

Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao en Waslala, Nicaragua

Verónica Poveda¹, Luis Orozco², Cristóbal Medina³, Rolando Cerda⁴, Arlene López²

RESUMEN

Se estimó el carbono almacenado en 50 sistemas agroforestales con cacao (SAF-cacao) de Waslala, Nicaragua. Los SAF-cacao almacenaron 91,45 ($\pm 31,44$) t C ha⁻¹ con una tasa de fijación de carbono total de 5,4 t C ha⁻¹ año⁻¹ y 2 t C ha⁻¹ año⁻¹ en biomasa aérea. Los compartimentos del SAF-cacao que más carbono almacenaron en orden descendente fueron: suelo (52,61%), biomasa aérea (plantas de cacao y árboles de sombra) (35,86%), raíces gruesas (7,52%), raíces finas (4,15%), necromasa (0,32%) y hojarasca (0,32%). El 56% de los SAF-cacao registraron niveles de carbono medio y alto y el 44% niveles bajo y muy bajo. Mediante un análisis de conglomerados a partir de las características de sitio y estructura del dosel, se conformaron cuatro grupos con diferentes contenidos de carbono; el suelo fue el de mayor aporte (más del 50% del carbono total fijado). Las variables que más aportaron en la diferenciación de los grupos de SAF-cacao fueron las relacionadas con la diversidad arbórea del dosel de sombra (número de especies, densidad, área basal, biomasa). Se valoró financieramente el aporte que percibirían los productores por secuestro de carbono, el cual se estimó en US\$36 t C ha⁻¹ año⁻¹, valor correspondiente a la tasa anual de fijación de carbono aéreo. Los resultados podrían ser utilizados por organizaciones cacaoeras de Waslala para gestionar proyectos de pago por créditos de carbono.

Palabras clave: sombra, frutales, biomasa aérea, investigación participativa

ABSTRACT

Carbon storage in cocoa agroforestry systems in Waslala, Nicaragua

We estimated the carbon stored in 50 cocoa agroforestry systems (cocoa-AFS) of Waslala, Nicaragua. The cocoa-AFS stored 91.45 (± 31.44) t C ha⁻¹ with a total carbon fixation rate of 5.4 t C ha⁻¹ yr⁻¹ and 2 t C ha⁻¹ yr⁻¹ in aboveground biomass. The compartments of the cocoa-AFS that stored more carbon in descending order were: soil (52.61%), aboveground biomass (cocoa plants and shade trees) (35.86%), thick roots (7.52%), fine roots (4.15%), necromass (0.32%) and leaf litter (0.32%). Fifty-six percent of the cocoa-AFS recorded medium and high carbon levels and 44% had low and very low levels. Using a cluster analysis based on site characteristics and canopy structure, four groups were formed with different carbon contents; soil made the highest contribution (over 50% of total carbon fixed). The variables that contributed most to the differentiation of the cocoa-AFS groups were those related to the tree diversity of the shade canopy (number of species, density, basal area, and biomass). We financially evaluated the contribution that producers receive for carbon sequestration, which was estimated at US\$36 t C ha⁻¹ yr⁻¹, a value that corresponds to the annual rate of atmospheric carbon fixation. The results could be used by Waslala cocoa-producing organizations to manage projects for the payment of carbon credits.

Keywords: shade, fruit trees, aboveground biomass, participatory research

INTRODUCCIÓN

El aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico es una preocupación mundial, y se considera como uno de los seis principales gases de efecto invernadero (GEI) el cual contribuye en mayor proporción al cambio climático. El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) es uno de los instrumentos del Protocolo de Kyoto para reducir la emisión global de GEI (IPCC 2003). El MDL es un mecanismo importante, pues establece un puente financiero entre los países

desarrollados compradores y los países en desarrollo vendedores de sus servicios ambientales por reducciones de GEI (Cuéllar 1999). La acumulación de carbono en la biomasa de los árboles y otras especies leñosas en las fincas es una alternativa de MDL disponible a los productores rurales en los trópicos, donde las condiciones de temperatura, radiación solar y humedad favorecen altas tasas de crecimiento arbóreo y, por tanto, altas tasas de fijación de carbono atmosférico (Somarriba et al. 2008).

¹ Estudiante de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, FARENA-UNA, Managua, Nicaragua. Mail: vemeposa@gmail.com (Autora para correspondencia).

² Consultores- Agroforestales. M.Sc Agroforestería Tropical, Managua, Nicaragua (lorozagui@hotmail.com), (arlenlop@hotmail.com)

³ Profesor-Investigador FARENA-UNA, km 12 Carretera Norte, Managua, Nicaragua (cmedina@una.edu.ni)

⁴ M.Sc. Proyecto Cacao Centroamérica, CATIE, Costa Rica. rcerda@catie.ac.cr

Los bosques son el principal sumidero del CO₂ atmosférico; no obstante, los sistemas agroforestales (SAF), al ser agroecosistemas parecidos a los bosques, pueden también capturar y almacenar importantes cantidades de CO₂ atmosférico (Dixon 1995, Segura 1999). Los SAF -principalmente los que combinan cultivos perennes (café y cacao) con árboles de sombra- cumplen un papel relevante en la mitigación del calentamiento del planeta, ya que pueden almacenar entre 12 y 228 t C ha⁻¹, principalmente en la madera del componente leñoso (Winjum et al. 1992, Schroeder 1994, Dixon 1995). Se considera que los 400 millones de hectáreas bajo SAF que existen en la actualidad tienen potencial para secuestrar carbono por un millón de toneladas para el 2040 (Montagnini y Nair 2004). Los SAF-cacao son una alternativa de uso de la tierra al alcance de los pequeños productores de zonas tropicales, quienes podrían certificar ese carbono y venderlo para obtener ingresos complementarios (Somarriba et al. 2008), al mismo tiempo que incrementan el número y el crecimiento de los árboles maderables y frutales que son valiosos para la conservación biológica y/o cultural (Beer et al. 2003, Somarriba y Harvey 2003).

