que van entre 0,57 y 0,77 (Tabla 5); y el segundo y tercer factor (40% de variabilidad) se asocia a carbono total y materia orgánica, con correlaciones variable factor de 0,60 y 0,70 respectivamente (Tabla 5).

Tabla 5. Correlación variable-factor de cada una de las variables sobre los cinco primeros factores o componentes (Variables cuantitativas).

Variable	Correlación variable factor		
	1	2	3
Materia orgánica (MO)	0,39	-0,34	-0,60
Densidad aparente (D.A)	0,11	0,15	0,60
Carbono total (C.T)	0,46	-0,31	-0,70
Abundancia absoluta de especies (A.A)	0,60	0,10	-0,24
Índice de Shannon	0,77	-0,04	-0,21
Índice de Simpson	-0,57	0,33	0,40
Número de árboles	0,67	-0,20	-0,70

De acuerdo con Ávila *et al.* (2001), el uso y manejo del suelo es determinante en el comportamiento del carbono almacenado, lo cual es evidente en la variabilidad encontrada entre los diferentes sistemas productivos (tratamientos) en este estudio, que estuvo asociada principalmente a características como especies presentes, composición botánica, biodiversidad vegetal y cobertura del suelo; mientras que características del suelo tales como contenido de materia orgánica y almacenamiento de carbono a pesar de que representaron influencia sobre la variabilidad, ésta fue baja, por lo cual no se evidenciaron diferencias significativas en los reportes de almacenamiento de carbono presentados anteriormente.

De acuerdo con Jaramillo (2004), de los ecosistemas terrestres, los bosques son los que almacenan la mayor cantidad de carbono, tanto a nivel de la vegetación como de los suelos; debido en gran parte a la abundancia y diversidad de especies. Los sistemas agroforestales al incorporar especies arbóreas/arbustivas dentro de los sistemas productivos, fomentan su diversidad en procura de aproximarse a características de resiliencia reflejadas en los bosques; por ende, variables como índice de Shannon, índice de Simpson y abundancia absoluta de especies, diferencian los tratamientos 2, 3 y 4 asociados a sistemas agroforestales del monocultivo (T1).

Manson *et al.* (2008), reportan que la capacidad de almacenamiento de carbono en fincas cafeteras es directamente proporcional a la cantidad de biomasa leñosa presente, debido a que estos sistemas incorporan un mayor número de árboles, por lo cual tiende a incrementar su capacidad potencial de almacenar carbono (42.4 t C ha^{-1}), seguido por los “cultivos de café asociado con plátano” (16.1 t C ha^{-1}); mientras que el monocultivo tiene una menor capacidad potencial de almacenar carbono (4.5 t C ha^{-1}), debido a que hay un menor número de árboles.

CONCLUSIONES

A pesar de no evidenciar diferencia significativa en el almacenamiento de carbono en el suelo entre tratamientos, se evidenció que el tratamiento T4 presentan mayor diversidad y

abundancia de especies, acumulando en promedio mayor carbono en el suelo en comparación con el monocultivo de café (73,51 t C ha⁻¹ vs 58,32 t C ha⁻¹ respectivamente), dicha diversificación en la cobertura arbórea resulta promisorio para las intenciones de captura y almacenamiento de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

Se identificó correlaciones positivas entre las variables carbono total almacenado en el suelo e índice de Simpson, así como también entre materia orgánica y abundancia absoluta de especies, las cuales se vinculan con componentes importantes dentro de sistemas agroforestales como son especies arbóreas/arbustivas y suelo.

Los suelos de los municipios de Sardoná y San Pablo presentan una mayor capacidad de almacenamiento de carbono, en comparación a los suelos del municipio de Buesaco. Esta situación obedece a la influencia de factores edafoclimáticos que inciden en la acumulación de contenidos muy altos de materia orgánica y por consiguiente de carbono.

Se refleja la necesidad de incluir la variable edad para conocer el potencial de captura de carbono de los ecosistemas con ello definir los sistemas agroforestales como proveedores de servicios ecosistémicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar, A. & Guharay, F. (2009). Cómo realizar un diagnóstico productivo en nuestro cafetal. Managua: CATIE. 23 p. (Serie Cuadernos de Campo).

