

## 4. **ARTÍCULO 1. ACUMULACIÓN DE CARBONO EN LA BIOMASA DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES DE CACAO EN WASLALA, NICARAGUA**

### 4.1 INTRODUCCIÓN

El calentamiento global está generando un aumento mundial en la temperatura del aire, del océano, provocando el deshielo y consecuente aumento del nivel del mar en nuestro planeta (IPCC 2007). El calentamiento global es producido por el incremento en la concentración de gases efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Los principales gases son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nítrico (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>) y halocarbonos responsables del llamado efecto invernadero (IPCC 2001). Los GEI han contribuido a elevar la temperatura mundial promedio en 0,6 (0,4-0,8) °C, entre 1901 y 2000 (IPCC 2007). Las proyecciones actuales apuntan a un incremento adicional mayor (1 a 3,5 °C) en los próximos 100 años (UNFCCC 2007).

La función de los árboles en la agricultura, silvicultura y otros usos del suelo como sumideros de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico, son un potencial natural de lucha contra el cambio climático (Plieninger 2011). Se estima que los árboles ocupan el 46% de la tierra agrícola (FAO 2010) y la combinación de árboles con cultivos se practica en más de un millón de hectáreas en países en desarrollo y en menor escala en países industrializados (Nair et ál. 2010). Los sistemas agroforestales (SAF) almacenan entre 28 y 200 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono en la biomasa viviente (arriba y bajo del suelo), materia orgánica muerta (desechos y madera muerta) y materia orgánica del suelo (Isaac et ál. 2005; IPCC 2006; Smiley y Kroschel 2008). Las tasas anuales de acumulación de carbono muestran que los SAF de cacao con *Cordia alliodora* pueden remover de la atmósfera entre 1,7 y 2,5 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en la biomasa aérea (Ortiz et ál. 2008). En cambio, SAF con pequeños productores en los trópicos reportan potenciales de secuestro de 1,5 a 3,5 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Montagnini y Nair 2004).

Los productores de la Cooperativa de Servicios Agroforestales y de Comercialización de cacao CACAONICA en Waslala, Nicaragua cultivan el cacao bajo diferentes tipos de sombra, según variantes en la composición y número de especies de dosel de sombra. La mayoría de estos sistemas están dominados por frutales (*Inga sp*, *Boureria huanita*,

*Manguifera indica*) maderables (*Cordia alliodora*, *Tabebuia rosea*) y palmas (*Bactris gasipaes*) que proveen madera, leña, frutas y otros servicios al agricultor. Este grupo de especies remueve importantes cantidades de carbono de la atmosfera y brindan la oportunidad de ofrecer un servicio ambiental (mitigación del cambio climático) a la sociedad (Beer et ál. 2003).

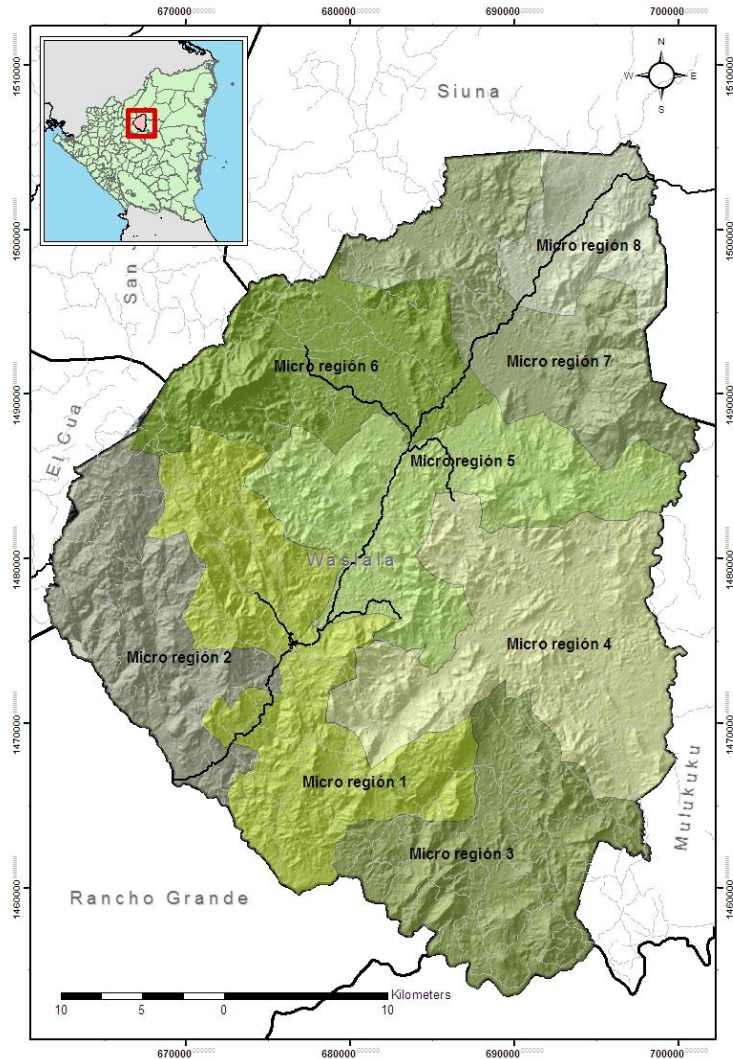
En este estudio se cuantificó la tasa de acumulación anual de carbono de la biomasa encima (árboles de dosel y cacao, necromasa fina y gruesa y hojarasca) y debajo del suelo (raíces finas y gruesas) en los SAF cacao de los socios de la cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua. Los resultados del estudio servirán para a) mejorar la capacidad de almacenamiento y fijación de los actuales SAF y b) orientar a CACAONICA en la venta de carbono para aumentar el nivel de ingresos de las familias socias.