En Nicaragua, se ha venido estudiando el potencial de varios usos de suelo para almacenar carbono; entre ellos, los cafetales con sombra, bosques secundarios y pinares (Suarez 2003, Medina et al. 2008), pero no existe información sobre el potencial de los sistemas agroforestales con cacao como sumideros de carbono. El presente estudio tuvo como objetivo cuantificar el carbono almacenado en diferentes componentes de los SAF-cacao de Waslala, Nicaragua y calificar su potencial para proveer un servicio ambiental de interés global y, consecuentemente, mitigar el cambio climático. Los resultados y recomendaciones del estudio podrán ser usados por centros de estudio, organizaciones productivas y gobiernos municipales de Waslala para “negociar” una eventual venta de certificados de emisiones reducidas en los mercados voluntarios de carbono (Hamilton et al. 2010).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ver descripción del área de estudio en Ayestas et al, en este mismo número de la RAFA.

Selección de las fincas y caracterización de los SAF-cacao

Entre marzo y junio del 2009 se muestrearon 50 fincas cacaoteras de productores socios de la Cooperativa de Servicios Agroforestales y de Comercialización de

Cacao (*Cacaonica*) distribuidas en 17 comunidades. Las fincas fueron seleccionadas aleatoriamente de entre 250 fincas registradas en el estudio de línea base del Proyecto Cacao Centroamérica (Orozco y Deheuvels 2007).

Parcela de muestreo

En cada finca se seleccionó un cacaotal (1 ha de superficie y 5 años de edad como mínimo), donde se estableció una parcela rectangular de 1000 m² (20 m x 50 m), subdividida en cuatro cuadrantes (10 x 25 m). En cada cuadrante se muestreó el contenido de carbono en varios componentes del SAF-cacao: dosel de sombra, plantas de cacao, hojarasca, necromasa, raíces (gruesas y finas) y suelo (Figura 1).

Dosel de sombra y plantas de cacao

En cada parcela se midió el diámetro a 30 cm sobre el suelo de 36 plantas de cacao y se registró el dap (1,3 m) con cinta diamétrica de toda la vegetación leñosa de los cacaotales. Por medio de ecuaciones alométricas se estimó la biomasa aérea de las plantas de cacao y de todos los árboles de sombra (Cuadro 1). El carbono almacenado en las plantas de cacao y árboles de sombra se calculó asumiendo una fracción de carbono de 0,5 (IPCC 2003) de la biomasa total estimada.

Hojarasca y necromasa

En cada cuadrante se lanzó aleatoriamente un marco metálico de 0,25 m² (0,5 x 0,5 m) para recolectar la hojarasca y necromasa (≤ 10 cm) sobre el suelo, la cual fue pesada en campo para determinar el peso húmedo.

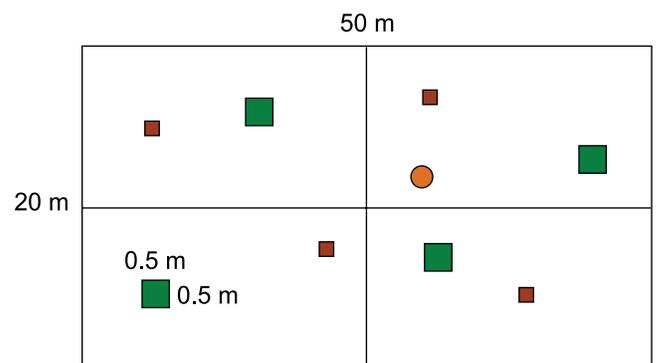


Figura 1. Parcela temporal de muestreo del carbono en varios componentes del SAF-cacao en Waslala, Nicaragua

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de biomasa arriba del suelo en los cacaotales de Waslala, Nicaragua

Especies	Ecuación	R ² ajustado	Fuente
<i>Theobroma cacao</i>	$Bt = 10^{(-1.63+2.63*\log(d\ 30))}$	0,98	Andrade et al. 2008
<i>Cordia alliodora</i>	$Bt = 10^{(-0.51+2.38*\log(dap))}$	0,94	Andrade et al. 2008
Árboles Frutales	$Bt = 10-1.11+2.64*\log(dap)$	0,95	Andrade et al. 2008
<i>Bactris gasipaes</i>	$Bt = 0,74*ht^2$	0,95	Szott et al. 1993
Árboles sombra (dap≤50 cm)	$Bt=10^{((2,3408*(\log(dap))))-0,9578)}$	0,97	Ortiz 1997
Árboles sombra (dap≥50 cm)	$Bt = e^{(0,76+0,00015*dap2)} *1000$	0,71	Segura y Kanninen 2005
Raíces gruesas	$Y = \exp[-1,0587 + 0,8836 \times \ln (BA)]$	ND	IPCC 2003
Carbono almacenado	$CA = B*Fc$	ND	IPCC 2003

Donde: Bt=biomasa total arriba del suelo (kg árbol⁻¹); d30=diámetro del tronco a 30 cm sobre el suelo; dap=diámetro a 1,30 m del suelo (cm); ht altura total (m); log=logaritmo de base 10; ln=logaritmo natural de base e; CA=carbono almacenado (t/ha); B=biomasa (t/ha); Fc=fracción carbono (t/ha); ND=No disponible

Cada muestra de cada cuadrante se mezcló para obtener una muestra compuesta de 200 g, la que fue etiquetada y enviada al Laboratorio de Suelos y Agua de la Universidad Nacional Agraria (LABSA-UNA) para determinar el peso seco y el contenido de carbono. Finalmente, el contenido calculado de biomasa de la hojarasca y la necromasa se multiplicó por la fracción de carbono para obtener el carbono total (Rugnitz y Chacón 2008).