Andrade, H., Segura, M., Somarriba, E. & Villalobos, M. (2008). Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en la Américas*. 46: 45-50.

Altieri, M. (1999). *Agroecología, bases científicas para una agricultura sustentable*. Montevideo: Editorial Nordan - Comunidad.

Altieri, M. & Nicholls, C. (2000). *Agroecología: Teoría y práctica para una agricultura sustentable*. 1ª ed. México: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe, México D.F. 250 p.

Alvarado, J., Andrade, H. & 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.

Ávila, G., Jiménez, F., Beer, J., Gómez, M. & Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería de las Américas*, 8(30): 32-35.

Bautista, L. & Ramos, J. (1988). Análisis de datos de encuestas y de tabulados. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 85 p.

Batjes, N. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the World. *European Journal of Soil Science*, 47:151-163.

Beer, J., Harvey, C., Ibrahim, M., Harmand, J., Somarriba, E., & Jiménez, F. (2003). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería de las Américas*, 10(37).

Beer, J., Muschler, R., Kass, D. & Somarriba, E. (1998). Shade management in coffee plantations. *Agroforestry Systems* 38: 139-164.

Benavides, A. 2013. Evaluación de los sistemas agroforestales para la elaboración de un plan de manejo y aprovechamiento sustentable de los recursos en el Ceypsa, parroquia Eloy Alfaro, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi". Ecuador: Universidad Técnica de Cotopaxi. 14 p.

Carvajal, A., Feijoo, A., Quintero, H. & Rondón, M. (2009). Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 9(3): 222-235.

Connolly, R. & Corea, C. (2007). Cuantificación de la captura y almacenamiento de carbono en sistema agroforestal y forestal en seis sitios de cuatro municipios de Nicaragua. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria. 72 p.

Corral, R., Duicela, L. & Maza, H. (2006). Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con café arábico y cacao, en dos zonas agroecológicas del litoral ecuatoriano. Trabajo de grado, Universidad Nacional de Loja. 15 p.

De Camargo, P., Trumbore, S., Martinelli, L., Davidson, E., Nepstad, D. & Victoria, L. (1999). Soil carbon dynamics in regrowing forest of Eastern Amazonia. *Global Change Biology*, 5: 693-702.

Delgado V, I., Daza C., J., Luna C, G., Leonel, H. & Forero P, L. (2016). Cuantificación de carbono radical *Morella pubescens* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Wilbur en dos agroecosistemas (Nariño, Colombia). *Colombia Forestal*, 19(2): 85-93

Farfán, V. F. (2012). *Arboles con potencial para ser incorporados en sistemas agroforestales con café*. Chinchiná (Colombia): Cenicafe – Fondo Nacional del Café.

Fisher, M., Rao, I. & Thomas, R. (2004). Implications of land use change to introduced pastures on carbon stocks in the central lowlands of tropical South America. *Environment, Development and Sustainability*, 6: 111-131.

Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. Italia, Roma: FAO. 83p.

Forsythe, W. 1975. *Física de Suelos*. San José: CR, IICA. 212 p.

Haggar, J., Medina, B., Aguilar, R. & Muñoz, C. (2013). Land Use Change on Coffee Farms in Southern Guatemala and its Environmental Consequences. *Environmental Management*, 51 (4): 811–823.

Hergoualc'h, K., Blanchard d, E., Skiba e, U., Hénaultf, C. & Harmanda, J. (2012). Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 148: 102-110.

Hernández, J., Guerra, A., Gutiérrez, V. & Romero, M. (2002). Estimación de la tasa de fijación de carbono en el sistema agroforestal nogal cafetero (*Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken - cacao (*Theobroma cacao* L) - plátano (*Musa paradisiaca*). Bogotá: D.C. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Corpoica, Casa Luker, Universidad Distrital “Francisco José de Caldas” 124 p.

Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., Casasola, F. & Rojas, J. (2007). Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, 45: 27-36.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. (2009). Efectos del cambio climático en la producción y rendimiento de cultivos por sectores. Bogotá: Fondo financiero de proyectos de desarrollo - Fonade e instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales - IDEAM. 6 p.

Jaramillo, V. (2004). El ciclo global del Carbono. In: Martínez, J. & Fernández, A. *Cambio climático: una visión desde México*. pp. 77-85. México, D.F: INE/SEMARNAT. 523p.

