



Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

ESCUELA DE POSGRADO

**Estrategias de reducción de la huella de carbono en la producción
del granode cacao (*Theobroma cacao* L.) para la cooperativa
CACAONICA en Waslala, Nicaragua**

Por:

Daniel Poroma Colmena

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado
como requisito para optar por el grado de:

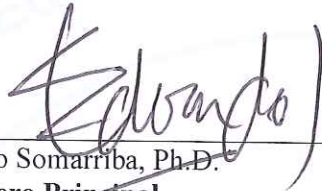
Magister Scientiae en Agroforestería Tropical

Turrialba, Costa Rica, 2012

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

MAGISTER SCIENTIAE EN AGROFORESTERÍA TROPICAL

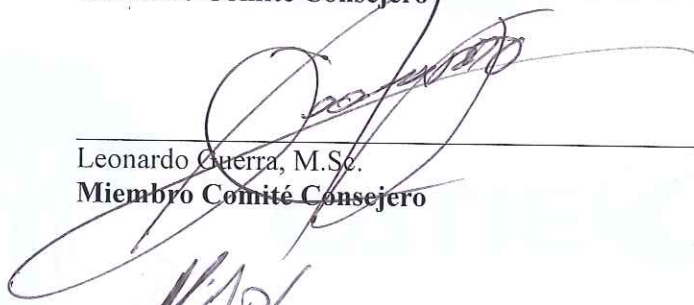
FIRMANTES:



Eduardo Somarriba, Ph.D.
Consejero Principal



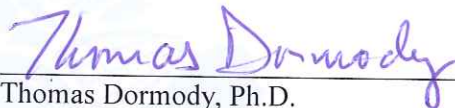
Miguel Cifuentes J., Ph.D.
Miembro Comité Consejero



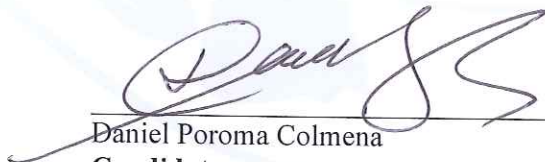
Leonardo Guerra, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



José Oduber Rivera, M.Sc.
Miembro Comité Consejero
Coordinador, Especialización en Práctica para el Desarrollo



Thomas Dormody, Ph.D.
Decano de la Escuela de Posgrado



Daniel Poroma Colmena
Candidato

DEDICATORIA:

A Dios por guiarme, darme fortaleza y salud para permitir construir otros mundos mentales posibles.

A mis padres Rafael y Angélica por ser la expresión moral y material durante mi infancia, escuela, universidad.

A mis hermanos por darme el apoyo incondicional en todo momento.

A Issaí, Valezka y Norita por guiarme hacia un camino lleno de satisfacciones y felicidad.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a:

- Ph.D. Eduardo Somarriba por el apoyo, conocimiento y sugerencias de aporte científico para realizar el trabajo de investigación.
- Ph.D. Miguel Cifuentes Jara, M.Sc. Rolando Cerda Bustillos, M.Sc. Leonardo Guerra Alarcón y M.Sc. Luis Orozco Aguilar, por los valiosos aportes al conocimiento del presente trabajo.
- M.Sc. Romina Villegas Cáceres por el apoyo logístico durante la fase de campo.
- A la Cooperación Técnica Belga (CTB) en Bolivia por darme la oportunidad de realizar la maestría en CATIE.
- Al Proyecto Cacao Centroamérica (PCC) por permitirme ser parte del equipo de investigación y proveer la logística y recursos necesarios para realizar la investigación en Waslala, Nicaragua.
- A todo el equipo de trabajo de la Cooperativa de Servicios Agroforestales y de Comercialización de Cacao (CACAONICA) en Waslala, Nicaragua.
- A todos (as) las personas en CATIE y Waslala que contribuyeron a finalizar el presente trabajo de investigación.
- A los colegas y amigos en Bolivia por apoyarme en todo momento.

BIOGRAFÍA

El autor nació en la ciudad de La Paz, Bolivia el año 1976. Finalizó sus estudios superiores en Carrera de Ingeniería Agronómica de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) en el 2004. Entre 2004 y 2007 realizó actividades de extensión agrícola en cultivos de banano, cacao y cítricos en la Región de Alto Beni, Yungas de La Paz. El 2008 inició la carrera docente en el instituto tecnológico Jorge Manrique y la Universidad Privada de Informática (UBI) en el área agronómica. Parte de su tiempo la dedicó a la elaboración y ejecución de proyectos agrícolas y de riego en los Yungas y Valles del Departamento de la Paz. En el año 2010 ingresó al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) para realizar los estudios de posgrado en la maestría de Agroforestería Tropical y la Especialización en Prácticas del Desarrollo.

CONTENIDO

DEDICATORIA:	III
AGRADECIMIENTOS	IV
BIOGRAFÍA	V
CONTENIDO	VI
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE CUADROS.....	XI
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo del estudio.....	2
1.1.1 Objetivo general	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
1.2 Preguntas orientadoras	3
2 MARCO CONCEPTUAL.....	4
2.1 El cambio climático.....	4
2.1.1 Efecto Invernadero	5
2.1.2 Incremento en las concentraciones de gases efecto invernadero (GEI)	5
2.1.3 Principales Gases Efecto Invernadero (GEI).....	6
2.1.4 Potencial de calentamiento global (PCG)	7
2.2 El consumo y su influencia sobre el clima	7
2.3 Huella de carbono (HC)	9
2.4 Empresas y consumidores promueven la baja emisión de carbono.....	9
2.5 Metodología de medición de la HC a partir del Análisis del Ciclo de Vida del producto (ACV)	10
2.6 Los sistemas agroforestales (SAF) y su contribución a la reducción de emisiones de GEI.....	12
3 LITERATURA CITADA	13
4. ARTÍCULO 1. ACUMULACIÓN DE CARBONO EN LA BIOMASA DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES DE CACAO EN WASLALA, NICARAGUA.....	16
4.1 INTRODUCCIÓN	16
4.2 MATERIALES Y MÉTODOS	17
4.2.1 Descripción del área de estudio.....	17
4.2.2 Estimación de carbono en parcelas permanentes de medición (PPM)	19
4.2.3 Metodología	19
4.3 RESULTADOS	21
4.4 DISCUSIONES	25
4.5 CONCLUSIONES.....	29