Suelo

Densidad aparente (DA): por medio de un cilindro de volumen conocido (100 cm³) y de manera aleatoria dentro de la parcela de 1000 m² se tomaron dos muestras de suelo a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm), las cuales se almacenaron en bolsa plástica, se etiquetaron y se enviaron al LABSA-UNA para obtener el peso seco y la densidad aparente del suelo.

Porcentaje de carbono (%): en cada cuadrante y con un barreno (20 cm de longitud) se obtuvieron cuatro muestras de suelo que fueron pesadas en campo para obtener el peso húmedo. Se mezclaron todas las muestras y se obtuvo una muestra compuesta de 200 g que fue etiquetada y enviada al LABSA-UNA para obtener el peso seco y el porcentaje de carbono. El contenido de carbono en el suelo se calculó a partir de los valores de densidad aparente y porcentaje de carbono, con la siguiente fórmula:

$$CCS (tC/ha) = FC \times DA \times VS_{20cm}$$

CCS= contenido de carbono en suelo (tC/ha)

FC= fracción de carbono (%)

DA= densidad aparente (g/cm³)

VS_{20cm}= volumen de suelo a 20 cm de profundidad

Raíces finas: al centro de la parcela de muestreo, se extrajo un monolito de tierra de (50x20x10 cm) que fue tamizado (2 mm) para sacar todas las raíces finas. La muestra se pesó en campo para obtener el peso húmedo y se envió al LABSA-UNA para obtener el peso seco y el porcentaje de carbono. La biomasa total de raíces finas se multiplicó por la fracción de carbono para obtener el carbono total.

Finalmente, el carbono almacenado en el SAF-cacao resultó de la sumatoria del carbono almacenado en cada uno de los componentes. Todos los valores fueron extrapolados a hectárea. Los resultados del carbono total almacenado en cada SAF-cacao se compararon con la tabla de clasificación de los niveles de almacenamiento de carbono propuesto por Andrade et al. (2008) para determinar el potencial actual de los cacaotales de Waslala como sumideros de carbono. Para conocer la tasa de carbono total fijado por los cacaotales de Waslala se promediaron los valores de carbono fijado según edad y capacidad de almacenamiento por parcela muestreada.

Valoración económica del secuestro de carbono

Una vez obtenido el carbono total almacenado en los SAF-cacao de Waslala, se valoró teóricamente el pago anual que el productor percibiría por el servicio ambiental de secuestro de carbono aéreo. La conversión de carbono en CO₂ equivalente se realizó multiplicando el total de carbono fijado por 44/12 (relación entre el peso molecular del CO₂ con respecto al carbono): 1 t de carbono acumulado equivale a 3,67 toneladas de CO₂. Para estimar el pago potencial al productor se utilizó el precio modal pagado en los mercados voluntarios de carbono durante los últimos cinco años (US\$5 t Cer). El pago potencial al productor se expresó tanto para la reserva actual como por el carbono incremental fijado por año.

Análisis estadístico

Se aplicó un análisis de conglomerados usando 27 variables cuantitativas relacionadas con la estructura (densidad árboles dosel, riqueza, abundancia, área basal, biomasa), características biofísicas del sitio (pendiente, altitud) y de los cacaotales (área, edad) para generar grupos de SAF-cacao con diferencias entre grupos y similitud dentro de los grupos. Una vez conformados los grupos se aplicó un anava al 95% de confianza para determinar cuáles fueron las variables que difirieron estadísticamente en la formación de grupos de SAF-cacao. Finalmente, se calcularon estadísticas descriptivas y/o medidas resumen (media, desviación estándar, mínimo y máximo) para estimar la distribución del carbono almacenado por componentes (suelo, biomasa aérea, raíces, necromasa, hojarasca) y en función de los grupos de SAF-cacao conformados.

RESULTADOS

Caracterización del SAF-cacao de Waslala

Los cacaotales de Waslala se ubican a una altitud media de 412 m (153-774 m). La superficie y densidad media de los cacaotales es de 1,5 ha finca⁻¹ y 625 plantas ha⁻¹, respectivamente, con una edad promedio de 20 años (5-38 años). El 53% de los productores manejan dos parcelas de cacao en sus fincas y los demás manejan hasta seis parcelas. El rendimiento de cacao seco fue de 328 kg ha⁻¹ año⁻¹ (± 90 kg). Se inventariaron un total de 660 árboles de sombra de 18 especies en 5 ha de cacaotales, donde se obtuvo una densidad media de 153 árboles ha⁻¹ (20-260 árboles ha⁻¹). La riqueza promedio fue de siete especies (± 3 especies) en 1000 m². Del total de árboles inventariados el 50% se ubicó en el estrato bajo (1-10 m), el 33% en el estrato medio (11-20 m) y el 17% en el estrato alto (más de 20 m). El 75% de los cacaotales presentan solo dos estratos de sombra y el resto tres. Las especies dominantes en el estrato bajo fueron los cítricos (*Citrus* spp), las musáceas (*Mussa* spp), mango

(*Manguifera indica*), aguacate (*Persea americana*) y guayaba (*Psidium guajava*); en el estrato medio destacaron las especies de sombra: guabas (*Inga* spp), madero negro (*Gliricidia sepium*), guarumo (*Cecropia peltata*) y roble (*Tabebuia rosea*). En el estrato alto sobresalen los maderables de regeneración natural: laurel (*Cordia alliodora*), cedro (*Cedrela odorata*), nogal (*Juglans olan-chana*), guayabón (*Terminalia oblonga*) y la palma de pejibaye (*Bactris gasipaes*).