Comentado [F1]: Significado de las siglas y ciudad

Laban, P., Metternicht, G & Davies, J. (2018). *Biodiversidad de suelos y carbono orgánico en suelos: cómo mantener vivas las tierras áridas*. Gland, Suiza: UICN. 24p.

Leal, F. & Navia, J. (2001). Cultivos multiestrato: un modelo de desarrollo agrícola para el área de Barlovento. *Rev. Fac. Agron*, 26: 67-77.

Lok, S., S. Fraga, S., Noda, A. & García, M. (2013). Almacenamiento de carbono en el suelo de tres sistemas ganaderos tropicales en explotación de ganado vacuno. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 47(1): 75-82.

López, A., Orozco, L., Somarriba, E. & Bonilla, G. (2003). Tipologías y manejo de fincas cafetaleras en los municipios de San Ramón y Matagalpa, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*. 10(37-38): 74-79.

Maia, S., Ogle, S., Cerri, C. & Cerri, C. (2009). Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and MatoGrosso states, Brazil. *Geoderma*, 149: 84-91.

MacDicken, K. (1997). *A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Forest Carbon Monitoring Program*. Washington, D.C., USA: Winrock International Institute for Agricultural Development (WRI). 84 p.

Comentado [F2]: ciudad

Manson, R., Hernández, V., Gallina, S. & Mehlreter, K. (2008). *Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: biodiversidad, manejo y conservación*. México: Instituto de Ecología A.C. e Instituto Nacional de Ecología. 348 p.

Milian, L. (2015). Influencia de la materia orgánica del suelo en el secuestro de carbono. Biochar, una estrategia potencial. Trabajo de grado. Universidad Complutense de Madrid. 20p.

Muschler, R. (2001). Shade benefits production and vigor of *Coffea arabica* L. in a suboptimal coffee zone of Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 51 (2): 131-139.

NAIR, P. K.; KUMAR, B. M.; NAIR, V. D. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172: 10-23.

Orozco, G., Ordoñez, C., Suárez, J., López, C. (2014). Almacenamiento de carbono en arreglos agroforestales asociados con café (*Coffea arabica*) en el sur de Colombia. *Rev. Invest. Agrar. Amb*, 5(1): 213-221.

Ortiz, A., Riascos, L. & Somarriba, E. (2008). Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y laurel (*Cordia alliodora*). *Agroforestería en las Américas* (CATIE), 46: 26 – 29.

- Pinoargote, M., Cerda, R., Mercado, L., Aguilar, A., Barrios, M. & Somarriba, E., (2017). Carbon stocks, net cash flow and family benefits from four small coffee plantation types in Nicaragua. *Trees and Livelihoods*, 26(3), 183-198.
- Post, W., Emanuel, W., Zinke, P. & Stangenberger, A. (1982). Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 298:156.
- Poveda, V., Orozco, L., Medina, C., Cerda, R. & López, A. (2013). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao en Waslala, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, 49: 42-50.
- Rodríguez, J., Beard, T., Bennett, E., Cumming, G., Cork, S., Agard, J., Dobson, A. & Peterson, G. (2009). Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 11(1): 28.
- Ruiz, P. & Somarriba, A. (2002). Evaluación del efecto de la práctica de no quema en el almacenamiento de carbono y la fertilidad de suelos en las comunidades de las cámaras y sabana larga, Estelí, Nicaragua. Managua: Universidad Centro Americana. 56 p.
- Siles, P., Harmand, J. & Vaast, P. (2010). Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 78: 269-286.
- Somarriba, E., Cerda, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Dávila, H., Espina, T., Mavisoy, H., Ávila, G., Alvarado, E., Poveda, V., Astorga, C., Saya, E. & Deheuvelsbc, O. (2013). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 173: 46-57.
- Suárez, A. (2002). *Cuantificación y valoración económica del servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café en la comarca Yassica Sur, Matagalpa, Nicaragua*. Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 117 p.
- Wang, W., Lei, X., Ma, Z., Kneeshaw, D. D. & Peng, C. (2011). Positive relationship between aboveground carbon stocks and structural diversity in spruce-dominated forest stands in New Brunswick, Canada. *Forest Science* 57(6):506-515.