

Avances de Investigación

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

Muhammad Ibrahim¹; Mario Chacón¹; César Cuartas¹; Juan Naranjo²; Guillermo Ponce¹; Pedro Vega³; Francisco Casasola¹; Jairo Rojas¹

Palabras clave: agroforestería, cambio global, ganadería y ambiente, secuestro de carbono, sistemas silvopastoriles.

RESUMEN

A pesar de que se conoce la capacidad que tienen los bosques y algunos sistemas silvopastoriles para almacenar carbono, aún falta información acerca del potencial de secuestro de carbono en suelo y en la biomasa arbórea en los sistemas de uso de la tierra predominantes en paisajes dominados por la ganadería. Se estimó el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) y de la biomasa arbórea arriba del suelo en distintos usos de la tierra en Colombia, Costa Rica y Nicaragua. Los usos de la tierra evaluados fueron pasturas degradadas, pasturas naturales y mejoradas con y sin árboles, bancos forrajeros, plantaciones forestales, bosques riparios y bosques secundarios. Para determinar el COS se tomaron muestras de suelo y se determinó el C orgánico (%) y la densidad aparente mediante análisis de laboratorio. El carbono (C) en la biomasa se estimó estableciendo parcelas temporales donde se midió el diámetro a la altura del pecho de todos los árboles y la biomasa se calculó mediante ecuaciones alométricas. El bosque secundario fue el uso de la tierra que presentó mayores cantidades del total de C en Costa Rica y Nicaragua, mientras que en Colombia fueron los bosques riparios. En los tres países las pasturas degradadas fueron el uso de la tierra que menos C total almacenó. Los resultados muestran que en cada uno de los paisajes ganaderos analizados las pasturas degradadas no están aportando significativamente al secuestro de carbono, mientras que las pasturas mejoradas con árboles y los sistemas silvopastoriles son usos de la tierra con mayores potenciales. El establecimiento de pasturas mejoradas con alta densidad de árboles presenta un alto potencial de secuestro de carbono, el cual se podría incrementar a nivel de finca y de paisaje insertando pequeñas áreas de plantaciones forestales y liberando otras áreas para dar paso a la regeneración natural del bosque.

Carbon storage in soil and tree biomass in different land use systems in cattle-dominated landscapes in Colombia, Costa Rica and Nicaragua

Keywords: agroforestry, carbon sequestration, global change, land uses, livestock and environment, silvopastoral system.

ABSTRACT

Although the capacity of forests and some silvopastoral systems to store carbon is well known, there is little information about the potential to sequester carbon in soil and tree biomass in the main land uses in landscapes dominated by cattle. We estimated the storage of soil organic carbon (SOC) and tree biomass carbon in different land uses in Colombia, Costa Rica and Nicaragua. The land uses evaluated were degraded pasture, native pasture and improved pasture with and without trees, fodder bank, forest plantation, riparian forest and secondary forest. Soil samples were taken to determine SOC and the bulk density was measured. The amount of C stored in soil was adjusted by soil mass. Carbon in tree biomass was estimated using temporal plots where diameter at breast height was measured, and the carbon stored was calculated using allometric equations. The secondary forest was the land use with more carbon stored (both in soil and trees) in Costa Rica and Nicaragua; in Colombia, it was the riparian forest. Degraded pasture was the land use with less carbon in all three countries. Our results show that in the three agricultural landscapes studied, degraded pastures had significantly lower C stocks compared to improved pastures with trees and forest systems, and that there are good opportunities for C sequestration in agricultural landscapes dominated by cattle.

¹ Grupo Ganadería y Manejo del Medio Ambiente, CATIE. Correo electrónico: fcasasol@catie.ac.cr

² Fundación CIPAV, Colombia. Correos electrónicos: cesar@cipav.org.co, jnaranjo@cipav.org.co

³ Instituto Nitlapán, Universidad Centroamericana, Managua, Nicaragua.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático inducido por las actividades humanas es un problema mundial que afecta de forma negativa los procesos ecológicos, económicos y sociales que rigen el planeta (IPCC 2001). El cambio climático es inducido principalmente por gases de efecto invernadero como el metano, el óxido nitroso y el dióxido de carbono (CO_2), los cuales provocan el incremento de su concentración en la atmósfera. En lo que respecta a los contenidos de carbono atmosférico, éstos se han incrementado principalmente por dos actividades humanas: el cambio de uso de la tierra y la combustión de fósiles. Se estima que el cambio de uso de la tierra emite $1,6 \pm 1,0$ Gt ($1 \text{ Gt} = 1 \times 10^9 \text{ t}$) de carbono al año y que la combustión de fósiles emite $5,5 \pm 0,5$ Gt de carbono al año (Lal y Kimble et ál. 1998). Esta situación se ha agravado en los últimos cien años, por lo que la comunidad científica ha concentrado gran parte de sus esfuerzos de investigación en esta área y, en las últimas décadas, ha sido también foco de discusión entre políticos.

En América Latina, uno de los principales cambios del uso de la tierra ha sido la deforestación de bosques para establecer pasturas para la ganadería (Harvey et ál. 2005) y en la actualidad las áreas de pastos continúan incrementando. Datos de FAOSTAT (2005) muestran que en 1961 el área de pasturas permanentes en Centroamérica era de 9,1 millones de hectáreas y ya para el año 2001 era de 13,6 millones. En Sudamérica, para 1961 existían 418,1 millones de hectáreas de pasturas y, para el 2002, estas áreas habían aumentado a 515,9 millones. El incremento de las áreas de pasturas hace que sea urgente tomar medidas a escalas tanto locales como regionales para buscar estrategias de mitigación de los niveles de CO_2 en la atmósfera por parte de los sistemas ganaderos. En este sentido, se han propuesto una serie de acciones que se pueden aplicar en las fincas de productores pequeños y medianos. Estas acciones consisten en fomentar los sistemas agroforestales en las fincas mediante la inserción de árboles aislados en potreros, el establecimiento de cercas vivas y el de pasturas mejoradas, así como incentivar la regeneración natural de la vegetación y la conservación de los bosques (Beer et ál. 2003).