Carbono almacenado en los SAF-cacao

En promedio, los SAF-cacao almacenan $91,45 \pm 31,44$ t C ha⁻¹, aunque se registraron cacaotales con valores de carbono entre 27,35 t C ha⁻¹ y 158,30 t C ha⁻¹ (Cuadro 2). Los componentes del SAF-cacao que más carbono almacenaron en orden descendente fueron: suelo, biomasa aérea (plantas de cacao y árboles de sombra), raíces gruesas, raíces finas, necromasa y hojarasca. Las distribuciones de frecuencias de carbono total y en biomasa aérea fueron ligeramente asimétricas positivas y prácticamente mesokúrticas, lo que indica que las medias son buenos indicadores de las tendencias centrales de estos datos (Figura 2). Se puede inferir que los SAF-cacao de Waslala en promedio fijan carbono total a razón de 5,4 t C ha⁻¹ año⁻¹ y 2 t C ha⁻¹ año⁻¹ en biomasa aérea.

Grupos de SAF-cacao según variables biofísicas y estructurales

El análisis de conglomerados sugirió la conformación de cuatro grupos de SAF-cacao (Figura 3). Las variables que más aportaron a la diferenciación de los conglomerados fueron aquellas relacionadas con la diversidad arbórea del dosel de sombra (número de especies, densidad, área basal, biomasa). Las variables de sitio (altitud, pendiente) y de los cacaotales (edad, área, densidad de siembra) no fueron significativas en la conformación de los conglomerados (Cuadro 3). A continuación una descripción de los SAF-cacaos conformados:

Cuadro 2: Carbono almacenado (t C ha⁻¹) por componente en los SAF-cacao de Waslala, Nicaragua

Carbono en	Media	DE	Mediana	CV	Min	Max	Asimetría	Kurtosis	% del total
Suelo	47,5	15,8	44,6	33,4	3,9	90,0	0,4	1,2	51,9
Biomasa aérea	32,8	19,5	26,5	59,4	5,1	88,9	1,0	0,7	35,9
Raíces gruesas	6,9	3,6	5,8	52,6	1,4	16,9	0,9	0,4	7,5
Raíces finas	3,8	2,5	2,8	66,6	0,6	11,4	1,1	1,0	4,2
Necromasa	0,3	0,2	0,2	61,6	0,1	1,1	2,3	8,7	0,3
Hojarasca	0,3	0,2	0,2	61,6	0,1	1,1	2,3	8,7	0,3
Total	91,4	31,4	86,9	34,4	27,4	158,3	0,4	-0,7	100,0

C.V: coeficiente de variación; DE: desvío estándar; Min: valor mínimo; Max: valor máximo

- Conglomerado 1 (9 fincas): cacaotales de unos 20 años de edad, pendiente moderada, mayor densidad de plantas de cacao y mayor densidad arbórea y un dosel de sombra dominado por especies frutales.
- Conglomerado 2 (3 fincas): cacaotales más viejos (+21 años), menor densidad de plantas de cacao y menor pendiente, ubicados a mayor altitud y con un dosel de sombra dominado por la palma de pejibaye.
- Conglomerado 3 (25 fincas): cacaotales ubicados a una altitud media, con pendiente moderada, mayor superficie de cacao, densidad de siembra media y dosel de sombra menos diverso (pocas especies y baja densidad).
- Conglomerado 4 (13 fincas): cacaotales más jóvenes, ubicados a menor altitud, con mayor pendiente y un dosel de sombra con alta densidad de maderables en donde sobresale el laurel (*Cordia alliodora*).

Carbono almacenado por grupo de SAF-cacao

Los grupos de SAF-cacao conformados tuvieron diferentes contenidos de carbono (Cuadro 3). El primer grupo integró pocos cacaotales (18%), pero con alto contenido de carbono; el segundo grupo reunió a los tres cacaotales (6%) que más carbono fijaron; el tercer grupo (integrado por el 50% de las fincas) almacenó significativamente menos carbono que el resto de los grupos debido a que presentó un dosel de sombra menos diverso (pocas especies y baja densidad arbórea) y, por consiguiente, el carbono almacenado en la biomasa aérea fue un 45-50% menos que los restantes grupos. Finalmente, el cuarto grupo reunió al 26% de los cacaotales con alto nivel de carbono. El carbono almacenado en la biomasa aérea, raíces gruesas y raíces finas fue estadísticamente diferente entre los grupos. El carbono almacenado en los otros componentes de los SAF-cacao fue estadísticamente similar entre los grupos.

Clasificación del nivel de carbono almacenado en los SAF-cacao de Waslala

Con base en la escala de clasificación propuesta por Andrade et al. (2008), el 56% de los SAF-cacao de Waslala se ubican en niveles medio y alto de almacenamiento de carbono, y el 44% en niveles bajo y muy bajo. (Cuadro 4).

Valoración económica del servicio ambiental por almacenamiento de carbono

Si cada productor maneja en promedio 1 ha de cacao por finca, y los SAF-cacao de Waslala almacenan en promedio 91,45 tC ha⁻¹, equivalentes a 335,58 t CO₂, el stock actual de carbono estaría valorado US\$1678 ha⁻¹. El carbono total incremental en los SAF-cacao se estimó en 5,4 t C ha⁻¹ año⁻¹, equivalentes a 19,8 t CO₂ ha⁻¹ año⁻¹; por consiguiente, cada productor podría percibir US\$99 ha⁻¹ año⁻¹. Sin embargo, la mayoría de mercados de carbono pagan solo por el carbono aéreo fijado; en ese caso, la tasa de carbono aéreo fue 2 t C ha⁻¹ año⁻¹ que equivale a 7,34 t CO₂ ha⁻¹ y a US \$36 ha⁻¹ año⁻¹. Este sería el pago real que recibiría el productor por concepto de secuestro de carbono. En el Cuadro 5 se presenta la valoración económica del servicio ambiental de secuestro de carbono aéreo por conglomerado.