## **4.2 MATERIALES Y MÉTODOS**

### ***4.2.1 Descripción del área de estudio***

El estudio se realizó en nueve parcelas agroforestales de cacao de productores asociados a la Cooperativa de Servicios Agroforestales y de Comercialización de Cacao (CACAONICA), en el municipio de Waslala, departamento de Matagalpa, Nicaragua (Figura 5). El municipio se ubica entre 13°20' - 13°31' latitud norte y 85°13' - 85°22' longitud oeste.

La región de Waslala tiene una topografía quebrada, con pendientes que alcanzan hasta 32% (Philipp y Gamboa 2003) y elevaciones que oscilan entre 420 y 1247 m. Las temperaturas medias anuales varían entre 22 a 26°C, con precipitaciones anuales entre 1800 y 2500 mm distribuidos en 8 a 9 meses en el año (MESOTERRA 2010). La humedad relativa media alcanza el 84% (Philipp y Gamboa 2003). Los suelos son pobres en nutrientes por el alto contenido de hierro y aluminio (Philipp y Gamboa 2003). El pH varía entre 5,8 a 6,3 (Estrada 2010). La zona de vida prevalente es de Bosque tropical húmedo (Holdridge 1979).



*Figura 5. Mapa de Ubicación de Waslala. Nicaragua*

Fuente: Alcaldía Municipal de Waslala 2011

La región de Waslala tiene una topografía en quebrada, con pendientes que alcanzan hasta 32% (Philipp y Gamboa 2003) y elevaciones que oscilan entre 420 y 1247 m. Las temperaturas medias anuales varían entre 22 a 26°C, con precipitaciones anuales entre 1800 y 2500 mm distribuidos en 8 a 9 meses en el año (MESOTERRA 2010). La humedad relativa media alcanza el 84% (Philipp y Gamboa 2003). Los suelos son pobres en nutrientes por el alto contenido de hierro y aluminio (Philipp y Gamboa 2003). El pH varía entre 5,8 a 6,3 (Estrada 2010). La zona de vida prevalente es de Bosque tropical húmedo (Holdridge 1979).

El Municipio de Waslala cubre 109.155 ha, las pasturas ocupan al menos 35% de la superficie total, los cultivos perennes representan cerca del 5% [(3%) y café (2%)], los cultivos anuales (principalmente maíz y frijol) cubren el 17-20% de la superficie total, las zonas boscosas cubren el 11% y el resto del territorio es ocupado por tacotales y otros bosques secundarios jóvenes. Los principales medios de vida de las familias son la ganadería y la producción de granos básicos, seguido de cacao y café (MESOTERRA 2010).

#### ***4.2.2 Estimación de carbono en parcelas permanentes de medición (PPM)***

El Proyecto Cacao Centroamérica (CATIE-MAP) en Waslala, cuenta con una red de 38 parcelas permanentes de medición (PPM) de 1000 m<sup>2</sup> (20 x 50 m) cada una, ubicadas en diferentes SAF de cacao, bajo diferentes escenarios de fragmentación del paisaje local, altitud, pendiente, usos colindantes y diferentes diseños agroforestales. Estas parcelas permiten estudiar los servicios ambientales que brindan los SAF en almacenamiento de carbono, calidad de suelos, diversidad de macrofauna, herpetofauna, polinizadores del cacao y vegetación leñosa. Para este estudio se seleccionaron nueve SAF cacao de esta red y se re-midió la biomasa acumulada en estos SAF.

#### ***4.2.3 Metodología***

El carbono acumulado en la biomasa del dosel, cacao, necromasa gruesa (>10 cm), necromasa fina (<10 cm), raíces gruesas (>5 mm), raíces finas (<5 mm) y hojarasca se midió en 2009 y en el 2011. El cambio anual promedio en las existencias de carbono entre estos dos periodos se estimó mediante la siguiente relación (IPCC 2006).

$$\Delta C = C_{t_2} - C_{t_1} / t_2 - t_1 \quad [1]$$

**Donde:**

$\Delta C$  = cambio anual promedio en las existencias de carbono (Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>)

$C_{t_1}$  = existencias de carbono promedio en el 2011 (Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>)

$C_{t_2}$  = existencias de carbono promedio en el 2009 (Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>)

$t_1, t_2$  = periodo de medición de carbono

Para la estimación de carbono en las PPM se utilizó la metodología propuesta por el Proyecto Cacao Centroamérica, que tiene bases en la metodología del IPCC (2003) y Segura (2005). Cada PPM se dividió en 10 sub parcelas de 10 x 10 m (Figura 6), donde se ubicaron puntos de muestreo y se recolectaron las muestras de carbono.



Figura 6. Puntos de muestreo en cada Parcela Permanente de Medición para las mediciones de carbono (PCC 2010).