Existe evidencia que demuestra que las fincas ganaderas pueden aportar al secuestro de carbono mediante la implementación de sistemas agroforestales; los bosques remanentes, áreas de vegetación secundaria en rege-

neración, pasturas arboladas y otros usos de la tierra dedicados a labores agrícolas pueden fungir como sumideros de carbono atmosférico (Post y Kwon 2000, Ruiz 2002, Fisher et ál. 2004). Los principales componentes de almacenamiento de carbono en el uso de la tierra son el carbono orgánico del suelo (COS) y en la biomasa arriba del suelo. Se ha estimado que el carbono (C) en la biomasa de los bosques primarios y secundarios varía entre 60 y 230 y entre 25 y 190 t ha^{-1} , respectivamente (Brown et ál. 1997), y que el C en el suelo puede variar entre 60 y 115 t ha^{-1} . Datos reportados de pasturas tropicales en Latinoamérica muestran cómo el establecimiento de pasturas mejoradas logra aumentar los niveles de carbono bajo el suelo. En Brasil, el establecimiento de pasturas mejoradas en áreas deforestadas provocó incrementos en la acumulación de carbono orgánico (De Camargo et ál. 1999). El potencial de los sistemas agroforestales (suelos y biomasa) para almacenar carbono puede variar entre 20 y 204 t ha^{-1} , estando la mayoría de este carbono almacenado en los suelos, pudiendo incluso tener incrementos de C anual que pueden variar entre 1,8 y 5,2 t ha^{-1} (Ibrahim et ál. 2005).

A pesar del reconocimiento del potencial que poseen tanto los bosques como los sistemas agroforestales para almacenar carbono, aún falta información del potencial de secuestro de carbono en suelo y en la biomasa arbórea en paisajes ganaderos en Latinoamérica. El objetivo de este estudio fue estimar el almacenamiento de carbono orgánico en el suelo y en la biomasa arbórea de diferentes usos de la tierra en paisajes ganaderos en Colombia, Costa Rica y Nicaragua, con el fin de entender el aporte de los sistemas agroforestales a la reducción de los impactos negativos del aumento del CO_2 atmosférico sobre el clima global.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se llevó a cabo en fincas ganaderas de los departamentos de Quindío y Valle del Cauca en Colombia ($4^{\circ}26'N$ y $75^{\circ}38'O$), en el cantón de Esparza en Costa Rica ($10^{\circ}09'N$ y $84^{\circ}42'O$) y en el municipio de Matiguás, Nicaragua ($12^{\circ}50'N$ y $85^{\circ}27'O$). Estas áreas forman parte del proyecto Enfoques Silvopastoriles Integrados para el Manejo de Ecosistemas (GEF-Silvopastoril), ejecutado por CATIE en Costa Rica, CIPAV en Colombia y Nitlapán en Nicaragua, financiado por el GEF, FAO y Banco Mundial. El paisaje en estas tres áreas es dominado por pasturas naturales y pasturas mejoradas con árboles y sin ellos; además, es posible encontrar áreas de bosques remanentes,

bosques secundarios y bosques riparios. En cada área de estudio se seleccionaron cuatro repeticiones de cada uso de la tierra (Cuadro 1). El criterio para la selección de los usos de la tierra en cada país fue su dominancia en área en cada paisaje estudiado.

Estimación del carbono orgánico en el suelo (COS)

El COS se estimó con base en el método propuesto por Amézquita et ál. (2004): en cada uso de la tierra se establecieron nueve puntos de muestreo en un recorrido lineal de longitud variable y en dirección de la pendien-

te. Los nueve puntos de muestreo consistieron en tres calicatas principales (1 x 1 x 1 m), distribuidas según la longitud del terreno y seis minicalicatas (0,4 x 0,4 x 0,4 m), ubicadas dos a cada lado de las calicatas principales (Figura 1). Se estableció una distancia de entre 30 y 50 m entre las calicatas principales y de entre 15 y 30 m entre minicalicatas. Cada uno de los puntos de muestreo se ubicó a una distancia no menor de 15 metros del borde del uso de la tierra evaluado, para evitar posibles influencias por la proximidad de otros sistemas de uso de la tierra (Figura 1).

Cuadro 1. Descripción de los usos de la tierra en los cuales se evaluó el COS y la biomasa arbórea en los departamentos de Quindío y Valle del Cauca en Colombia, en el cantón de Esparza en Costa Rica y en el municipio de Matiguás en Nicaragua

| País | Uso de la tierra | Edad (años) | Altitud (msnm) | Pendiente (%) | Temperatura promedio (°C) | Precipitación (mm/año) | Orden de suelos | Zona de vida (Holdridge) |
|------------|--|-------------|----------------|---------------|---------------------------|------------------------|-----------------|--------------------------|
| Colombia | Pasturas degradadas ^a | 20-50 | 1092-1255 | 12-91 | | | | bh-PM |
| | Pasturas mejoradas sin árboles | 10-50 | 990-1200 | 0-67 | | | | bh-PM |
| | Sistemas silvopastoriles intensivos (<i>Leucaena leucocephala</i> + <i>Cynodon plectostachyus</i>) | 1-2 | 1069-1187 | 0-26 | 20,9 – 22,3 | 1800-2100 | Andisoles | bh-PM |
| | Bosques riparios | 22-50 | 1040-1780 | 26-107 | | | | bh-PM – bh-MB |
| Costa Rica | Pasturas degradadas | 20-30 | 300-450 | 35-47 | | | | |
| | Pastura natural sin árboles | 10-70 | 180-330 | 5-40 | | | | |
| | Pastura mejorada sin árboles | 3-7 | 225-290 | 3-12 | | | | |
| | Pastura mejorada baja densidad de árboles (<30 árboles/ha) | 2-12 | 200-360 | 5-39 | 27,2 | 2043 | Alfisoles | bsh-T |
| | Pastura natural alta densidad (>30 árboles/ha) | 2-30 | 190-630 | 8-35 | | | | |
| | Plantación de maderables en monocultivo (<i>Tectona grandis</i>) | 10-15 | 200-300 | 4-18 | | | | |
| | Bosque secundario intervenido | 15-25 | 170-200 | 23-53 | | | | |
| Nicaragua | Pastura degradada | 8-10 | 270-392 | 6-55 | | | | |
| | Pastura natural baja densidad de árboles (<30 árboles/ha) | 10-14 | 246-287 | 5-45 | | | | |
| | Pastura mejorada sin árboles | 1-6 | 269-390 | 15-48 | | | | |
| | Pastura mejorada alta densidad de árboles (>30 árboles/ha) | 1-3 | 215-350 | 8-35 | 30,0 | 1400 | Vertisoles | bht |
| | Vegetación secundaria joven | 5-13 | 260-371 | 12-55 | | | | |
| | Bosque secundario intervenido | 16-25 | 266-329 | 12-45 | | | | |
| | Banco forrajero de gramínea (<i>Pennisetum purpureum</i>) | 2-7 | 130-370 | 4-45 | | | | |