4.6	RECOMENDACIONES	29
4.7	LITERATURA CITADA.....	30
5.	ARTÍCULO 2. HUELLA DE CARBONO Y ESTRATEGIAS DE REDUCCIÓN EN EL CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DEL CACAO (<i>Theobroma cacao</i> L.) EN WASLALA, NICARAGUA.....	34
5.1	INTRODUCCIÓN.....	34
5.2	MATERIALES Y MÉTODOS	35
5.2.1	Descripción del área de estudio.....	35
5.2.2	Cadena de producción y comercialización de cacao de la cooperativa CACAONICA	36
5.2.3	Alcance de medición de la huella de carbono	38
5.2.4	Metodología	39
5.3	RESULTADOS	47
5.3.1	Huella de carbono	47
5.3.2	Simulación del balance de carbono.....	52
5.4	DISCUSIONES	52
5.4.1	Huella de carbono	52
5.4.2	Balance de carbono	54
5.4.3	Estrategias para incrementar carbono en los actuales SAF cacao	55
5.5	CONCLUSIONES.....	58
5.6	RECOMENDACIONES	59
5.7	LITERATURA CITADA.....	59
6	ANÁLISIS E IMPLICACIONES DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN AL DESARROLLO	62
7	ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LOS RESULTADOS PARA LA FORMACIÓN DE POLÍTICAS	64
	ANEXOS.....	65

Poroma, D. 2012. Estrategias de reducción de la huella de carbono en la producción del grano de cacao (*Theobroma cacao* L.) para la cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 98 p.

Palabras claves: carbono, tasa de acumulación, metano, dióxido de carbono, óxido nitroso, huella de carbono, cacaotales, dosel de sombra.

RESUMEN

Se estimó la tasa de acumulación de carbono en nueve sistemas agroforestales de cacao entre 2009 y 2011 para la Cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua. La tasa de acumulación de la biomasa encima (árboles de sombra, cacao, hojarasca, necromasa fina y gruesa) y debajo del suelo (raíces finas y gruesas) fue de $3,3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, de los cuales $1,3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ fueron para el dosel de sombra y cacao, $0,7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a la necromasa fina y gruesa, $0,6 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a la hojarasca y $0,7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a la tasa de fijación por las raíces finas y gruesas. El dosel y el cacao encima del suelo aportaron con el 21% y 18% del carbono total (biomasa encima y debajo del suelo). Los árboles frutales contribuyeron con el 63% del carbono total del dosel de sombra. Los árboles maderables de *Tabebuia rosea* y *Cordia alliodora* redujeron anualmente 4% de su población en clases diamétricas mayores a 31 cm. Las especies de regeneración natural menores a 10 cm de diámetro guardaron una relación directa con las especies actuales de dosel, predominando en los sistemas *Inga sp*, *Bourreria huanita* y *Cordia alliodora*.

Se contabilizaron las emisiones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso que genera la producción (suelo, compost), transformación (transporte, fermentado y secado) y comercialización (bolsas y transporte) de cacao para determinar la huella de carbono. Se estimó que 1 kg de cacao seco puede emitir a la atmósfera 4,98 kg de dióxido de carbono equivalente. El suelo y el secado a leña del cacao representaron el 77% y 14% de las emisiones totales, siendo los mayores contribuyentes de la huella de carbono del cacao.

El balance de carbono entre las remociones y emisiones mostraron que los sistemas agroforestales remueven en promedio ocho veces más dióxido de carbono del que emite la huella de carbono del cacao ($4,98 \text{ kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$ cacao) llevando a la cooperativa CACAONICA hacia una neutralidad de carbono y creando oportunidades para reducir las próximas emisiones de la cadena del cacao.

Poroma, D. 2012. Strategies to offset carbon footprint in the production of cocoa beans (*Theobroma cacao* L) in Waslala, Nicaragua. Mag Sc Thesis CATIE, Turrialba, Costa Rica.98 p.

Keywords: carbon accumulation rate, methane, carbon dioxide, nitrous oxide, carbon footprint, cacao, shade canopy.

ABSTRACT

Was estimated rate of carbon accumulation in nine cacao agroforestry systems between 2009 and 2011 for the Cooperative CACAONICA in Waslala, Nicaragua. The rate of biomass accumulation above (shade trees, cocoa, fine and coarse necromass and litter) and underground (fine and coarse roots) was $3,3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, where $1,3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ corresponded to the canopy of shade trees and cocoa, $0,7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ to the fine and coarse necromass, $0,6 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ to the litter and $0,7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ to the rate of fixation by the fine and coarse roots. The canopy and the Cocoa above the ground provided 21% and 18% respectively of carbon to the total accumulation rate (biomass above and below ground)-. Fruit trees increased carbon by 63% with respect to shade trees. The timber trees of *Tabebuia rosea* and *Cordia alliodora* reduced their population in diameter classes > 31 cm by 4% annually. Natural regeneration species less than 10 cm in diameter kept a directly related to current species of canopy, predominating in the *Inga sp*, *Bourreria huanita* and *Cordia alliodora* systems.

Were counted emissions of carbon dioxide, methane and nitrous oxide generated from production (soil, compost), processing (transport, fermented and dried) and marketing (bags and transport) of cocoa to determine the carbon footprint. It is estimated that 1 kg of dry cocoa can emit into the atmosphere 4.98 kg of carbon dioxide equivalent. The soil and wood drying cocoa accounted for 77% and 14% of total emissions, being the largest contributors to the carbon footprint of cocoa.