La estimación de carbono de la hojarasca y necromasa fina (<10 cm de diámetro) se obtuvo extrayendo de 10 sub muestras parciales de una muestra compuesta de biomasa por PPM (IPCC 2003; Espín y Cerda 2010). La necromasa gruesa (>10 cm de diámetro) se midió a lo largo de dos transectos (50 m y 20 m) perpendiculares en la PPM (Van Wagner 1968). El contenido de carbono de las raíces gruesas (>5 mm de diámetro) del dosel y el cacao se estimaron con modelos alométricos basados en biomasa aérea (IPCC 2003). Las muestras de carbono en raíces finas (<5 mm de diámetro) se obtuvieron a una profundidad de 20 cm en cinco puntos en la línea central de la PPM. El carbono del dosel encima del suelo (fuste, ramas y hojas) se estimó utilizando ecuaciones alométricas basadas en mediciones de circunferencia a 1,30 m de la base del tronco (Rugnitz et ál. 2008). La estimación del carbono del cacao se hizo midiendo el tronco a 30 cm del nivel del suelo (Deheuvels et al. 2011) y aplicando una ecuación alométrica de biomasa aérea (Cuadro 2). La conversión de biomasa a carbono en los compartimentos del dosel, cacao, necromasa gruesa y raíces gruesas se calcularon multiplicando un factor 0,5 (IPCC 2003). La fracción de carbono en las raíces finas, necromasa fina y hojarasca se determinaron en el laboratorio de suelos y aguas de la

Universidad Nacional de Agraria (LABSA-UNA) en Nicaragua, mediante el método de combustión seca en un equipo auto-analizador (MacDicken, 1997). Todas las estimaciones de carbono por encima y debajo del suelo fueron promediadas y extrapoladas a Mg C ha<sup>-1</sup> por cada PPM.

Cuadro 2. Modelos alométricos utilizados para la estimación de carbono en árboles de sombra y cacao de los SAF de cacao en Waslala, Nicaragua

ESPECIE	MODELO ALOMÉTRICO	FUENTE
Frutales	$Bt = 10^{(-1,11 + 2,64 * \log(\text{dap}))}$	Andrade <i>et al</i> (en preparación)
Laurel ( <i>Cordia alliodora</i> )	$Bt = 10^{((-0,76 + 2,38 * \log(\text{dap}))}$	Andrade <i>et al</i> (en preparación)
Pegibaye ( <i>Bactris gassipaes</i> )	$Bt = 0,74 * Ht^2$	Szott <i>et al</i> (1993)
Arboles hasta 50 cm dap	$Bt = 10^{((2,3408 * (\log(\text{dap}))) - 0,9578)}$	Ortiz (1997)
Arboles mayor 50 cm dap	$Bt = \text{Exp}(-2,289 + 2,649 * \text{Ln}(\text{dap}) - 0,021 * (\text{Ln}(\text{dap}))^2)$	
Cacao ( <i>Teobroma cacao</i> )	$Bt = 10^{(-1,63 + 2,63 * \log(\text{dap}_{30}))}$	Andrade <i>et al</i> (en preparación)
Raíces	$B \text{ raíces} = \text{Exp}(-1,0587 + 0,8836 * \text{Ln}(Bt))$	IPCC (2003)

*Bt*: biomasa total arriba del suelo (Kg/árbol) - *Log*: Logaritmo base 10; *Ln*: Logaritmo natural - *dap*: diámetro a la altura del pecho; - *dap30*: diámetro del tronco a 30 cm.

#### 4.2.3.1 Análisis estadístico

El carbono de los árboles de sombra, cacao, hojarasca, necromasa y raíces fueron analizados mediante estadística descriptiva utilizando el programa estadístico Infostat (Di Rienzo et ál. 2009). Las tasas de acumulación de carbono de los diferentes compartimentos se presentan en términos de media y desviaciones estándar que caracterizan las 9 PPM en Waslala.

### 4.3 RESULTADOS

Los cacaotales de Waslala acumularon 3,3±1,6 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de carbono en la biomasa arriba y debajo del suelo, con variaciones entre 0,9 a 5,5 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Cuadro 3). La biomasa aérea del dosel y cacao acumularon la mayor tasa de carbono anual (39%), seguida de las raíces finas y gruesas (23%), necromasa fina y gruesa (21%) y hojarasca (17%).

Cuadro 3. Tasa de acumulación anual de carbono ( $Mg\ C\ ha^{-1}$ ) de la biomasa en 9 Parcelas Permanentes de Medición en cacaotales de Waslala, Nicaragua