Notas: ^a Solamente en el Valle del Cauca; COS = carbono orgánico en el suelo; bh-PM = bosque húmedo premontano; bh MB = bosque húmedo-montano bajo; bsh-T = bosque sub-húmedo tropical; bht = bosque húmedo tropical.

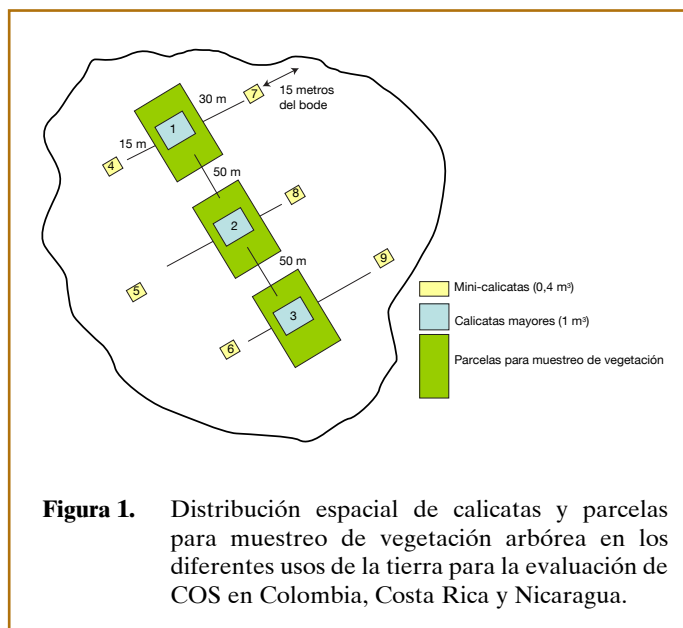


Figura 1. Distribución espacial de calicatas y parcelas para muestreo de vegetación arbórea en los diferentes usos de la tierra para la evaluación de COS en Colombia, Costa Rica y Nicaragua.

En cada repetición se tomaron 36 muestras de suelo (muestras de 300 g, nueve por profundidad) para la determinación del COS en cuatro profundidades (0-10, 10-20, 20-40 y 40-100 cm). El COS se determinó mediante el procedimiento de combustión húmeda (Walkley y Black 1934). La densidad aparente del suelo se determinó por el método del cilindro (Forsythe 1975), tomando tres muestras por profundidad mediante el uso de un cilindro de 5 cm de alto y 5 cm de diámetro, provenientes de tres de las caras de cada calicata principal, para un total de 36 muestras.

El COS almacenado a 1 m de profundidad se obtuvo mediante la sumatoria del COS en cada profundidad analizada. El COS en cada rango de profundidad se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

donde $COS (tha^{-1}) = A.p. fC. Pm$

A = área (ha); ρ = densidad aparente del suelo ($t m^{-3}$); fC = fracción de carbono y Pm = profundidad de muestreo (m). Se hizo el ajuste de la densidad aparente según el uso de la tierra sugerido por Buurman et ál. (2004).

Biomasa arbórea

La biomasa del componente arbóreo se midió en todos los usos de la tierra evaluados en Costa Rica y Nicaragua. En Colombia se midió la cobertura arbórea de los bosques riparios. La biomasa del componente arbóreo en pasturas se estimó siguiendo la metodología sugerida por McDicken (1997). Se establecieron parcelas circulares de 1000 m² alrededor de cada calicata principal, obteniendo un área total de muestreo de 3000 m² por repetición en cada uso de la tierra. En estas parcelas se registró la especie y el diámetro a la altura del pecho (dap) de todos los individuos con dap ≥ 5 cm. Se registró la especie y altura total de todas las palmas. La biomasa arbórea de bosques secundarios y bosques riparios se estimó adaptando la metodología sugerida por Segura y Kanninen (2002). En cada sitio donde se encontraban las calicatas principales se ubicaron parcelas de 25 x 10 m en donde se registró la especie, la altura y el dap de todos los árboles y palmas con un dap ≥ 5 cm. En las plantaciones de teca (*Tectona grandis*), el tamaño de las parcelas fue de 25 x 20 m, midiéndose las mismas variables tomadas en los bosques. La biomasa del componente arbóreo se estimó usando ecuaciones alométricas encontradas en la literatura (Cuadro 2). La biomasa fue multiplicada por 0,5 para estimar el contenido de carbono (IPCC 2003).

Cuadro 2. Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa en árboles y palmas presentes en distintos usos de la tierra en Colombia, Costa Rica y Nicaragua

| Uso de la tierra | Ecuación | Localidad | Fuente |
|--|--|------------|-------------------------|
| Bosques secundarios | $Log_{10} B = -4,47 + 2,7 log_{10} dap$ | Nicaragua | Ferreira (2001) |
| Árboles en potrero | $Log_{10} B = -2,18 + 0,08(dap) - 0,0006(dap^2)$ | Nicaragua | Ruiz (2002) |
| Plantaciones de <i>Tectona grandis</i> | $Log_{10} B = -0,82 + 2,38 Log_{10} dap$ | Costa Rica | Pérez y Kanninen (2003) |
| Palmas | $B = 4,5 + 7,7 * H$ | — | Frangi y Lugo (1985) |
| Bosques ribereños | $Ln B = -2,13 + 2,42 Ln (dap)$ | Colombia | Zapata et ál. (2003) |

Notas: B = biomasa arriba del suelo ($kg individuo^{-1}$); dap = diámetro a la altura del pecho (cm); H = altura total (m).