The carbon balance of the removals and emissions showed that agroforestry systems remove on average eight times more carbon dioxide than it releases the carbon footprint of cocoa ($4.98 \text{ kg cocoa CO}_2\text{e kg}^{-1}$) being cooperative towards CACAONICA carbon neutrality and creating opportunities to reduce emissions near the cocoa chain

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cambios en la temperatura, en el nivel del mar y en la cobertura del casquete polar del hemisferio norte	4
Figura 2. Balance de energía generado por el efecto invernadero natural	5
Figura 3. Gases de efecto invernadero que incrementaron su concentración en un 70 % a partir de inicios de la era preindustrial por actividades humanas.	6
Figura 4. Mapa del proceso para determinar la Huella de carbono en el Análisis de Ciclo de Vida del cacao en Waslala, Nicaragua.....	11
Figura 5. Mapa de Ubicación de Waslala. Nicaragua	18
Figura 6. Puntos de muestreo en cada Parcela Permanente de Medición para las mediciones de carbono (PCC 2010).....	20
Figura 7. Distribución diamétrica de árboles censados en 2011 en 9 PPM de cacao en Waslala, Nicaragua.	24
Figura 8. Precipitaciones y temperaturas mensuales de Waslala, Nicaragua (según datos de clima INETER 2003)	36
Figura 9. Cadena de producción y comercialización del cacao de la cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua.....	38
Figura 10. Diagrama del análisis del ciclo de vida (ACV) del cacao en el área de influencia de CACAONICA, Waslala, Nicaragua.....	37
Figura 11. Anillo (a) y cámara de cerrado (b) para muestreo de gases en cacaotales de Waslala, Nicaragua	39
Figura 12. Muestreo de gases (a) y de temperatura (b) mediante el método de cámara cerrada en Parcelas Permanentes de Medición en Waslala, Nicaragua.....	40
Figura 13. Emisiones acumuladas y desvío estándar promedio de los flujos anuales de GEI evaluadas en tres Parcelas permanentes de medición (PPM) en Waslala, Nicaragua. a) Emisiones CH ₄ ; a) Emisiones de N ₂ O y c) Emisiones de CO ₂	49
Figura 14. Flujos de GEI evaluados en tres Parcelas Permanentes de Medición (PPM) en Waslala, Nicaragua. a) Emisiones CH ₄ ; b) Emisiones de N ₂ O y c) Emisiones de CO ₂	50

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valores de Potencial de Calentamiento Global para diferentes horizontes de tiempo ...	7
Cuadro 2. Modelos alométricos utilizados para la estimación de carbono en árboles de sombra y cacao de los SAF de cacao en Waslala, Nicaragua.....	21
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.....	22
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).....	23
Cuadro 5. Presentación de la Huella de Carbono (HC) del cacao producido por la cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua.	47
Cuadro 6. Emisiones de gases efecto invernadero del suelo evaluadas en tres Parcelas Permanentes de Medición (PPM) en Waslala, Nicaragua	48
Cuadro 7. Emisiones de dióxido de carbono anuales emitidos en la quema de leña para el secado de cacao húmedo en el centro de acopio CACAONICA, Waslala, Nicaragua.	51
Cuadro 8. Construcción de medias, error estándar y límites de confianza para 10^6 de simulaciones de balance de carbono para la cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua.	52

1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático producido por el incremento en las concentraciones de gases efecto invernadero (GEI) en la atmósfera genera un aumento global de la temperatura del aire, océanos, el derretimiento de nieve y hielo, y consecuente aumento del nivel del mar (IPCC 2007). Los principales GEI como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) el óxido nitroso (N₂O), el ozono (O₃) y los halocarbonos han incrementado la temperatura media global en $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ a partir del siglo XX (IPCC 2001). La contribución de las actividades antropogénicas asociadas al cambio de uso de suelo, deforestación, uso de combustibles fósiles y combustión de biomasa siguen siendo la causa principal del calentamiento global (IPCC 2007).

Gobiernos y la cooperación internacional en el mundo han dispuesto medidas e incentivos para la mitigación del cambio climático, como la creación del mercado internacional de carbono y nuevos mecanismos institucionales iniciados a partir de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) y el Protocolo de Kyoto (IPCC 2007). Sin embargo, los esfuerzos de integrar las políticas climáticas en las políticas de desarrollo, con leyes, normas, impuestos, permisos comerciales, incentivos financieros, acuerdos voluntarios, instrumentos de información e investigación (IPCC 2007) deben ser mayores para un avance real de mitigación.

Los procesos productivos asociados al comercio internacional entre países y continentes son responsables del 21,5% de las emisiones de CO₂ en el mundo (Peters y Hertwich 2008), por esto investigadores y empresas buscan calcular y evaluar el impacto que causan los productos sobre el clima (Plassmann y Jhones 2009). La huella de carbono (HC) es un indicador que mide los GEI emitidos a la atmósfera por las actividades de producción o consumo de bienes y servicios. La medición de la HC puede ser simple cuando se considera solo emisiones directas de CO₂ o compleja cuando se cuantifica todas las emisiones de GEI en el ciclo de vida de un producto que incluye la creación, modificación del producto, transporte, almacenamiento, reciclado o eliminación (PAS 2050; 2008).

Alemania, Estados Unidos, Francia, Japón y Reino Unido han logrado importantes avances en la medición de la HC. El etiquetado de huella en los productos es uno de los casos, que en consumidores orienta la toma de decisiones de compra y en empresas ayuda a mejorar los procesos productivos hacia una baja economía en carbono (Schneider y Samaniego 2010). El etiquetado de la huella en una cadena de producción y comercialización puede generar responsabilidades ambientales compartidas entre sus actores (Schneider y Samaniego 2010) y la obligatoriedad de informar el contenido de HC en los productos será un elemento clave de mercado y lucha contra el cambio climático.

El comercio del cacao (*Theobroma cacao* L.) no está libre de estas tendencias mundiales de mercado, debido a que la cadena de producción y comercialización que incluye agricultores, compradores, organizaciones de envío, procesadores, chocolateros y distribuidores (WCF 2010) involucra relaciones comerciales estrechas y de responsabilidad ambiental compartida. En este estudio se estimó la HC a lo largo del ciclo de vida del cacao producido y comercializado por la Cooperativa de Servicios Agroforestales y de Comercialización de Cacao (CACAONICA) en Waslala, Nicaragua. Identificando las etapas críticas de emisión de GEI, rutas de control y posibles medidas actuales y potenciales de reducción a las emisiones generadas, para posibilitar mejoras ambientales y optimizar su competitividad en el mercado (Iglesias 2002). En América Latina las iniciativas de medición de la HC en productos agrícolas son aún incipientes (CEPAL 2010) y hace falta normas estándares para su medición (Guide PAS 2050; 2008).