Nro. parcela	Edad cacaotal (años)	C-Total aereo				C-Total raices				C-Total necromasa				C- Total Hojarasca		C-Total ( $Mg\ ha^{-1}$ )		Fijación (2009-2011)	Fijación anual (Mg)
		Dosel sombra		Arboles cacao		R.finas <5mm		R.grue. >5mm		Necr. <10 cm		Necr. >10 cm		2009	2011	2009	2011		
		2009	2011	2009	2011	2009	2011	2009	2011	2009	2011	2009	2011	2009	2011	2009	2011		
N23	25	88.8	93.3	3.2	5.8	0.01	0.97	18.6	21.0	0.10	0.31	0	0.45	0.13	1.08	110.8	121.9	11.0	5.5
N11	22	3.3	3.5	8.3	12.7	0.19	2.16	2.8	3.8	0.12	0.60	0	0	0.16	1.46	14.8	24.2	9.5	4.7
N02	27	12.4	15.4	2.2	5.4	0.02	0.27	4.5	6.0	0.06	0.55	0	0	0.11	0.86	19.3	28.4	9.1	4.6
N09	25	12.5	17.9	12.0	10.1	0.18	0.92	6.8	7.8	0.16	0.57	0.38	1.06	0.48	1.19	32.6	39.5	6.9	3.4
N10	22	37.3	37.6	3.4	6.7	0.15	1.30	10.8	11.5	0.08	0.09	0	0.22	0.20	0.95	51.9	58.3	6.5	3.2
N26	25	7.9	11.5	12.0	11.8	0.27	0.64	5.4	6.4	0.09	0.62	0.001	0	0.22	1.08	25.9	32.1	6.2	3.1
N01	26	18.1	18.0	5.8	7.8	0.00	0.76	6.7	6.8	0.12	0.27	0	0	0.05	1.89	30.7	35.5	4.8	2.4
N07	28	38.6	30.9	7.6	8.5	0.23	1.39	12.6	11.0	0.19	0.50	0	8.28	0.40	1.93	59.6	62.6	2.9	1.5
N18	25	42.8	44.2	11.2	9.4	0.07	0.72	12.3	12.0	0.17	0.46	0	0	0.24	1.74	66.8	68.5	1.8	0.9
<b>C-Total</b>		<b>261.6</b>	<b>272.3</b>	<b>65.7</b>	<b>78.1</b>	<b>1.1</b>	<b>9.1</b>	<b>80.5</b>	<b>86.3</b>	<b>1.1</b>	<b>4.0</b>	<b>0.4</b>	<b>10.0</b>	<b>2.0</b>	<b>12.2</b>	<b>412.3</b>	<b>471.0</b>	<b>58.6</b>	<b>29.3</b>
<b>C promedio</b>		<b>29.1</b>	<b>30.3</b>	<b>7.3</b>	<b>8.7</b>	<b>0.1</b>	<b>1.0</b>	<b>8.9</b>	<b>9.6</b>	<b>0.1</b>	<b>0.4</b>	<b>0.04</b>	<b>1.1</b>	<b>0.2</b>	<b>1.4</b>	<b>45.8</b>	<b>52.3</b>	<b>6.5</b>	<b>3.3</b>
<b>C anual fijado</b>			<b>0.59</b>		<b>0.69</b>		<b>0.44</b>		<b>0.32</b>		<b>0.16</b>		<b>0.54</b>		<b>0.57</b>				<b>3.3</b>
<b>% fijación C</b>			<b>18</b>		<b>21</b>		<b>13</b>		<b>10</b>		<b>5</b>		<b>16</b>		<b>17</b>				<b>100</b>

El dosel de sombra acumula anualmente el 18% del carbono contenido en la biomasa arriba y debajo del suelo, porcentaje que representa una tasa de acumulación de 0,6 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Cuadro 3). Los árboles frutales aportaron el 63% del carbono aéreo del dosel y representa la población con mayor abundancia de individuos (78%), seguido de otras especies (9%), palmas (9%) y maderables en menor proporción (4%; Cuadro 4). Los árboles maderables redujeron el carbono aéreo del dosel en 1% entre el 2009 y el 2011, debido a la corta del 4% de árboles de *Tabebuia rosea* y *Cordia alliodora* (Cuadro 4) de la clase diamétrica 31- 40 cm.

Cuadro 4. Variaciones en número de individuos (N), área basal (AB) y carbono en la biomasa aérea de 9 Parcelas Permanentes de Medición en cacaotales de Waslala, Nicaragua (periodo 2010 y 2011)

Año	Frutales			Maderables			Otros			Palmas			Total		
	N	AB	C	N	AB	C	N	AB	C	N	AB	C	N	AB	C
<b>2009</b>	54	34.0	195	23	11.1	21.7	10	6.8	37.6	8	2.2	7.3	95	54.1	261.6
<b>2011</b>	72	36.2	201.8	24	10.8	21.6	12	7.3	40.1	10	2.6	8.9	118	56.9	272.3
<b>Tasa de cambio</b>	<b>18</b>	<b>2.1</b>	<b>6.7</b>	<b>1</b>	<b>-0.3</b>	<b>-0.1</b>	<b>2</b>	<b>0.6</b>	<b>2.5</b>	<b>2</b>	<b>0.4</b>	<b>1.5</b>	<b>23</b>	<b>2.8</b>	<b>10.6</b>

\*AB (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>); C (Mg ha<sup>-1</sup>)

Los árboles frutales y maderables como la *Inga sp*, *Buorreria huanita*, *Cordia alliodora*, *Bactris gasipaes*, *Manguifera indica*, *Erythrina poeppigiana*, *Cedrela Odorata* tuvieron los índices de valor de importancia (IVI) más altos en los SAF, siendo las especies de mayor predominancia y contribución al carbono total acumulado en el 2011 (Anexo 1). La *Inga sp* fue la especie más frecuente en los cacaotales (70% parcelas) encontrándose a densidades promedio de 50 árboles ha<sup>-1</sup>. En cambio, la *Cordia alliodora* como maderable se encontró a densidades promedio de 7 árboles ha<sup>-1</sup> (Anexo 1).