Biomasa en bancos forrajeros de gramíneas

Se establecieron al azar entre 20 y 30 puntos de muestreo (marcos de 0,25 m²) en cada repetición de los bancos para evaluar la biomasa de gramíneas (*Pennisetum purpureum*). Se cortó toda la biomasa al nivel del suelo, se pesó en fresco y se tomó una submuestra (aprox. 200 g) para determinar su materia seca (60 °C hasta peso constante). Se empleó el mismo factor (0,5) para transformar valores de biomasa a carbono.

Biomasa en sistemas silvopastoriles intensivos

La biomasa arriba del suelo en los sistemas silvopastoriles intensivos se evaluó en los dos componentes: pastura y arbustos de leucaena (*Leucaena leucocephala*). En la pastura se cosecharon entre 20 y 30 puntos de 0,25 m², dependiendo del área de la parcela de muestreo y de la heterogeneidad de la pastura. El componente arbustivo se evaluó estableciendo entre 5 y 10 parcelas temporales, dependiendo de la densidad arbustiva, y tratando de cubrir un área de muestreo superior a 20 m². Las parcelas temporales contaron con tres segmentos de 3 m en surcos adyacentes y allí se contó el número de arbustos presentes con diámetro mayor o igual a 5 mm a una altura de 30 cm. A cada arbusto se le registró la altura y el diámetro a 30 cm. En cada parcela se seleccionaron al azar tres individuos y se cortaron dividiendo su biomasa en fuste, ramas, hojas y semillas si las poseían. El material recolectado se envió al laboratorio para determinar peso seco a 65 °C; luego del secado se estimó el porcentaje de carbono.

Análisis estadístico

Se aplicaron análisis de varianza y pruebas de comparación LSD Fisher utilizando el programa estadístico InfoStat (2004) para determinar las diferencias en el almacenamiento de carbono en cada uso de la tierra evaluado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN**Carbono total (COS y biomasa arbórea) en los usos de la tierra**

En los tres países, las pasturas degradadas fueron el uso de la tierra que almacenó menos carbono total. En contraste, los bosques secundarios medidos en Costa Rica y Nicaragua y los bosques riparios en Colombia fueron los usos de la tierra con el mayor carbono total (Figura 2a). En Costa Rica, las pasturas degradadas ($26,5 \pm 10,9$ t ha⁻¹) fueron significativamente menores en su contenido total de C en comparación a los otros usos de la tierra, mientras que los bosques secundarios mostraron significativamente los mayores valores ($297,6 \pm 72,6$ t C ha⁻¹). Los otros usos de la tierra, excepto las pasturas degradadas, fueron significativamente similares en su contenido total de C (Figura 2a). Se encontraron diferencias significativas en C entre los usos del suelo ($p = 0,0285$). Los usos de la tierra con mayores cantidades de C en Nicaragua fueron el bosque secundario, la vegetación secundaria joven (tacotales), el banco forrajero de gramíneas y los pastos mejorados con alta densidad de árboles. Las pasturas degradadas fueron el uso de la tierra con menor C ($72,5 \pm 6,8$ t ha⁻¹), aunque estadísticamente similares a las pasturas naturales y mejoradas y a la vegetación secundaria joven ($p > 0,05$) (Figura 2b).



Las pasturas arborizadas desempeñan funciones productivas y ecológicas (foto: Mario Chacón)

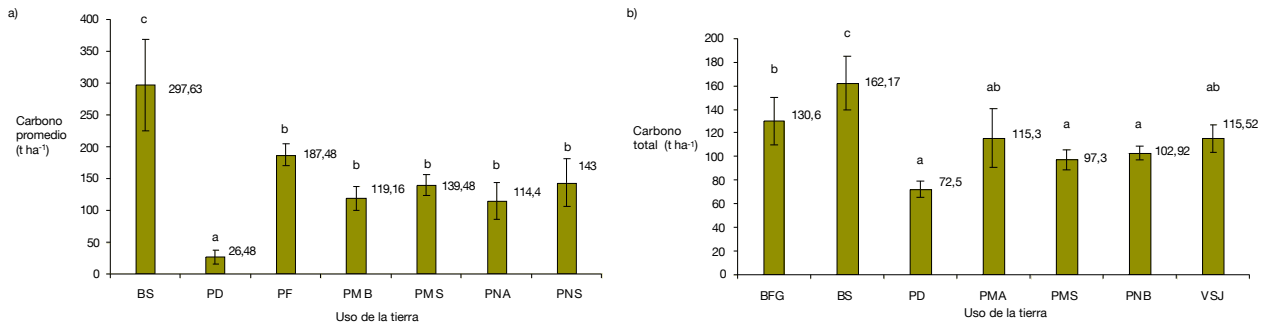


Figura 2. Almacenamiento de carbono total en diferentes usos del suelo en a) Esparza, Costa Rica y en b) Matiguás, Nicaragua, 2004. BS = bosque secundario; PD = pastura degradada, PF = plantación forestal de teca; PMB = pastura mejorada baja densidad de árboles; PMS = pastura mejorada sin árboles; PNA = pastura natural alta densidad de árboles; PNS = pastura natural sin árboles; BFG = banco forrajero de gramíneas; PMA = pastura mejorada alta densidad de árboles; VSJ = vegetación secundaria joven. Letras diferentes indican diferencias significativas según prueba de LSD Fisher $p \leq 0,05$. Las barras indican el error estándar.

Los datos encontrados en este estudio se asemejan a los reportes de carbono total obtenidos en bosques húmedos en Nicaragua, donde el almacenamiento de carbono sumado del suelo y de la biomasa alcanzó rangos de entre 251,7 y 320,1 t ha⁻¹ (Lagos y Venegas 2003), al igual que en bosques húmedos en Guatemala, donde se han encontrado valores de 237 t ha⁻¹ de C total (Arreaga 2002).