DISCUSION

Las existencias de carbono total y en biomasa aérea en los SAF-cacao de Waslala medidas en este estudio están dentro de los rangos encontrados en otras partes del mundo. Por ejemplo, los cacaotales de Talamanca, Costa Rica almacenaron en 25 años entre 112-132 t C ha⁻¹ en la madera de los árboles de cacao y de sombra a un ritmo similar (4,48-5,28 t C ha⁻¹) al encontrado en los cacaotales de Waslala (Beer et al. 2003, Andrade et al. 2008). La biomasa aérea de los cacaotales (12-20 años

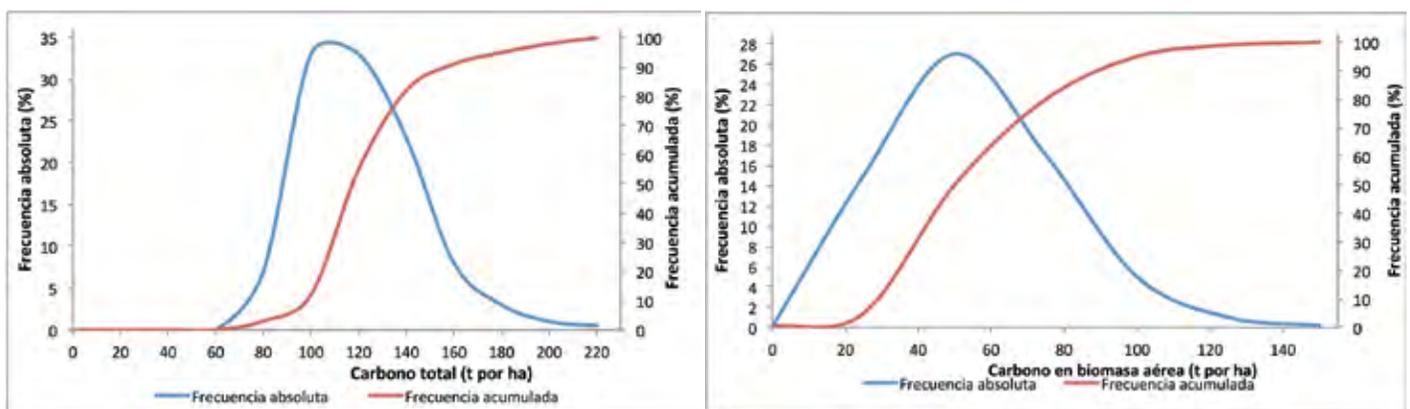


Figura 2. Frecuencias de sistemas agroforestales de cacao: A) carbono total (t ha⁻¹); B) carbono en biomasa aérea (t ha⁻¹) en Waslala, Nicaragua

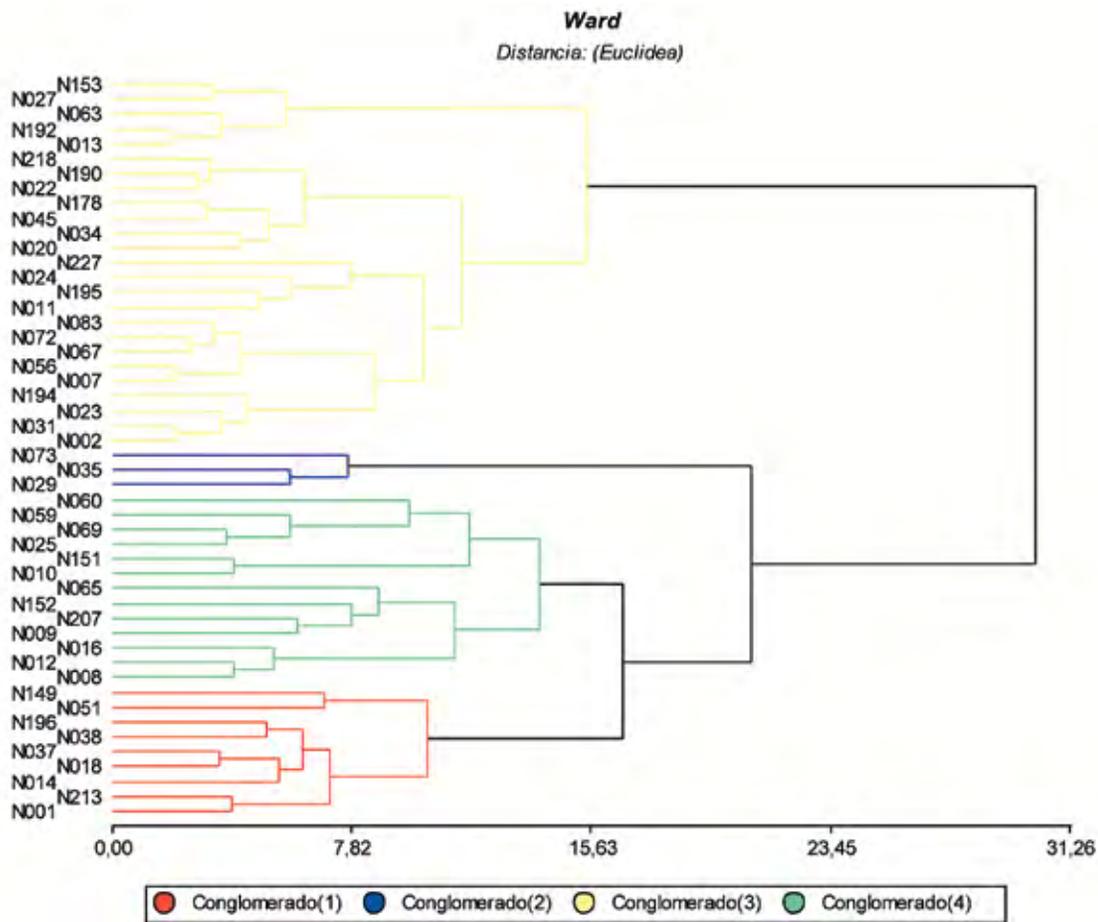


Figura 3. Dendrograma de SAF-cacao con base en las variables biofísicas y estructurales en Waslala, Nicaragua