La regeneración natural de las especies de dosel (>6 cm de diámetro) en el sotobosque presentó una distribución próxima a L o J invertida (Figura 7), característica de una buena regeneración natural. Los árboles de dosel de la regeneración incrementaron su población de individuos en un 19% (23 individuos) entre el periodo 2009 y el 2011, presentando un predominio de frutales (18), maderables (1), otras especies (2) y palmas (2). La clase diamétrica 1-10 cm tuvo la mayor población de individuos (39).



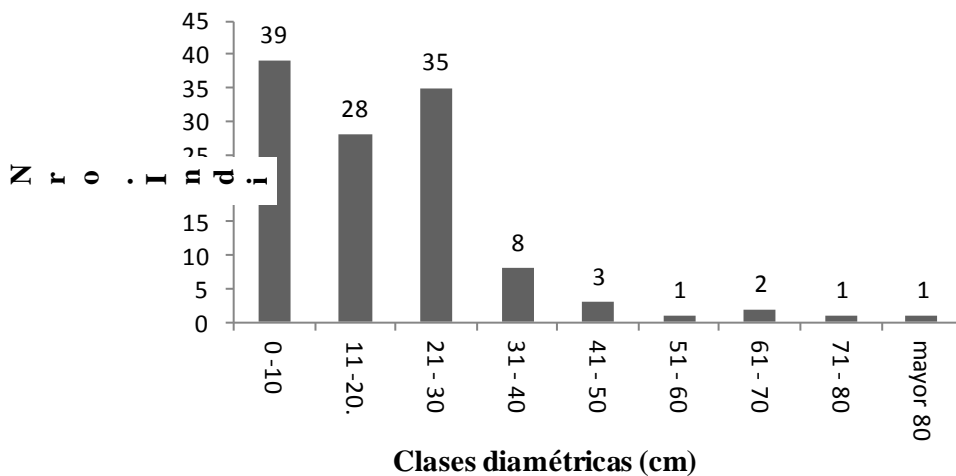


Figura 7. Distribución diamétrica de árboles censados en 2011 en 9 PPM de cacao en Waslala, Nicaragua.

La biomasa epigea de los árboles de cacao acumularon  $0,7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de carbono, equivalente al 21% del carbono total contenido en la biomasa arriba y debajo del suelo y al 53% del carbono de la biomasa aérea (Cuadro 3). Sin embargo, el 33% de las PPM redujeron el stock de carbono entre el 2009 y el 2011 por la rehabilitación de plantaciones improductivas de cacao (Cuadro 3). La tasa de acumulación anual de carbono en las raíces finas y gruesas representa el 23% del carbono encima y debajo del suelo ( $0,8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), siendo las raíces finas ( $<5\text{mm}$ ) las que acumularon mayor carbono (13%) en los cacaotales (Cuadro 3). La necromasa fina y gruesa acumularon el 21% del carbono total de la biomasa ( $0,5 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), siendo el 76% de la necromasa proveniente de la fracción gruesa (Cuadro 3). La hojarasca acumulada en el suelo se compone principalmente por hojas de cacao, que representan el 17% ( $0,6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) del carbono contenido en la biomasa total (Cuadro 3).

## 4.4 DISCUSIONES

La acumulación de carbono en la biomasa de los cacaotales de Waslala, se encuentra dentro de niveles comparables con otros estudios. La tasa de acumulación de  $1,3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en la biomasa del dosel y cacao aéreo, se encuentra dentro del rango reportado por Concha et ál. (2007) en la región de San Martín Perú, donde SAF de cacao asociados a maderables y frutales reportan tasas de fijación entre  $1,15$  y  $6,8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en cacaotales de 20 años. Ortiz et ál. (2006) por su parte, reporta tasas mayores en Changuinola, Panamá ( $1,7$  a  $2,5 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) en SAF de cacao (*Theobroma cacao*) con laurel (*Cordia alliodora*) de 25 años. Al igual que los cacaotales de 20 años en Talamanca, Costa Rica donde el asocio del cacao con laurel reporta una tasa de fijación en la biomasa epígea de  $6 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Beer et ál. 1990).

Las investigaciones de carbono en SAF dan mayor importancia a los compartimentos del suelo y la biomasa aérea (Albrecht y Kandji 2003; Isacc et ál, 2005; Concha et ál. 2007; Smiley y Kroschel 2008; Wade 2010). Sin embargo, se debe considerar que esta importancia es relativa y no es regla general para todos los SAF. Existen sistemas con compartimentos más importantes que otros, como los cacaotales viejos ( $>25$  años) y poco productivos ( $90 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) de Waslala, que acumulan en la necromasa y hojarasca (biomasa muerta) el 38% del carbono total de la biomasa (Cuadro 3), factor relacionado a la baja productividad del cacaotal. Estos cacaotales con baja producción al ser rehabilitados (mediante raleos de árboles, recepas de cacao, podas y otros) modifican la población, estructura y composición de especies en el dosel y cacao, movilizándolo el carbono de la biomasa aérea hacia otros compartimentos. Un estudio sobre reservas de materia orgánica del suelo (0-45 cm) constata incrementos de 198 a  $240 \text{ Mg ha}^{-1}$  de biomasa en parcelas con *E. poeppigiana* y 168 a  $184 \text{ Mg ha}^{-1}$  en parcelas de *C. alliodora* a edades de 10 años (Beer et ál. 1990).