Carbono orgánico en el suelo (COS)

El COS en los distintos usos de la tierra presentó diferencias significativas en Costa Rica y Nicaragua ($p < 0,05$). En Colombia, los cuatro usos de la tierra evaluados no presentaron diferencias significativas en sus contenidos de COS (Figura 3a, $p = 0,0544$), reportándose valores de entre 52,3 ± 9,8 y 81,3 ± 3,6 t ha⁻¹ para los bosques riparios y para las pasturas mejoradas sin árboles, respectivamente. Estos resultados se asemejan a los de otros estudios llevados a cabo en Colombia, donde inventarios de carbono superficial en el suelo (0-30 cm) de cuatro tipos de cobertura vegetal (bosque primario intervenido, bosque secundario, rastrojo bajo y pastizal sin manejar) no encontraron diferencias significativas (83,9 ± 11,1 y 96,6 ± 5,0 t C ha⁻¹; Moreno y Lara 2003). En los llanos orientales colombianos, estudios realizados en estaciones experimentales muestran que la pastura *Brachiaria humidicola* posee a un metro de profundidad 222,8 t C ha⁻¹ (Fisher et ál. 1994).

En Costa Rica, las pasturas degradadas presentaron menor cantidad de COS que los demás sistemas (21,7 ± 6,6 t C ha⁻¹; Figura 3b, $p = 0,0484$). Los otros seis usos de la tierra evaluados no presentaron diferencias

significativas ($p > 0,05$), encontrándose en un rango entre 95,1 ± 6,6 y 139,5 ± 17,2 t C ha⁻¹ para las plantaciones forestales y las pasturas mejoradas sin árboles, respectivamente. En Nicaragua, las pasturas degradadas presentaron menor cantidad de COS con 63,1 ± 8,4 t C ha⁻¹ y los bosques secundarios los que presentaron una mayor cantidad con 139,2 ± 20,4 t C ha⁻¹ (Figura 3c). Datos similares se reportaron en Matiguás, Nicaragua, en donde no se encontraron diferencias significativas entre pasturas y vegetación secundaria (Ruiz 2002), aunque en el caso de Nicaragua los datos muestran semejanzas estadísticas en el almacenamiento de carbono entre las pasturas degradadas y otros usos de la tierra. Los menores contenidos en las pasturas degradadas se deben posiblemente al efecto de la edad y al tipo de manejo que realizan los productores, tal como quemas o la carga animal empleada.

Los resultados determinados en este estudio sobre la cantidad de COS almacenada en los suelos de los tres países concuerdan con estudios llevados a cabo en otros sitios del Neotrópico. Los resultados de COS en bosques se asemejan a los reportados en Venezuela, donde se determinaron valores de 125,0 ± 8,3 t ha⁻¹ de COS a 1 m de profundidad en bosques secos con condiciones climáticas similares a los sitios de Costa Rica y Nicaragua (Delaney et ál. 1997). En bosques húmedos en Guatemala se encontró a una profundidad de 60 cm cantidades de COS de 130,4 t C ha⁻¹ (Arreaga 2002).

En contraste, estudios efectuados en pasturas en la Amazonía brasileña hacen suponer que las pasturas

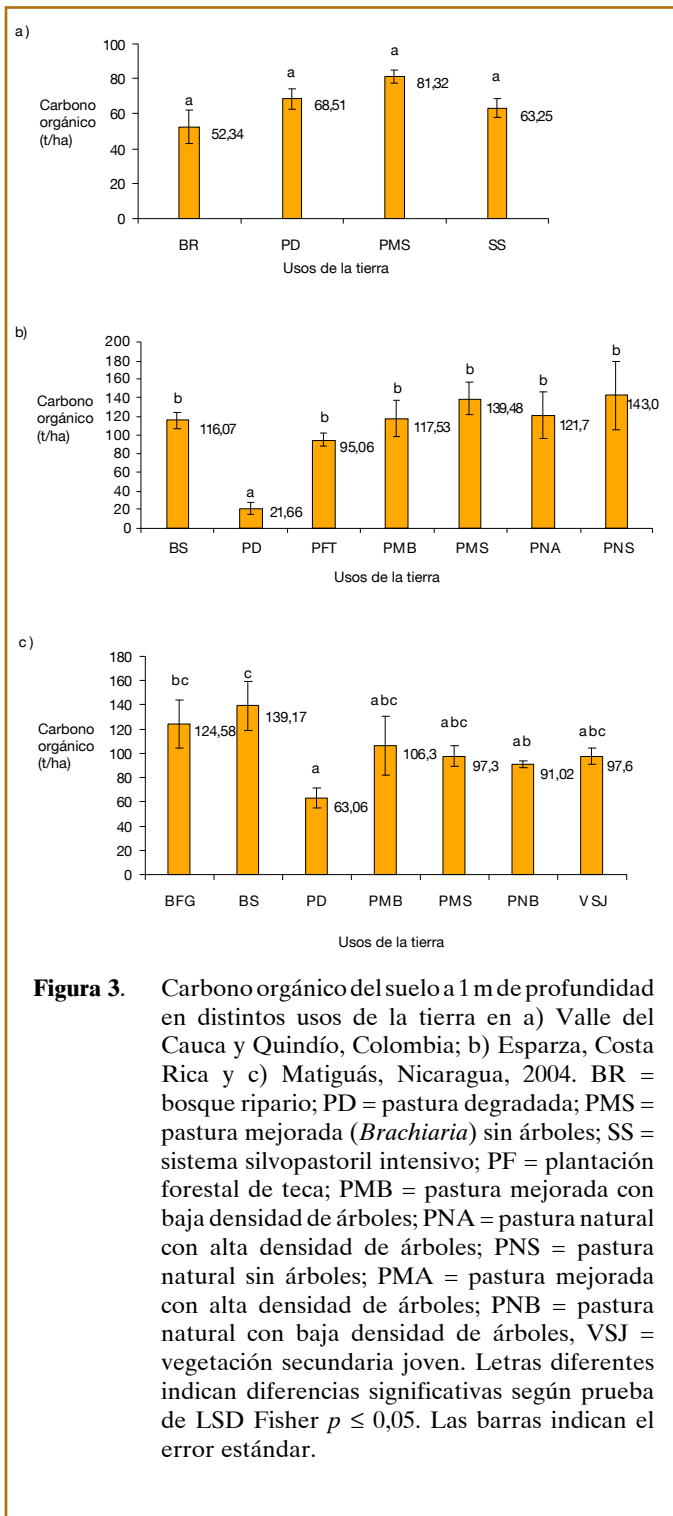


Figura 3. Carbono orgánico del suelo a 1 m de profundidad en distintos usos de la tierra en a) Valle del Cauca y Quindío, Colombia; b) Esparza, Costa Rica y c) Matiguás, Nicaragua, 2004. BR = bosque ripario; PD = pastura degradada; PMS = pastura mejorada (*Brachiaria*) sin árboles; SS = sistema silvopastoril intensivo; PF = plantación forestal de teca; PMB = pastura mejorada con baja densidad de árboles; PNA = pastura natural con alta densidad de árboles; PNS = pastura natural sin árboles; PMA = pastura mejorada con alta densidad de árboles; PNB = pastura natural con baja densidad de árboles, VSJ = vegetación secundaria joven. Letras diferentes indican diferencias significativas según prueba de LSD Fisher $p \leq 0,05$. Las barras indican el error estándar.