1.1 Objetivo del estudio

1.1.1 Objetivo general

- Reducir la huella de carbono en la cadena de producción y comercialización del grano de cacao (*Theobroma cacao* L.) de la Cooperativa de Servicios Agroforestales y de Comercialización de Cacao (CACAONICA) en Waslala, Nicaragua.

1.1.2 Objetivos específicos

- Cuantificar la tasa de cambio del carbono almacenado en los sistemas agroforestales de cacao de Waslala entre 2009-2011.
- Estimar las emisiones de CO₂, CH₄ y NO₂ en el ciclo de vida del cacao, desde la producción de grano hasta la entrega a compradores, en áreas bajo responsabilidad de la cooperativa CACAONICA.
- Estimar el balance de carbono entre las remociones por el sistema agroforestal y las emisiones generadas en la producción y comercialización de grano de cacao por la cooperativa CACAONICA.
- Plantear estrategias de reducción de la huella de carbono para mejorar el desempeño ambiental de la cooperativa CACAONICA.

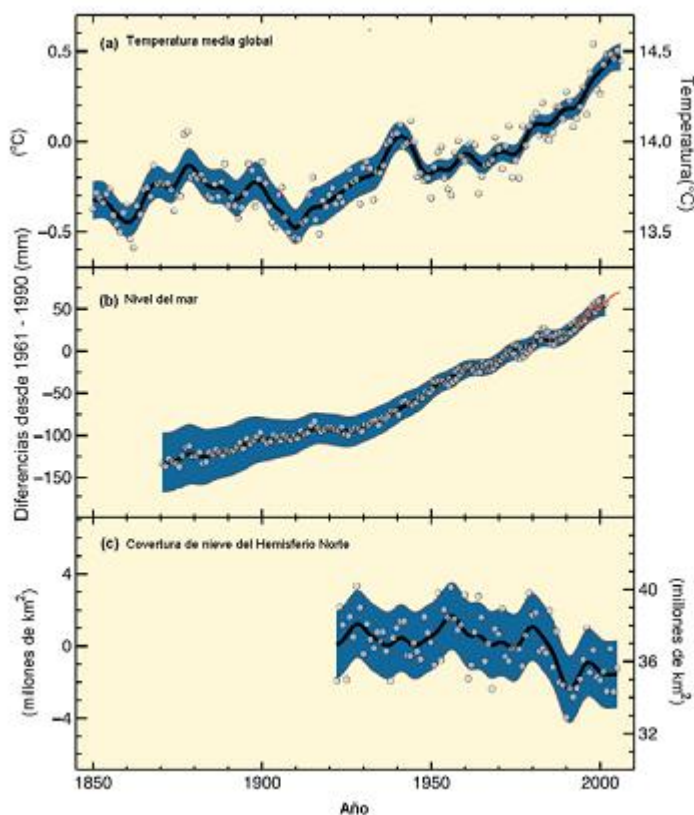
1.2 Preguntas orientadoras

- ¿Cuánto carbono almacenan anualmente los sistemas agroforestales de cacao en Waslala?
- ¿Qué prácticas de manejo en los sistemas agroforestales afectan el almacenamiento de carbono?
- ¿Cuántos kg de CO₂e se emiten al producir 1 kg de grano de cacao?
- ¿Qué etapas durante el ciclo de vida del cacao emiten más GEI?
- ¿Qué estrategias actuales y potenciales reducirían la HC generada en el ciclo de vida del cacao de CACAONICA?

2 MARCO CONCEPTUAL

2.1 El cambio climático

El cambio climático puede definirse como un “*cambio en el estado del clima*” o cambio en sus propiedades que persiste por un tiempo prolongado o decenios, resultado de la variabilidad natural o actividad antropogénica (Climate change 2007). La Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, menciona que el cambio climático es un cambio en el clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que adiciona a la variabilidad natural un incremento en la concentración de gases a la atmósfera (CMNUCC 2004), causando un aumento en la temperatura media global, el nivel de los océanos y el deshielo de los glaciares, casquetes de hielo y mantos polares de hielo (Figura 1; IPCC 2007).



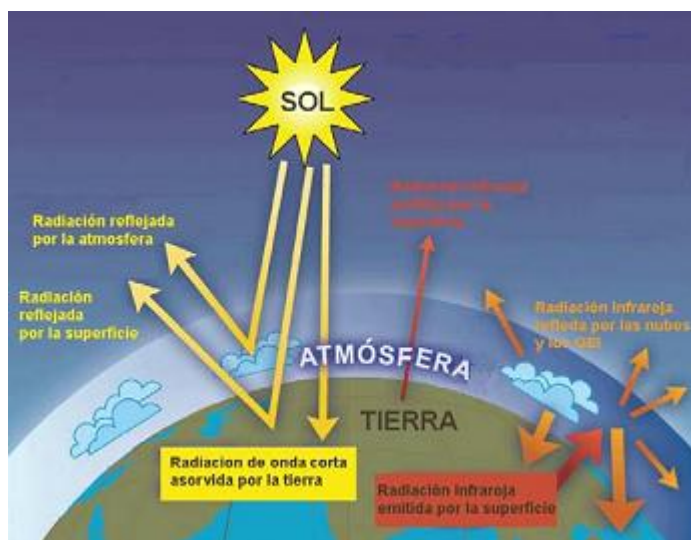
Fuente: IPCC 2007

Figura 1. Cambios en la temperatura, en el nivel del mar y en la cobertura del casquete polar del hemisferio norte

2.1.1 Efecto Invernadero

Los gases en la atmósfera llamados “*Gases de Efecto Invernadero*” se componen principalmente de vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), fluorocarbonos, halogenados (HCFCs), ozono (O_3) y hidrofluorocarbonos (HFC; Velázquez 2005) que absorben y re-emiten radiación infrarroja a la superficie terrestre (CMNUCC 2004).