de edad) en las provincias de San Martín y Mariscal Cáceres, Perú almacenan entre 29-45 t C ha⁻¹ a razón de 1,5-4,5 t C ha⁻¹ año⁻¹ (Concha et al. 2007). Cacaotales de seis años de edad en el Valle de Juliana, Bahía, Brasil, con sombra de caucho (*Hevea brasiliensis*) de 34 años de edad almacenan en la biomasa aérea 106,80 t C ha⁻¹ (Cotta et al. 2006.). En Caldas, Colombia se estimó que el laurel (200 árboles ha⁻¹) en cacaotales fija 3,3 t C ha⁻¹ año⁻¹ y alcanza un total de 49,4 t C ha de carbono a los 15 años de edad (Aristizábal y Guerra 2002). Albrecht y Kandji (2003) reportan cantidades similares de carbono almacenado en SAF de zonas bajas húmedas de Sudamérica (39-102 t C ha⁻¹). Cacaotales del tipo Cabruca en Bahía, Brasil fijan más carbono que los SAF-cacao de Waslala; la fijación de estos sistemas es similar a los bosques naturales y significativamente mayor que los cacaotales con sombra monoespecífica (Gama-Rodrigues et al. 2010).

Se ha comprobado que después del suelo, la vegetación arriba del suelo es el segundo mayor reservorio de carbono en SAF y plantaciones forestales de la región caribeña de Costa Rica (Montagnini y Finney 2011). La densidad arbórea media en el dosel de sombra de los SAF-cacao de Waslala fue de 153 árboles ha⁻¹ (78-224 árboles ha⁻¹), cuya biomasa arriba del suelo (plantas de cacao y dosel arbóreo) aportó el 36% del carbono total almacenado en el sistema. En este estudio no se incluye el carbono fijado por las musáceas debido al aporte poco significativo y naturaleza poco duradera de la biomasa (Arévalo et al. 2003).

El potencial actual de los SAF-cacao de Waslala para capturar y fijar carbono es limitado, dada la baja diversidad arbórea (riqueza y densidad) en el dosel de sombra de los cacaotales. Se identificaron cuatro tipologías de cacaotales, según la composición botánica y

Cuadro 3. Valores medios de las variables biofísicas y estructurales de los SAF-cacao de Waslala, Nicaragua

Variables biofísicas y estructurales	C1 (n=9)	C2 (n=3)	C3 (n=25)	C4 (n=13)	Valor P
Altitud (m)	456,89a ±55,04	509a ±95,33	402,24a ±33,02	375,92a ±45,79	0,4988
Pendiente (%)	16,22a ±3,75	12,33a ±6,49	15,92a ±2,25	18,38a ±3,12	0,8383
Edad (años)	19,67a ±2,72	21,33a ±4,71	19,72a ±1,63	14,23a ±2,26	0,2133
Área cacao (ha)	1,89a ±0,37	2,1a ±0,64	2,42a ±0,22	1,88a ±0,31	0,4561
Riqueza (# spp en 1000 m ²)	6,44ab ±0,73	6ab ±1,27	4,96a ±0,44	7,77b ±0,61	0,0056
Densidad cacao (plantas ha ⁻¹)	589,67a ±32,65	503,33a ±56,55	579,96a ±19,59	532,54a ±27,16	0,3002
Densidad frutales (árboles ha ⁻¹)	101,11b ±17,65	46,67ab ±30,58	41,2a ±10,59	70ab ±14,69	0,0368
Densidad maderables (árboles ha ⁻¹)	18,89a ±12,33	16,67a ±21,36	20,8a ±7,4	102,31b ±10,26	<0,0001
Densidad palmas (árboles ha ⁻¹)	2,22a ±3,48	96,67b ±6,03	4a ±2,09	0,0a ±2,9	<0,0001
Densidad otros (árboles ha ⁻¹)	20a ±8,01	6,67a ±13,87	12,8a ±4,8	51,54b ±6,66	0,0002
Densidad total (árboles ha ⁻¹)	731,89ab ±44,27	670ab ±76,67	658,76a ±26,56	756,38b ±36,83	0,1595
AB-cacao (m ² ha ⁻¹)	9,73ab ±1,73	9,66 ab ±3	12,18b ±1,04	8,55a ±1,44	0,2116
AB-frutales (m ² ha ⁻¹)	7,63b ±0,91	4,33ab ±1,57	1,49a ±0,54	2,56a ±0,75	<0,0001
AB-maderables (m ² ha ⁻¹)	0,92a ±0,7	0,76a ±1,21	1,12a ±0,42	5,5b ±0,58	<0,0001
AB-palmas (m ² ha ⁻¹)	0,05a ±0,07	2,22b ±0,12	0,08a ±0,04	0a ±0,06	<0,0001
AB-otros (m ² ha ⁻¹)	1,32ab ±0,5	1,2ab ±0,87	0,45a ±0,3	2,11b ±0,42	0,0221
AB-total (m ² ha ⁻¹)	19,65a ±2,02	18,17a ±3,5	15,33a ±1,21	18,71a ±1,68	0,2072
Bioma-cacao (t ha ⁻¹)	17,2a ±3,81	17,76a ±6,6	22,7a ±2,29	15,43a ±3,17	0,2705
Bioma-frutales (t ha ⁻¹)	75,41c ±7,43	42,53b ±12,88	8,98a ±4,46	8,26a ±6,19	<0,0001
Bioma-maderables (t ha ⁻¹)	4,16a ±6,97	3,37a ±12,08	4,98a ±4,18	39,19b ±5,8	0,0001
Bioma-palmas (t ha ⁻¹)	0,3a ±0,4	13,81b ±0,69	0,5a ±0,24	0,0a ±0,33	<0,0001
Bioma-otros (t ha ⁻¹)	11,57ab ±5,22	13,97ab ±9,04	2,69a ±3,13	16,4b ±4,34	0,0721
Bioma-aérea total (t ha ⁻¹)	108,64c ±9,4	91,43bc ±16,28	39,85a ±5,64	79,27b ±7,82	<0,0001
Bioma-raíces gruesas (t ha ⁻¹)	21,75c ±1,73	18,75bc ±3,0	8,94a ±1,04	16,3b ±1,44	<0,0001
Bioma-raíces finas (t ha ⁻¹)	13,29c ±1,16	11,07bc ±2,01	4,05a ±0,7	9,69b ±0,96	<0,0001
Bioma-hojarasca (t ha ⁻¹)	1,14a ±0,14	0,77a ±0,25	0,97a ±0,09	1,1a ±0,12	0,4982
Bioma-necromasa (t ha ⁻¹)	0,48a ±0,12	0,59a ±0,21	0,62a ±0,07	0,57a ±0,1	0,8244
Carbono suelo	48,05ab ±5,06	67,47b ±8,77	43,54a ±3,04	49,76ab ±4,21	0,0803
Carbono en biomasa aérea	54,32c ±4,7	45,72bc ±8,14	19,92a ±2,82	39,63b ±3,91	<0,0001
Carbono raíces gruesas	10,87c ±0,87	9,37bc ±1,5	4,47a ±0,52	8,15b ±0,72	<0,0001
Carbono raíces finas	6,65c ±0,58	5,53bc ±1,0	2,02a ±0,35	4,85b ±0,48	<0,0001
Carbono necromasa	0,24a ±0,06	0,29a ±0,11	0,31a ±0,04	0,28a ±0,05	0,8244
Carbono hojarasca	0,24a ±0,06	0,29a ±0,11	0,31a ±0,04	0,28a ±0,05	0,8244
Carbono total	120,37b ±7,64	128,68b ±13,22	70,57a ±4,58	102,96b ±6,35	<0,0001