El movimiento de carbono de la biomasa aérea hacia los diferentes compartimentos ocurre normalmente por: 1) aprovechamiento o corta de especies maderables (*Cordia alliodora* y *Tabebuia rossea*); 2) eliminación de árboles frutales de poca productividad (*Citrus sp.*, *aguacate*) o 3) por la rehabilitación de árboles improductivos de cacao. Estas intervenciones de manejo generan volúmenes y movimientos importantes de biomasa que

pasan de un compartimento (ejemplo arboles en pie) a otro compartimento (necromasa, hojarasca), siendo la necromasa y hojarasca compartimentos intermedios o temporales entre la biomasa vegetal en pie y el suelo (Albrecht y Kandji 2003).

El movimiento de carbono a través de los diferentes compartimentos en un bosque natural no intervenido es por lo general de "ciclo cerrado" donde la biomasa acumulada se queda en el mismo sistema (Fonseca et ál. 2009). Sin embargo, los SAF por el manejo que tienen, pueden presentar un "ciclo semiabierto" de acumulación de carbono, donde el carbono de la biomasa no necesariamente se queda en el sistema, sino puede formar parte de la leña (dosel y cacao) que los agricultores de Waslala utilizan como una estrategia de vida en la preparación de sus alimentos. Esta salida de material vegetal reduce el carbono total acumulado de los cacaotales y es importante considerarlo al momento de cuantificar en carbono total del SAF. Albrecht y Kandji (2003) en un estudio con *Gliricidia sepium* en un ciclo de producción de cuatro años obtuvo 35 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de biomasa a intervalos de cada 4 meses de poda lo que confirma su importancia. Por tanto, la recolección de leña y el deshierbe juegan un papel importante en la acumulación de carbono en el sistema, sobre todo cuando se compara diferentes tipos de usos de suelo (Wade 2010).

La hojarasca y la necromasa fina y gruesa son compartimentos de mayor acumulación de carbono total (38%) y de mayor variabilidad en los SAF de cacao en Waslala (Concha et ál. 2007), debido a la edad, manejo y tipo de sistema "semiabierto" al cual están expuestos. La contribución de las fracciones gruesas en la necromasa (>10 cm de diámetro) derivadas de podas, renovación de plantas viejas de cacao y aprovechamiento de especies de dosel (leña, madera, frutas y otros) generan aportes importantes de biomasa a la hojarasca (17%) y necromasa fina (5%) del SAF.

El dosel de sombra es el principal productor de biomasa en el cacaotal, debido a la capacidad de utilización de recursos (agua, luz y nutrientes) para acumular carbono durante su crecimiento (Nair et ál. 2011). Sin embargo, en el estudio en Waslala se observó que el dosel fue el segundo componente de acumulación de carbono después del cacao, debido a que frutales y maderables tienen usos y tiempos de permanencia diferentes. Así, los frutales por ejemplo, que son en su mayoría *Inga sp*, *Bourreria huanita*, *Manguifera indica* se conservan

por mayor tiempo en los SAF, porque son fuente importante de alimento y comercialización. En cambio, los maderables como la *Cordia alliodora* y *Tabebuia rosea* por su naturaleza y dimensión (>30 cm dap) son aprovechados para la generación de ingresos a la familia (Somarriba y Harvey 2003; Ortiz et ál. 2008) generando una reducción del carbono en los SAF cacao (Cuadro 3).

La regeneración de especies de dosel en los SAF de Waslala presentó una distribución en J o L invertida, indicador de incremento de nuevos individuos en el sistema (Figura 7; Melo et ál. 2003). Sin embargo, la dominancia de algunas especies frente a otras es regulada por las prácticas de manejo del agricultor. El índice de valor de importancia (IVI) de las especies arbóreas adultas en los SAF de cacao tiene relación con las nuevas especies de regeneración natural, lo que hace suponer su importancia por los agricultores. Así los frutales (*Inga sp*, *Bourreria huanita*, *Manguífera indica*) y maderables (*Cordia alliodora*, *Eritrina peappigiana*, *Cedrela odorata*) fueron las más importantes en los sistemas actuales y son también las especies dominantes en edades cortas (Anexo 1; Figura 7).

La hojarasca del dosel y el cacao tienen relación con las intensidades de poda y aprovechamiento de los arboles. Se ha observado que este componente normalmente se queda en el sistema y su relación es positiva con la acumulación de necromasa. Los SAF de cacao de mayor edad (27 y 25 años; Cuadro 3) por ejemplo mostraron mayor producción de hojarasca en comparación a sistemas de menor edad. Así, en un estudio similar (Dawoe et ál 2010) se encontró que la acumulación de carbono en sistemas de 3 y 30 años fue de 1,3 a 2,4 Mg C ha<sup>1</sup>, lo que indica que los sistemas de mayor edad acumulan mayor cantidad de hojarasca.