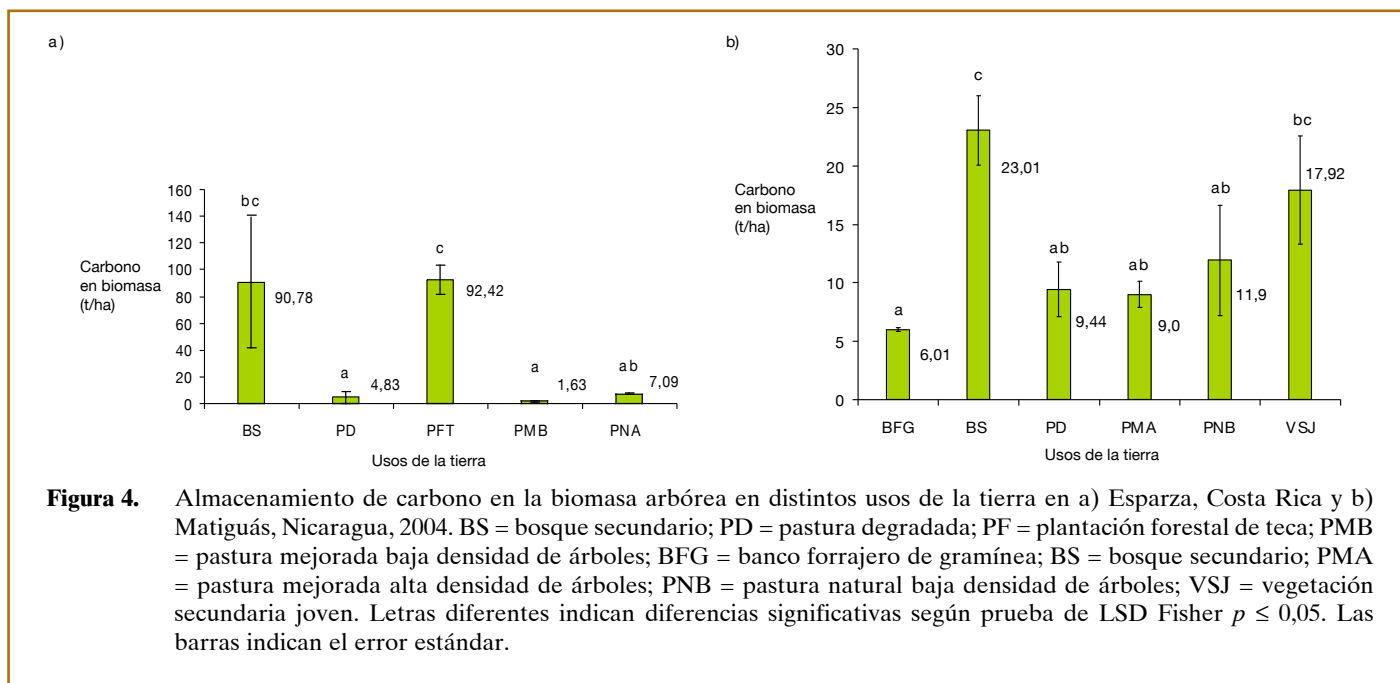
mejoradas (*B. humidicola*) incorporan mayores cantidades de materia orgánica en la superficie del suelo que otros usos de la tierra, como los bosques o las plantaciones forestales (De Camargo et ál. 1999). El caso estudiado en los llanos Colombianos con pastos conformados por *B. humidicola* muestran un ejemplo de este supuesto (Fisher et ál. 2004). Parece existir un

patrón de depósitos de COS en distintos usos de la tierra, que muestra menores cantidades en suelos de bosques secundarios en edad avanzada y en bosques riparios que en suelos bajo pasturas; este patrón se puede observar en los datos reportados por este estudio en Colombia y Costa Rica.

Existen una serie de factores que influyen en el COS, como el historial de usos de la tierra, las entradas y salidas de materia orgánica del sistema y el manejo de estos usos de la tierra. Factores como las condiciones físicas y biológicas del suelo y la historia de las entradas de material orgánico a los suelos pueden determinar las tasas de cambio de carbono orgánico bajo el suelo cuando la vegetación y las prácticas de manejo han cambiado, tal como en la eliminación de bosque para establecer pasturas (Post y Kwon 2000). Cuando se presenta una situación como la anterior, se puede ganar o perder carbono del suelo dependiendo de las circunstancias específicas, como el uso de fertilizantes o la eliminación de la cobertura vegetal (Post y Kwon 2000). Además, las actividades de manejo tanto para la producción animal como el aprovechamiento forestal también afectan el almacenamiento de carbono. Las similitudes estadísticas del COS entre usos del suelo se puede deber a la edad de los sistemas. El amplio rango de edad de parcelas medidas en cada sistema dificulta evaluar el efecto de los sistemas de uso del suelo en el COS.