AB: área basal; Bioma: Biomasa; ±: Desviación estándar. Letras iguales en la misma fila no son estadísticamente significativas.

distribución de individuos por especie. En la mayoría de las tipologías, el suelo fue el componente con mayor contenido de carbono (50-60% del total de carbono fijado) producto de la continua deposición de hojarasca, residuos de la poda del cacao y la regulación de sombra (Gama-Rodrigues et al. 2010). El SAF-cacao que fijó más carbono fueron los cacaotales más jóvenes (menos de 19 años), cuyo dosel de sombra retuvo gran densidad de frutales y palmas de pejibaye. El sistema que menos carbono almacenó fue el menos diverso

estructuralmente, donde la biomasa aérea aportó solo el 28,8% del total de carbono fijado. En este tipo de cacaotales es evidente la necesidad de mejorar la composición botánica y estructura del dosel de sombra mediante la plantación de especies que aumenten el potencial de secuestro de carbono. Se podrían seleccionar especies que acumulen carbono en raíces gruesas en las capas profundas del suelo (Nair et al. 2009), o que crezcan rápido pero que produzcan madera de alta densidad (Lindner 2010).

Cuadro 4. Nivel de carbono almacenado en los SAF-cacao de Waslala, Nicaragua

	Nivel de carbono almacenado		Total fincas	Porcentaje
	Alto	120-159,9	8	16
	Medio	80-119,9	20	40
	Bajo	40-79,9	20	40
	Muy bajo	0-39,9	2	4
	Total		50	100

Cuadro 5. Valoración económica del servicio ambiental de secuestro de carbono aéreo por conglomerado de SAF-cacao en Waslala, Nicaragua

VARIABLES/GRUPOS	C1 (n=9)	C2 (n=3)	C3 (n=25)	C4 (n=13)
Edad promedio (años)	19	21	19	14
Carbono aéreo (t ha ⁻¹)	54,32	45,72	19,92	39,63
CO ₂ Eq* (t ha ⁻¹)	199,35	167,90	73,10	145,44
CO ₂ Eq* (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	10,49	7,99	3,84	10,39
Pago por stock (US t CO ₂ ha ⁻¹)	996,75	839,5	365,5	727,2
Pago incremental (US t ha ⁻¹ año ⁻¹)	52,45	39,95	19,2	51,95

*Eq: Equivalente. 1 t C= 3.67 de CO₂ fijado.

Una vez estimado el carbono almacenado en un SAF, conceptualmente el proceso de valoración económica del servicio ambiental es relativamente fácil. En la práctica, sin embargo, la valoración se complica por el hecho de que todavía no existe un mercado abierto, líquido y estable para el secuestro de carbono (Ramírez y Gómez 2002). El beneficio monetario podría ser un incentivo económico y ecológico para que los productores de Waslala planten y manejen árboles útiles dentro de sus cacaotales (Somarriba y Harvey 2003, Somarriba et al. 2008, Montagnini y Finney 2011). Las autoridades municipales, centros de estudios, organizaciones productivas y proyectos agroforestales de desarrollo de Waslala pueden usar los resultados de esta investigación para “negociar” con los mercados voluntarios y proyectos que incentiven el pago a los productores de cacao por la provisión de un servicio ambiental de importancia global. En Cerda et al. (en este mismo número de la RAFA) se ofrece un cuadro con las direcciones de los estándares más usados para certificar carbono.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los SAF-Cacao de Waslala registraron carbono en biomasa aérea y total dentro de los rangos encontrados en otras áreas cacaoteras del mundo. El potencial para capturar carbono por los SAF-cacao es limitado debido a la baja diversidad arbórea encontrada. Más de la mitad de los SAF-Cacao de Waslala (56%) tuvieron un nivel de

almacenamiento de carbono entre medio-alto. El 52% del carbono total se fijó en el suelo, el 36% en el dosel (las plantas de cacao y árboles de sombra), el restante 12% se almacena en la hojarasca, necromasa y raíces. Se conformaron cuatro grupos de SAF Cacao que se diferenciaron por sus características de diversidad del dosel y acumulación de biomasa y carbono. Se recomienda concientizar a los productores sobre la importancia de sus cacaotales en la provisión de servicios ambientales y su posible impacto en la economía familiar. Si se mejoran las condiciones de sombra en los SAF-cacao menos diversos con el establecimiento de árboles de porte alto y de rápido crecimiento, madera densa, se podría aumentar el potencial de secuestro de carbono y la generación de productos valiosos para las familias. Los resultados y recomendaciones del estudio podrán ser usados por centros de estudio, organizaciones productivas y gobiernos municipales de Waslala para “negociar” una eventual venta de certificados de emisiones reducidas en los mercados voluntarios de carbono.