Los GEI afectan la cantidad de radiación solar que entra y sale de la atmósfera, actuando como un invernadero. Los GEI regulan la entrada de luz solar y restringen la salida de energía de la atmósfera, causando una acumulación en la superficie terrestre y afectando directamente la temperatura global y el nivel medio del mar (Figura 2; Ortega et ál. 2010). Los GEI permiten que la temperatura de la tierra sea habitable y pueda mantenerse en un promedio de 30°C (CMNUCC 2004).

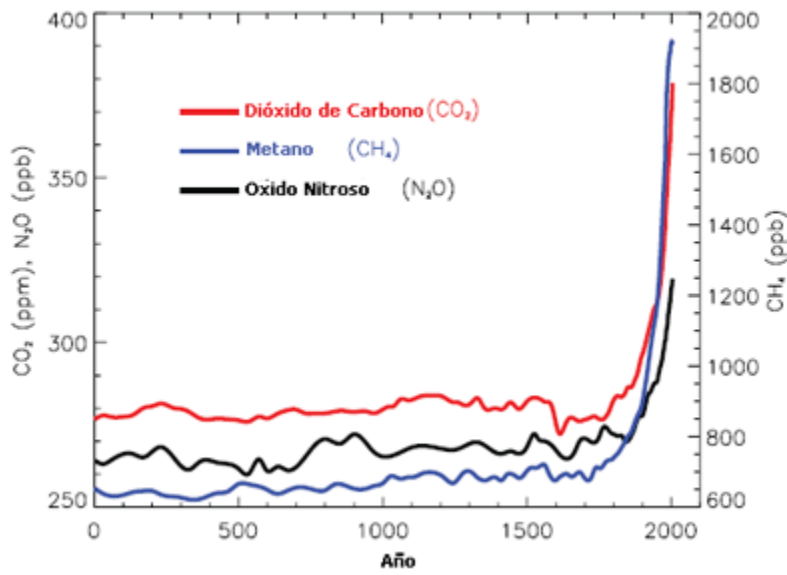


Fuente: IPCC 2007

Figura 2. Balance de energía generado por el efecto invernadero natural

2.1.2 Incremento en las concentraciones de gases efecto invernadero (GEI)

Los niveles de GEI en la atmósfera están determinados por un equilibrio entre las fuentes de emisión y sumidero. Sin embargo, los seres humanos y la tecnología han afectado el balance y los niveles de emisión de GEI (Figura 3) introduciendo nuevas fuentes o interfiriendo los sumideros naturales de carbono (Ferreira 2008).



Fuente: IPCC 2007

Figura 3. Gases de efecto invernadero que incrementaron su concentración en un 70 % a partir de inicios de la era preindustrial por actividades humanas.

A partir del siglo pasado la temperatura global en la superficie del planeta se ha incrementado en $0,6^{\circ}\text{C}$, con una variación de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, produciendo un aumento del 70% (desde 1970 y 2004) en las concentraciones de GEI en la atmosfera debido a actividades humanas partir de la era preindustrial (IPCC 2001; IPCC 2007). Canada's Fourth National Report on Climate Change (2006) menciona que la actividad humana contribuye con el 5% de las emisiones totales, suficiente para provocar el calentamiento global de la atmosfera y cambios en su composición.

2.1.3 Principales Gases Efecto Invernadero (GEI)

Las concentraciones atmosféricas de CO_2 , CH_4 y N_2O se han incrementado desde 1750 por actividades humanas (Figura 3), siendo los procesos industriales, extracción de recursos naturales y quema de bosques para desmonte, las fuentes más importantes de contribución al calentamiento global (Benson et ál. 2000).

El CO_2 es el GEI en mayor concentración en la atmósfera, responsable del 80% de las emisiones totales por suministro y utilización de combustibles fósiles principalmente (UNFCCC 2007). En tanto, la concentración de CH_4 en la atmosfera continua incremento por

actividades relacionadas a la agricultura, uso de gas natural y los vertederos, aunque su ritmo de crecimiento no es progresivo, mostrando una disminución en la década de los 90s (IPCC 2007). La concentración de N₂O en la atmosfera se ha mantenido constante desde los 80s siendo más un tercio de sus emisiones atribuido a la agricultura (IPCC 2007).

2.1.4 Potencial de calentamiento global (PCG)

Debido a que los GEI presentan diferente capacidad para capturar radiaciones térmicas en la atmósfera, se ha desarrollado el concepto de Potencial de Calentamiento Global (PCG), para calcular la contribución de un determinado gas al calentamiento global (IPCC 2001). El PCG es un índice, que aproxima el efecto del calentamiento en el tiempo de una masa unitaria de GEI en la atmósfera actual y la relaciona con el CO₂ (IPCC 2001).

Para la mayoría de los GEI, el PCG disminuye cuando el horizonte en el tiempo se incrementa (Cuadro 1). Esto se debe a que el GEI es removido gradualmente de la atmósfera a través de mecanismos naturales, disminuyendo así su influencia sobre el efecto invernadero. Por convección, el PCG del dióxido de carbono medido a través de todos los horizontes de tiempo es 1 y el PCG de otros GEI se mide en relación al PCG del CO₂ (IPCC 2007).

Cuadro 1. Valores de Potencial de Calentamiento Global para diferentes horizontes de tiempo

Gases Efecto Invernadero (GEI)	Potencial de Calentamiento Global (PCG)		
	Horizonte de tiempo		
	20 años	100 años	500 años
Dióxido de carbono	1	1	1
Metano	71	25	8
Óxido nitroso	289	298	153

Fuente: IPCC 2007

2.2 El consumo y su influencia sobre el clima

Muchas de las actividades asociadas con la emisión de GEI son esenciales en la economía mundial por el estilo de vida que vivimos (CMNUCC 2004). Las emisiones de GEI del sector alimentario son necesidades básicas que van en incremento junto al crecimiento poblacional en el mundo. La producción de alimentos en países desarrollados supera la sostenibilidad medioambiental y las perspectivas de buscar patrones de consumo sostenibles

son cuestionables, en vista a que la demanda de alimentos no solo cubre las necesidades nutricionales sino toma preferencias de sabor, textura, olor, cultura y nivel de ingreso en los consumidores (Carlsson y Kanyama 1998).