Biomasa arbórea arriba del suelo

En Colombia se encontró $158,7 \pm 12,5 \text{ t ha}^{-1}$ de carbono en la biomasa aérea en los bosques riparios. Se encontraron diferencias estadísticas ($p = 0,0042$) en el almacenamiento de carbono en biomasa aérea entre sistemas de Costa Rica. En este país, las plantaciones de teca presentaron el mayor almacenamiento de carbono, seguidas por los bosques secundarios ($92,4 \pm 11,3$ y $90,8 \pm 48,6 \text{ t C ha}^{-1}$, respectivamente; Figura 4a). Las pasturas degradadas, las pasturas mejoradas con baja densidad de árboles y las pasturas naturales con alta densidad de árboles fueron los usos de la tierra que aportaron menor cantidad de carbono en la biomasa arbórea. Los bosques secundarios presentaron mayor almacenamiento de C en Nicaragua que el resto de los sistemas ($23,0 \pm 3,0 \text{ t C ha}^{-1}$; $p = 0,0113$). Los demás usos de la tierra no presentaron diferencias significativas en los contenidos de biomasa ($p > 0,05$), pero los bancos forrajeros de gramíneas son los de menor carbono ($6,0 \text{ t ha}^{-1}$; Figura 4b).



El contenido de carbono en la biomasa de bosques reportados en este estudio (entre 23,0 y 158,7 t C ha⁻¹) se asemejan a los reportes existentes para biomasa de bosques tropicales (Orrego y Del Valle 2003). En bosques húmedos en Centroamérica, se han reportado valores de carbono de entre 111,4 a 137,8 t C ha⁻¹ en Costa Rica (Segura 1999); 145,6 y 183,2 t C ha⁻¹ en Nicaragua (Lagos y Venegas 2003) y 104,80 t C ha⁻¹ en Guatemala (Arreaga 2002). En bosques secundarios jóvenes en Nicaragua, se han determinado valores de 17,6 t C ha⁻¹ (Ruiz 2002). Se reporta una situación similar para el carbono en la biomasa del componente arbóreo en las pasturas; en Nicaragua se encontró en pasturas nativas con árboles (100 árboles ha⁻¹) contenidos de carbono de $8,2 \pm 3,0$ t C ha⁻¹ y en pasturas mejoradas con árboles (110 árboles ha⁻¹) de $12,5 \pm 3,6$ t ha⁻¹ (Ruiz 2002).

Los datos encontrados en teca se asemejan a algunos estudios en Panamá, donde se determinó un promedio de 104,5 t ha⁻¹ de carbono (Kraenzel et ál. 2003); sin embargo, contrastan con lo encontrado en Hojanca, zona del Pacífico seco de Costa Rica, donde se encontró un total de carbono en la biomasa de entre 33,8 y 37,9 t C ha⁻¹ (Cubero y Rojas 1999). La explicación a estas variaciones puede ser atribuida a diferencias en la calidad de sitio, la edad y el tipo de manejo silvicultural aplicado a las plantaciones (De Camino et ál. 2002).

CONCLUSIONES

En los tres paisajes ganaderos estudiados en Colombia, Costa Rica y Nicaragua, el total de carbono (COS y biomasa arbórea) presentó mayores depósitos en los bosques secundarios, los bosques riparios y las plantaciones forestales, mientras que las pasturas degradadas fueron el uso de la tierra que reportó menores valores. Al nivel de suelo, las pasturas degradadas presentaron menores valores de COS a 1 m de profundidad en Costa Rica y Nicaragua, y no se encontraron diferencias significativas de COS en los demás usos de la tierra evaluados. En Colombia, a nivel de suelos no se encontraron diferencias significativas de COS en los usos de la tierra analizados.

Los resultados muestran que en cada uno de los paisajes ganaderos analizados las pasturas degradadas no están aportando significativamente al secuestro de carbono e incluso podrían estar emitiendo carbono a la atmósfera, mientras que las pasturas mejoradas con árboles son usos de la tierra con mayor potencial para el secuestro de carbono que las pasturas degradadas.