La acumulación de carbono en las raíces finas (<5mm) fue proporcionalmente mayor a la producción de raíces gruesas. La producción de raíces finas estuvo influenciada por los niveles de materia orgánica en forma hojarasca descompuesta en la capa superficial del suelo. Lo que probablemente explica la relación positiva entre ambos componentes. En cambio, las raíces gruesas (>5mm) provenientes del dosel y cacao que se encuentran a profundidades mayores a 40 cm y deben ser mejor cuantificados, debido a que representan el 13 % de la biomasa área total del árbol (Mac Diken 1997), lo que supone su importancia de este sub componente en futuras evaluaciones.

Las tendencias de los resultados de carbono apuntan a que estos SAF cacao con la edad que tienen son inestables en la producción de biomasa. Es decir, que las tasa de acumulación en carbono en cada compartimento tienen subidas y bajadas respecto al año base de evaluación 2009, debido a que estos cacaotales se encuentran en constante renovación y/o rehabilitación. Además que las innovaciones tecnológicas en cacao aplicadas por los agricultores permite que las actuales fincas poco productivas en cacao sean renovadas mediante: la introducción de nuevas variedades de cacao, selección de cacao injerto y selección de nuevas especies de dosel de sombra, etc. Esta dinámica genera en la actualidad un movimiento variable del carbono alrededor de los compartimentos y fuera de ellos.

Es posible incrementar el carbono por unidad de superficie, diseñando doseles con estructura horizontal y vertical compatible con la productividad de cacao (Somarriba et ál en preparación). Considerando para ello ciertos aspectos como la densidad de plantación, velocidad de crecimiento, gravedad específica de la madera, altura del árbol, diámetro de copa, tamaño de hojas y fenología foliar (caducifolia) que permitan mantener altos niveles de carbono sin afectar los rendimientos. Además de incluir otros aspectos como la edad, la estructura y la forma de manejo de los SAF (Beer et ál. 1990).

Como reflexión metodológica es necesario tener un protocolo estándar de medición de carbono que detalle la evaluación por cada componente (dosel, cacao, raíces, necromasa y hojarasca) y tener georeferenciadas las PPM para evitar posibles inventarios en sitios diferentes al estudiado. Además de tener al menos marcados los arboles de dosel para realizar estimaciones futuras de carbono como tasas de incremento medio anual (IMA), incremento corriente anual (ICA), etc. Estas consideraciones son importantes para cuantificar con mayor aproximación el carbono almacenado en los SAF cacao en Waslala.

## 4.5 CONCLUSIONES

- ✓ La tasa de acumulación promedio de carbono en la biomasa arriba y debajo del suelo de los SAF cacao de la cooperativa CACAONICA fue de  $3,3 \pm 1,6 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , distribuidos en el dosel y cacao (39%), raíces finas y gruesas (23%), necromasa fina y gruesa (21%) y hojarasca (17%).
- ✓ El manejo de los SAF de cacao influye considerablemente en las existencias totales de carbono y en las variaciones internas entre cada componente a lo largo del tiempo.
- ✓ Los SAF de cacao en Waslala proveen biomasa total en forma de leña y/o madera a las familias cacaoteras, volumen que genera una reducción de carbono entre el periodo 2009 y el 2011.
- ✓ Los árboles frutales y maderables son los grupos de mayor aporte a la acumulación y generación de carbono en el dosel, al cual los agricultores toman mayor preferencia en su estado adulto como en la regeneración natural.

## 4.6 RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda generar modelos de proyección de sombra para estudiar relaciones entre rendimiento del cacao e incremento de carbono que permitan diseñar SAF de mayor complejidad botánica y estructural.
- ✓ Es importante estudiar la dinámica de aprovechamiento y reclutamiento de especies de regeneración natural, para determinar incrementos futuros en carbono en el sistema.
- ✓ Es necesario tener un protocolo estándar de medición de carbono sobre todo cuando se compara el carbono mediante el método de existencias (periodos diferentes de tiempo) dentro de un programa de monitoreo a largo plazo.
- ✓ El suelo es el compartimento más importante para la biomasa descompuesta (necromasa, hojarasca y raíces muertas) al cual debe medirse sus reservas de carbono, sobre todo a profundidades mayores a 20 cm, donde la literatura menciona que las existencias pueden ser importantes.