Las emisiones de GEI en el sector alimentario son importantes y necesitan ser reducidas para estabilizar el cambio climático (Carlsson y Kanyama 2003). Los productos utilizados para el consumo humano generan emisiones en la producción, transporte, almacenamiento, uso y reciclaje. Por esto, investigadores y empresas buscan calcular y evaluar el impacto que los productos causan al clima (Plassmann y Jhones 2009).

Un producto denominado local, puede presentar dificultades en su definición. En mercados globalizados muchos de los insumos utilizados para la fabricación de un producto proviene de diferentes zonas geográficas o países que al importar contribuye a generar mayor emisión de GEI en la cadena productiva. Este concepto de *“medición de recorrido”* de insumos tiene influencia en la evaluación de los GEI que emite un producto (Plassmann y Jhones 2009). Estudios sobre importación de productos a los EE.UU muestran que las principales emisiones se generan en la cadena de producción (83%), el transporte (11%), la cadena de distribución a minoristas (4%) y el resto son atribuibles a operaciones menores (Weber y Matthews 2008).

Los diferentes tipos de alimentos presentan una amplia gama de emisiones, siendo los productos de origen animal las fuentes de mayor emisión en comparación a productos vegetales. Un estudio en la India mostró que la producción de carne, leche y arroz contribuyen a una mayor generación de CH₄, mientras que la mayoría de los productos de origen vegetal generan emisiones de N₂O (Pathak et ál. 2010).

La decisión del consumo de un producto u otro hace la diferencia en las emisiones per cápita (Marlow et ál. 2009). Aunque otros plantean que una compra local de productos y un cambio en la dieta por vegetales reduciría eficazmente las emisiones totales del planeta (Weber y Matthews 2008). Por ejemplo el consumo de proteína vegetal puede liberar hasta 2,700 millones de hectáreas de pastos y 100 millones de hectáreas de tierras de cultivo de forrajes, además de remover carbono por el incremento en la cobertura vegetal (Stehfest et ál. 2009) lo que manifiesta su impacto ante el cambio climático.

2.3 Huella de carbono (HC)

El concepto de la huella de carbono es parte de la metodología de análisis del ciclo de vida de un producto y sirve como un indicador de impacto en la medición del potencial de calentamiento global (Finkbeiner 2009). Según PAS 2050, la HC es un término usado para describir la cantidad de GEI emitidos por una actividad particular o entidad y es una forma en que las organizaciones pueden evaluar su contribución al calentamiento global. A partir de la determinación de la HC es posible tomar medidas correctivas para reducir los niveles de emisión en procesos productivos o actividades (Guide PAS 2050; 2008).

La medición de la HC en un producto nos ayuda a evaluar todas las emisiones de gases generados durante su ciclo de vida. El cálculo no es simple, ya que la mayoría de los productos se componen de una amplia gama de procesos y materias primas. Por tanto, las fuentes importantes de emisión pueden darse en el mismo proceso productivo o por utilización de insumos (PCF 2008).

En el pasado, la medición de la HC se centraba en empresas aisladas que de manera voluntaria realizaban esfuerzos por reducir sus propias emisiones. En la actualidad, es cada vez mayor la preocupación en los proveedores, distribuidores y consumidores de productos de mercado (Guide PAS 2050; 2008).

2.4 Empresas y consumidores promueven la baja emisión de carbono

Empresas y consumidores tienen la responsabilidad compartida de velar que los productos que producen y consumen causen menos emisiones e impactos al clima. Las estrategias que las empresas pueden adoptar para producir una menor huella incluyen: la utilización más eficiente de recursos y energía en la producción, compra de insumos con menor HC, la reducción de materiales durante el proceso productivo y la selección de materiales para el diseño del producto (PCF 2008).

Los consumidores pueden emitir menor carbono, adquiriendo productos de larga vida y solicitando productos de baja emisión de carbono al medio ambiente. Si las empresas y consumidores tienen una mejor comprensión del efecto que la utilización de bienes y servicios

causan al clima y modifican sus hábitos de consumo, la reducción de las emisiones de GEI serán importantes para mitigar el cambio climático (PCF 2008).

2.5 Metodología de medición de la HC a partir del Análisis del Ciclo de Vida del producto (ACV)

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que puede ser utilizada para evaluar la carga ambiental de un producto, proceso o actividad a lo largo de su movimiento, transformación o vida (Roy et ál. 2009). PAS 2050 (2008) es la primera guía metodológica que utiliza un ACV en el cálculo de la HC. Desde entonces países como Francia, Japón y Corea han desarrollado sus propios protocolos con base en la Organización Internacional de Normalización (ISO) que tiene una norma internacional (ISO 14067) sobre la medición de la HC de los productos (Finkbeiner 2009).

Según Schneider y Samaniego (2010) las metodologías hoy existentes se dividen en tres tipos:

- Guías generales: normas ISO que representan estándares de referencia para el cálculo de CO₂ (norma ISO 14.040, sobre Análisis de Ciclo de Vida; BS ISO 14.064 sobre GEI)
- Guías específicas: PAS 2050, Bilan Carbone o el GHG Protocolo para la contabilidad, cálculo y monitoreo de GEI.
- Herramientas de cálculo para actividades específicas como el transporte o el comportamiento del consumidor.

Según Guide PAS 2050 (2008) la medición de la HC exige cinco pasos básicos para calcular las emisiones que genera un producto (Figura 4).