El mejoramiento de pasturas y el aumento de la cobertura arbórea puede hacer que usos de la tierra como las pasturas degradadas presenten un alto potencial de secuestro de carbono a nivel de finca. A nivel de paisaje, el potencial de las fincas ganaderas se vería incrementado insertando algunas áreas con plantaciones forestales y liberando áreas no aptas para la producción agropecuaria para dar paso a la regeneración natural de bosques secundarios.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto Enfoques Silvopastoriles Integrados para el Manejo de Ecosistemas, financiado por GEF-FAO-Banco Mundial y ejecutado por CATIE en Costa Rica, CIPAV en Colombia y Nitlapán en Nicaragua. A Luis Quirós, Rodrigo Granados y Paulo Dittel por el trabajo de campo en Costa Rica. A Alfredo Argüello Woo por el trabajo de campo y manipulación de muestras en Nicaragua. A Enrique Méndez por el trabajo de campo en Colombia. A Fernando Casanoves y Gustavo López del Departamento de Estadística de CATIE por el apoyo en los análisis de datos. A Hernán Andrade y Jimena Esquivel por la revisión técnica. Al programa de Jóvenes Investigadores e Innovadores 2005 (Convenio Especial de Cooperación No. 102-2004) por el apoyo a César Cuartas.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Amézquita, MC; Ibrahim, M; Buurman, P. 2004. Carbon Sequestration in Pasture, Agro-pastoral and Silvopastoral Systems in the American Tropical Forest Ecosystem. *In* Mannetje, L't; Ramírez, L; Ibrahim, M; Sandoval, N; Ojeda, JK. eds. The Importance of Silvopastoral Systems in Rural Livelihoods to Provide Ecosystem Services (2, 2004, Merida, MX). Memoria. Mérida, Yucatán, México. P. 303-309.
- Arreaga, WE. 2002. Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal sostenible en la Reserva de Biosfera Maya, Petén, Guatemala. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 73 p.
- Beer, J; Harvey, C; Ibrahim, M; Harmand, JM; Somarriba, E; Jiménez, F. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas* 10(37-38):80-87.
- Brown, P; Cabarle, B; Livernash, R. 1997. Carbon counts: Estimating climate change mitigation in forestry projects. Estados Unidos, World Resources Institute. 25 p.
- Buurman, P; Ibrahim, M; Amézquita, M C. 2004. Mitigation of greenhouse gas emissions by silvopastoral systems: optimism and facts. *In* Mannetje, L't; Ramírez, L; Ibrahim, M; Sandoval, N; Ojeda, JK. eds. The Importance of Silvopastoral System in Rural Livelihoods to Provide Ecosystem Services (2, 2004, Merida, MX). Memoria. Mérida, México. p. 61.
- Cubero, JA; Rojas, SA. 1999. Fijación de carbono en plantaciones forestales de melina (*Gmelina arborea* Roxb), teca (*Tectona grandis* L.f) y pochote (*Bombacopsis quinata* Jacq.) en los cantones de Hojanca, y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Tesis Lic. Heredia, CR, UNA. 95 p.
- De Camino, RV; Alfaro, MM; Sage, LFM. 2002. Teak (*Tectona grandis*) in Central America, Forest Plantations Working Papers. Roma, IT, FAO. 64 p. (Working Paper FP/19).
- De Camargo, PB; Trumbore, SE; Martinelli, LA; Davidson, EA; Nepstad, DC; Victoria, L. 1999. Soil carbon dynamics in regrowing forest of eastern Amazonian. *Global Change Biology* 5:693-702.
- Delaney, M; Brown, S; Lugo, AE; Torres-Lezama, A; Bello Quintero, N. 1997. The distribution of organic carbon in major components of forest located in five zones of Venezuela. *Journal of Tropical Ecology* 13:697-708.
- FAOSTAT, 2005. Data base of Food and Agricultural Organization (en línea). Consultado 25 ene. 2005. Disponible en <http://faostat.fao.org/>
- Ferreira, CM. 2001. Almacenamiento de carbono en bosques secundarios en el municipio de San Carlos, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 100 p.
- Fisher, MJ; Rao, IM; Ayarza, MA; Lascano, CE; Sanz, JI; Thomas, RJ; Vera, RR. 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 371:236-238.
- _____; Rao, IM; Thomas R.J. 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.
- Forsythe, W. 1975. Física de Suelos. San José, CR, IICA. 212 p.
- Frangi, JL; Lugo, AE. 1985. Ecosystem dynamics of a subtropical floodplain forest. *Ecological Monographs* 55:351-369.
- Harvey CA; Alpizar F; Chacón M; Madrigal, R. 2005. Assessing linkages between agriculture and biodiversity in Central America: Historical overview and future perspectives. Mesoamerican and Caribbean Region, Conservation Science Program. San José, CR, The Nature Conservancy (TNC). 140 p.
- Ibrahim, M; Chacón, M; Mora J; Zamora, S; Gobbi, J; Llanderal, T; Harvey, A; Murgueitio, E; Casasola, F; Villanueva, C; Ramirez, E. 2005. Opportunities for carbon sequestration and conservation of water resources on landscapes dominated by cattle production in Central America. *In* Henry A. Wallace/CATIE Inter-American Scientific Conference Series, "Integrated management of environment services in human-dominated tropical landscape" (4, Costa Rica, 2005). Abstracts. Turrialba, CR, CATIE. p. 27 -34.
- InfoStat. 2004. Manual del Usuario. 1 ed. Argentina, Universidad Nacional de Córdoba-Editorial Brujas. 314 p.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, US). 2001. Tercer Informe de Evaluación Cambio climático 2001: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. *In* McCarthy, JJ; Canziani, OF; Leary, NA; Dokken, DJ; White, KS. eds. Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico. Parte de la contribución del Grupo de trabajo II al Tercer Informe de Evaluación Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, CH, Cambridge University Press. 1000 p.
- _____. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry, *In* IPCC Good Practice Guidance for LULUCF, Chapter 4: Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol, Panel on Climate Change, Eds, Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraiishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendía, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner. p. 4, 113 - 116.
- Kraenzel, M; Castillo, A; Moore, T; Potvin, C. 2003. Carbon storage of harvest age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panama. *Forest Ecology and Management* 173:213-225.
- Lagos, O; Venegas, S. 2003. Impacto del aprovechamiento forestal en la biomasa y carbono de bosques naturales de Nueva Quesada, Río San Juan. Tesis Lic. Managua, NI, Universidad Centroamericana. 121 p.
- Lal, R.; Kimble J. 1998. Pedospheric processes and the carbon cycle. *In* Lal, R; Kimble, KM; Follett, RF; Stewart, BA. eds. Soil processes and the carbon cycle. Estados Unidos, CRC Press. p. 1-8.

- MacDicken, K. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Estados Unidos, F. C. M. P. Winrock International Institute for Agricultural Development. 91 p.
- Moreno, F; Lara, W. 2003. Variación del carbono orgánico del suelo en bosques primarios intervenidos y secundarios. *In* Orrego, SA; Del Valle, JI; Moreno, FH. eds. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia, contribuciones para la mitigación del cambio climático. Bogotá, CO, Universidad Nacional de Colombia-Centro Andino para la Economía del Medio Ambiente (CAEMA). p. 189-213.
- Orrego, SA; Del Valle, JI. 2003. Existencias y tasas de incremento neto de la biomasa y del carbono en bosques primarios intervenidos y secundarios. *In* Orrego, SA; Del Valle, JI; Moreno, FH. eds. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia, contribuciones para la mitigación del cambio climático. Bogotá, CO, Universidad Nacional de Colombia-Centro Andino para la Economía del Medio Ambiente (CAEMA). p 215-241.
- Pérez, LD; Kanninen, M. 2003. Aboveground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science* 15(1):199-213.
- Post, WM; Kwon, KC. 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology* 6:317-327.
- Ruiz, A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua. Turrialba, CR, CATIE. 111 p.
- Segura, MA. 1999. Valoración del servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados del Área de Conservación Cordillera Volcánica Central. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 115 p.
- _____; Kaninnen, M. 2002. Inventario para estimar carbono en ecosistemas forestales tropicales. *In* Orozco, L; Brumér, C. eds. Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central. Turrialba, CR, CATIE. 264 p. (Serie Técnica, Manual Técnico No. 50).
- Walkley, A; Black, AI. 1934. An examination of the Degtjoreff method for determination soil organic matter, and a proposed codification of the cromic acid titration method. *Soil Science* 37:29-38.
- Zapata, M; Colorado, GJ; Del Valle JI. 2003. Ecuaciones de biomasa aérea para bosques intervenidos y secundarios. *In* Orrego, SA; Del Valle, JI; Moreno, FH. eds. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia, contribuciones para la mitigación del cambio climático. Bogotá, CO, Universidad Nacional de Colombia-Centro Andino para la Economía del Medio Ambiente (CAEMA). p. 87-120.