LITERATURA CITADA

- Albrecht, A; Kandji, ST. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99(1-3): 15-27.
- 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 las Américas*. 46: 45-50.

- Arévalo, L; Palm, C. 2003. Manual para la determinación de las reservas de carbono en diferentes usos de la tierra en Perú. Lima, Perú, Icrاف-Codesu-Inia-Inrena. 57 p.
- Aristizábal, J; Guerra, A. 2002. Estimación de la tasa de fijación de carbono en el sistema agroforestal nogal cafetero *Cordia alliodora*-cacao *Theobroma cacao*-plátano *Musa paradisiaca*. Tesis de grado (Ingeniero Forestal). Bogotá, Colombia, Universidad Distrital de Bogotá. 108 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.
- Concha, YJ; Alegre, JC; Pocomucha, V. 2007. Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en el departamento de San Martín, Perú. *Ecología Aplicada* 6(1-2): 75-82.
- Cotta, MK; Gonçalves, LA; Valverde, SR; Nogueira de Paiva, H; Virgens Filho, AC; Lopes, M. 2006. Análise econômica do consórcio seringueira-cacau para geração de certificados de emissões reduzidas. *Revista Árvore* 30(6): 969-979.
- Cuéllar, N. 1999. Los servicios ambientales del agro: el caso del café de sombra en El Salvador. *Prisma* 34: 1-16.
- Dixon, K. 1995. Sistemas agroforestales y gases de invernadero. *Agroforestería de las Américas* 2(7): 22-26.
- Gama-Rodrigues, F; Nair, PKR, Nair, DV; Baligar, CV; Gama-Rodrigues, A; Machado, R. 2010. Carbon storage in soil size fractions under two cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Environmental Management* 45: 274-283.
- Hamilton, K; Sjardin, M; Peters-Stanley, M; Marcello, T. 2010. Building bridges: State of the voluntary carbon market. *Forest Trends. A Report by Ecosystems Marketplace and Bloomberg New Energy Finance*. 130 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change); WMO (World Meteorological Organization); UNEP (United Nations Environmental Program). 2003. *Climate change 2000: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland. 184 p.
- Lindner, A. 2010. Biomass storage and stand structure in a conservation unit in the Atlantic Rainforest: The role of big trees. *Ecological Engineering* 36: 1769-1773.
- Medina C; Connolly, R; Corea, C. 2008. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas productivos promovidos por el Programa Social Ambiental Forestal en Nicaragua. *La Calera* 9: 42-47.
- Montagnini, F; Finney, C. 2011. Payments for environmental services in Latin America as a tool for restoration and rural development. *AMBIO* (2011)40: 285-297.
- Montagnini, F; Nair, PKR. 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61: 281-295.
- Nair, PKR, Kumar, BM, Nair, VD. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition Soil Science* 172: 10-23.
- Orozco, L; Deheuvels, O. 2007. El cacao en Centroamérica: resultados del diagnóstico de familias, fincas y cacaotales. Informe final de diagnóstico, Proyecto Cacao Centroamérica. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 148 p.
- Ortiz, E. 1997. Refinement and evaluation of two methods to estimate aboveground tree biomass in tropical forest. Doctoral Dissertation. New York, College of Environmental Sciences and Forestry. State University of New York (SUNY).
- Philipp D; Gamboa, W. 2003. Observaciones sobre el sistema mucuna-maíz en laderas de Waslala, región atlántica de Nicaragua. *Agronomía Mesoamericana* 14: 215-221.
- Ramírez, OA; Gómez, M. 2002. Estimación y valoración económica del almacenamiento de carbono. *Revista Forestal Centroamericana* 2(27): 17-22.
- Rugnitz, MT; Chacón, ML. 2008. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Belem, Brasil, IA/ICRAF. 61 p.
- Schroeder, P. 1994. Carbon Storage benefits of agroforestry Systems. *Agroforestry Systems* 27: 89-97.
- Segura, M. 1999. Valoración del servicio almacenamiento de carbono en bosques privados en el Área de Conservación Cordillera Volcánica Ventral de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 132 p.
- Segura, M; Kanninen, M. 2005. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica* 37(1): 2-8.
- Somarriba, E; Andrade, HJ; Segura, M; Villalobos, M. 2008. ¿Cómo fijar carbono atmosférico, certificarlo y venderlo para complementar los ingresos de productores indígenas de Costa Rica? *Agroforestería en las Américas*. 46: 81-88.
- Somarriba, E; Harvey, C. 2003. ¿Cómo integrar simultáneamente producción sostenible y conservación de la biodiversidad en cacaotales orgánicos indígenas? *Agroforestería en las Américas* 10: 37-38.
- Suarez, D. 2003. Cuantificación y valoración económica del servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café en la Comarca Yásica Sur, Matagalpa, Nicaragua. Tesis. Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 117 p.
- Szott, LT; Arévalo-López, LA; Pérez, J. 1993. Allometric relationships in Pijuayo (*Bactris gasipaes*). In Mora-Urpí, J; Szott, LT; Murillo, M; Patiño, VM. (Eds.). *Congreso Internacional sobre Biología, Agronomía e Industrialización del Pijuayo* (4, Iquitos, PE, 1989). San José, Costa Rica, Editorial UCR. p. 91-114.
- Winjum, JK; Dixon, RK; Schroeder, PE. 1992. Estimating the global potential of forest and agroforest management practices to sequester carbon. *Water, Air and Soil Pollution* 64: 213-223.