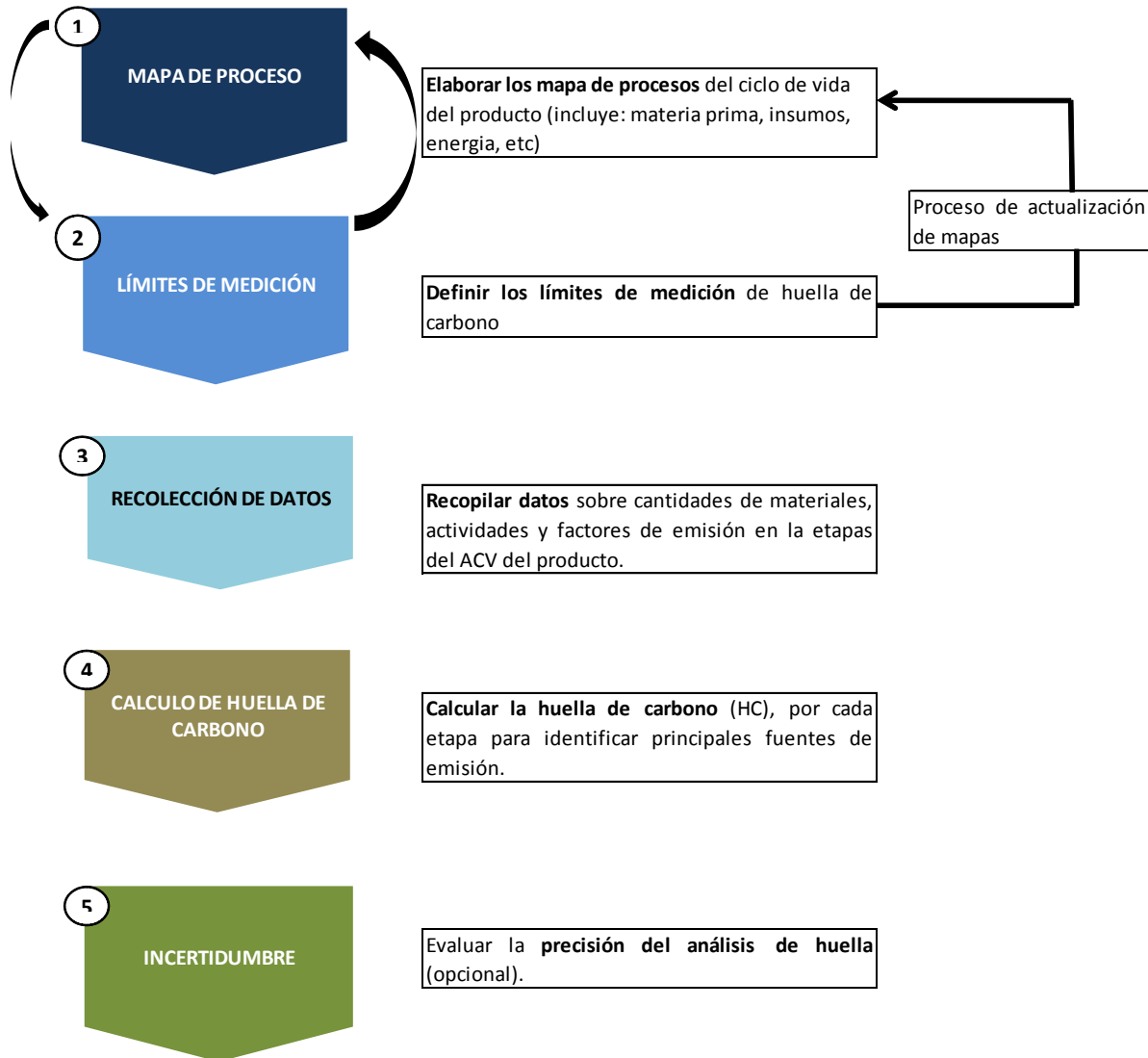


Figura 4. Mapa del proceso para determinar la Huella de carbono en el Análisis de Ciclo de Vida del cacao en Waslala, Nicaragua

Los **límites de medición** definen el alcance de medición de la HC. En esta medición se incluyen las emisiones de todos los procesos que se llevan a cabo como consecuencia directa o indirecta de producir un producto que se fabrica, utiliza y se recicla. Los límites están definidos por alcances de medición.

Alcance 1. Emisiones directas donde el propietario tiene control.

Alcance 2. Emisiones indirectas por las actividades antropogénicas

Alcance 3. Emisiones indirectas hacia arriba y abajo a lo largo de la cadena productiva.

La **recolección de datos** puede ser de fuente primaria o secundaria. Los datos primarios son mediciones directas realizadas en la cadena de suministro o sobre la vida misma del producto. En cambio los datos secundarios son medidas externas no específicas al producto, que son aproximaciones al estudio de ACV (por ejemplo, informes de la producción, industria).

El **cálculo de huella** representa la suma de todos los materiales, energía y residuos durante el ciclo de vida del producto que multiplicado por los factores de emisión respectivos, dan como resultado emisiones de "dióxido de carbono equivalente (CO₂e)" generadas por unidad de producto.

La **incertidumbre**, es una actividad opcional en la medición de HC. La incertidumbre es un término estadístico que mide la exactitud y precisión de una entrada o cálculo de datos en el resultado final de la huella del producto. Además que permite hacer comparaciones de HC. El análisis ofrece varias ventajas:

- Permite establecer los rangos de comparación entre productos para la toma de decisiones.
- Identifica dónde concentrar los esfuerzos de recolección de datos.
- Ayuda a mejorar la comprensión de la HC
- Indica la solidez del cálculo de HC a las audiencias internas y externas

2.6 Los sistemas agroforestales (SAF) y su contribución a la reducción de emisiones de GEI

El uso de tierras de cultivo y tierras para la silvicultura (UTCUTS) con fines de mitigación ha sido un planteamiento popular en el contexto del Protocolo de Kyoto y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), para estabilizar las concentraciones de GEI de la atmósfera. El secuestro de carbono mediante la forestación y la reforestación es una forma de compensar las emisiones generadas por diferentes actividades (Nair et ál. 2009).

En este contexto, la función de los árboles como un medio importante para captar y almacenar el carbono ha sido reconocida ampliamente en la agroforestería y fue aprobada como una estrategia importante de mitigación del cambio climático (Nair et ál. 2009). El secuestro de carbono por medio de los sistemas de tierras, incluido los sistemas agroforestales gira en torno a la interacción de procesos ecológicos y biológicos como la fotosíntesis, la respiración y descomposición (Montagnini y Nair 2004). El carbono secuestrado es la diferencia entre el carbono "adquirido" por la fotosíntesis y el carbono "perdido" o "liberado" por la respiración, esta ganancia o pérdida de carbono representa la productividad neta del ecosistema. Más de la mitad del carbono secuestrado es finalmente es depositado al suelo a través del crecimiento de las raíces y material orgánico. Por lo tanto los suelos contienen la mayor cantidad de carbono del ecosistema (Montagnini y Nair 2004).