## 4.7 LITERATURA CITADA

- Andrade, H; Segura, M; Somarriba, E; Villalobos. M. En preparación. Biomass equations to estimate aboveground biomass of woody components in indigenous agroforestry systems with cacao.
- Albrecht, A; Kandji, ST. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99:15-27 p.
- Beer, J; Bonnemann, A; Chavez, W; Fassbender, HW; Imbach, AC; Martel, I. 1990. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) or poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. V. Productivity indices, organic material models and sustainability over ten years. *Agroforestry Systems* 12, 229–249 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 p.
- Concha, J; Alegre, J; Pocomucha, V. 2007. Determinación de las reservas de C en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L.. en el departamento de San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*, 6:75-82.
- Di Rienzo JA; Casanoves F; Balzarini MG; Gonzalez, L; Tablada, M; Robledo CW. InfoStat versión 2009. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Deheuvels, O; Avelino, J; Somarriba, E; Malezieux, E. 2011. Vegetation structure and productivity in cocoa-based agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*.
- Dawoe, EK, Isaac ME, Quashie-Sam J. 2010. Litterfall and litter nutrient dynamics under cocoa ecosystems in lowland humid Ghana. *Plant soil* 330:55-64 p.
- Estrada, GF. 2010. Balance de nutrientes en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) orgánico en el municipio de Waslala, Nicaragua. Tesis M. Sc. Turrilaba, CR, CATIE. 98 p.
- Espín, TM; Cerda, BR. 2010. Estimación de carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) y laurel (*Cordia alliodora*) en diferentes Condiciones de paisaje en la reserva Indígena de Talamanca, Costa Rica. Tesis Ingeniería. Nariño. CO. 22 p.
- Fonseca González, W. 2009. Restauración forestal y almacenamiento de carbono en trópico húmedo (Zona Caribe de Costa Rica). Tesis doctoral. Universidad de Alcalá, Departamento de Ecología. Alcalá de Henares, España. 190 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2010. Agricultura “climáticamente inteligente”. Políticas, prácticas y financiación para la seguridad alimentaria, adaptación y mitigación., Roma, IT. 46 p.

- Holdridge, LR. 1979. Ecología basada en zonas de vida. Agroamérica. 83 p.
- Isaac, ME; Gordon, AM; Thevathasan, N; Oppong, SK; Quashie Sam, J. 2005. Temporal changes in soil carbon and nitrogen in west African multistrata agroforestry systems: a chronosequence of pools and fluxes. *Agroforestry Systems*. 65:23-31 p.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático). 2006. Guía de buenas prácticas. Capítulo 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Hayama, JP. 51-574 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Japan, JP. 591 p
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Kanagawa, JP. 595 p.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático). 2007. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático Ginebra, Suiza, CH. 104 p.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático). 2007: Summary for Policymakers. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York, USA. 18 p.
- MESOTERRA (Manejo Sostenible de Territorios Agropecuarios en Mesoamérica). 2010. Línea base Nicaragua. 104 p.
- Montagnini, F; Nair, FKR. 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61: 281- 295 p.
- Melo, CO; Vargas, RR. 2003. Evaluación ecológica y silvicultural de ecosistemas boscosos. Universidad del Tolima. Ibagué, CO. 183 p. UNFCCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). 2004. Los primeros 10 años. Bonn, DE. 96 p.
- MacDiken, K. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Arlington, VA, US, Winrock International. 87 p.
- Nair, PKR. 2011. Agroforestry systems and environmental quality: Introduction. *Journal of Environmental Quality* 40(3):784 p.
- Nair, PKR; Nair, VD; Mohan Kumar, B; Showalter, JM. 2010. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Advances in Agronomy* 108:237- 307 p.



- Ortiz, E. 1997. Refinement and Evaluation of two Methods to Estimate Aboveground Tree Biomass in Tropical Forest. Doctoral Dissertation. New York, US. 116-118 p.
- Ortiz, A; Riascos, L; Somarriba, E. 2008. Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y C en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y laurel (*Cordia alliodora*). *Agroforestería en las Américas* 46: 26-30 p.
- Plieninger, T. 2011. Capitalizing on the Carbon Sequestration Potential of Agroforestry in Germany's Agricultural Landscapes: Realigning the Climate Change Mitigation and Landscape Conservation Agendas. *Landscape Research*. Germany, DE. 36(4): 435-454 p.
- Philipp, D; Gamboa, W. 2003. Observaciones sobre el Sistema Mucuna- maíz en Laderas de Waslala, Región Atlántica de Nicaragua. *Agronomía Mesoamericana* (14)2: 215- 221 p.
- Rügnitz, MT; Chacón, ML; Porro, R. 2008. Guía para la Determinación de C en Pequeñas Propiedades Rurales. 1ra. ed. Belém, BR. Consorcio Iniciativa Amazónica y Centro Mundial Agroforestal (ICRAF). 63 p.
- Segura, M. 2005. Estimación de C almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Informe de Consultoría. Proyecto Captura de C y desarrollo de mercados ambientales en sistemas agroforestales indígenas con cacao en CR. Turrialba, CR, CATIE. 147 p.
- Smiley, GL; Kroschel, J. 2008. Temporal change in carbon stocks of cocoa- gliricidia agroforests in Central Sulawesi, Indonesia *Agroforest Syst.*, 73:219-231 p.
- 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 p.
- Somarriba, E; Cerda, R; Orozco, L; Cifuentes, M; Deheuvels, O; Dávila, H; Espin, T; Mavisoy, H; Ávila, G; Alvarado, E; Astorga, C; Say, E. En preparación. Carbono en los sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) de Centroamérica.
- Szott, LT; Arévalo-López, LA; Pérez, J. 1993. Allometric relationships in Pijuayo (*Bactris gasipaes* H.B.K.). 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, CR, Editorial de la Universidad de Costa Rica. 91-114 p.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), 2007. Agreements to protect the climate system for present and future. 25 p.
- Van Wagner, C. 1968. The line intersect method in forest fuel sampling. *Forest science* 14(1): 20-26 p.

Wade, ASI; Asase, A; Hadley, P; Mason, J; Ofori Frimpong, K; Preece, D; Spring, N; Norris, K. 2010. Management strategies for maximizing carbon storage and tree species diversity in cocoa-growing landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 138: 324-334 p.