La cantidad de carbono almacenado en las tierras de cultivo permanentes, así como la emitida depende del tipo de cultivo, de las prácticas de gestión y de las variables del suelo y del clima. Por ejemplo, los cultivos anuales (cereales, legumbres) que se cosechan todos los años no almacenan carbono en el largo plazo. En cambio, la vegetación leñosa perenne es un depósito de carbono de larga vida, donde la cantidad acumulada depende del tipo de especies y cultivar, de la densidad, de las tasas de crecimiento y de las prácticas de cosecha y poda (IPCC 2006).

3 LITERATURA CITADA

Benson, SM; Dorchak, T; Jacobs, G; Ekmann, J; Bishop, J; Grahame, T. 2000. Carbon dioxide reuse and sequestration: The state of the art today. Berkeley. USA. 22 p.

Canada's Fourth National Report On Climate Change. 2006. Actions to Meet Commitments Under the United Nations Framework Convention on Climate Change. Canada, CA. 298 p.

Climate Change. 2007. Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Valencia. ES. 73 p.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2010. Metodologías de cálculo de la Huella de Carbono y sus potenciales Implicaciones para América Latina. Documento de trabajo. 50 p.

Carlsson y Kanyama, A. 1998. Climate change and dietary choices--how can emissions of greenhouse gases from food consumption be reduced? Food policy 23(3-4):277- 293 p.

- Carlsson y Kanyama, A; Ekström, MP; Shanahan, H. 2003. Food and life cycle energy inputs: consequences of diet and ways to increase efficiency. *Ecological economics* 44 (2-3):293-307 p.
- CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). 2004. Los primeros 10 años. Bonn, DE. 96 p.
- Ferreira Catrileo, OI. 2008. Flujo de gases de efecto invernadero, Potencial de calentamiento global y Evaluación de energía del sistema Agroforestal Quesungual en el Sur de Lempira, Honduras. Tesis M.Sc. Universidad Nacional de Colombia. Lempira, HO. 98 p.
- Finkbeiner, M. 2009. Carbon footprinting opportunities and threats. Springer. Alemania, DE. 14:91-94 p.
- Guide PAS 2050. 2008. How to assess the carbon footprint of goods and services. Gran Bretaña, UK. 59 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, SH. 104 p.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático). 2001 Tercer Informe de Evaluación. Cambio climático Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Consultado sep. 2009. Disponible en: http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.htm.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático). 2006. Guía de las buenas prácticas. Capítulo 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Hayama. JP. 51-574 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* New York, NY, USA. 18 p.
- Iglesias, HD. 2002. Relevamiento exploratorio del análisis del ciclo de vida de producto y su implicancia en el sistema agroalimentario. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 41 p.
- Montagnini, F; Nair, PKR. 2004. Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforest. Syst.* 61, 281–295 p.
- Marlow, HJ; Hayes, WK; Soret, S; Carter, RL; Schwab, ER; Sabaté, J. 2009. Diet and the environment: does what you eat matter? *The American journal of clinical nutrition* 89(5):1699S-1703S.

- Nair, PKR; Nair, VD; Kumar, BM; Haile, SG. 2009. Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. *Environ. Sci. Policy*. 10: 10-16p
- Ortega, PSCA; García Guerrero, CA; Ruíz, J. Sabogal; Vargas, JD. 2010. Deforestación Evitada. Una Guía REDD + Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; Conservación Internacional Colombia; Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF); The Nature Conservancy; Corporación Ecoversa; Fundación Natura; Agencia de Cooperación Americana (USAID); Patrimonio Natural - Fondo para la Biodiversidad y Áreas Protegidas y Fondo para la Acción Ambiental. Bogotá, CO. 72 p
- Peters, GP; Hertwich, EG. 2008. CO₂ embodied in international trade with implications for global climate policy. *Environmental Science & Technology* 42(5):1401-1407 p.
- Plassmann, K.; Jones, EG. 2009. Where does the carbon footprint fall?. Developing a carbon map of food production. London, UK. 34 .
- PAS 2050. 2008. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. British standards. Gran Bretaña.UK. 43 p.
- PCF (Pilot Projekt Deutschland). 2008. Case Study Tchibo Private Kaffee Rarität Machare by Tchibo GMBH. Alemania, DE. 38 p.
- Pathak, H; Jain, N; Bhatia, A; Patel, J; Aggarwal, PK. 2010. Carbon footprints of Indian food items. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 39(1-2), 66-73 p.
- Roy, P; Nei, D; Oriksa, T; Xu, Q; Okadome, H; Nakamura, N; Shiina, T. 2009. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering* 90(1):1-10 p.
- Schneider, H; Samaniego, JL. 2010. La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios. Documento proyecto. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago, CH. 43 p.
- Stehfest, E; Bouwman, L; van Vuuren, DP; den Elzen, MGJ; Eickhout, B; Kabat, P. 2009. Climate benefits of changing diet. *Climatic change* 95(1):83-102 p.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), 2007. Agreements to protect the climate system for present and future. 25 p.
- Velázquez, C.G.F, 2005. Cambio Climático y Protocolo de Kioto: Estrategias y compromisos para España. *Revista Española*. Vol 79. Nro. 002. Madrid, ES. 191-201 p.
- WCF (World Cocoa Foundation). 2010. Cocoa Market Update. Consultado el 10 dic. 2010. Disponible en <http://www.worldcocoafoundation.org/learn-about-cocoa/documents/CocoaMarketUpdateasof5.18.10.pdf>
- Weber, CL; Matthews, HS. 2008. Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the United States. *Environmental Science & Technology* 42(10):3508-3513 p.

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 (CO₂), metano (CH₄), óxido nítrico (NO₂), ozono (O₃) 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 (CO₂) 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⁻¹ de carbono en la biomasa viva (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⁻¹ año⁻¹ 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⁻¹ año⁻¹ (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).

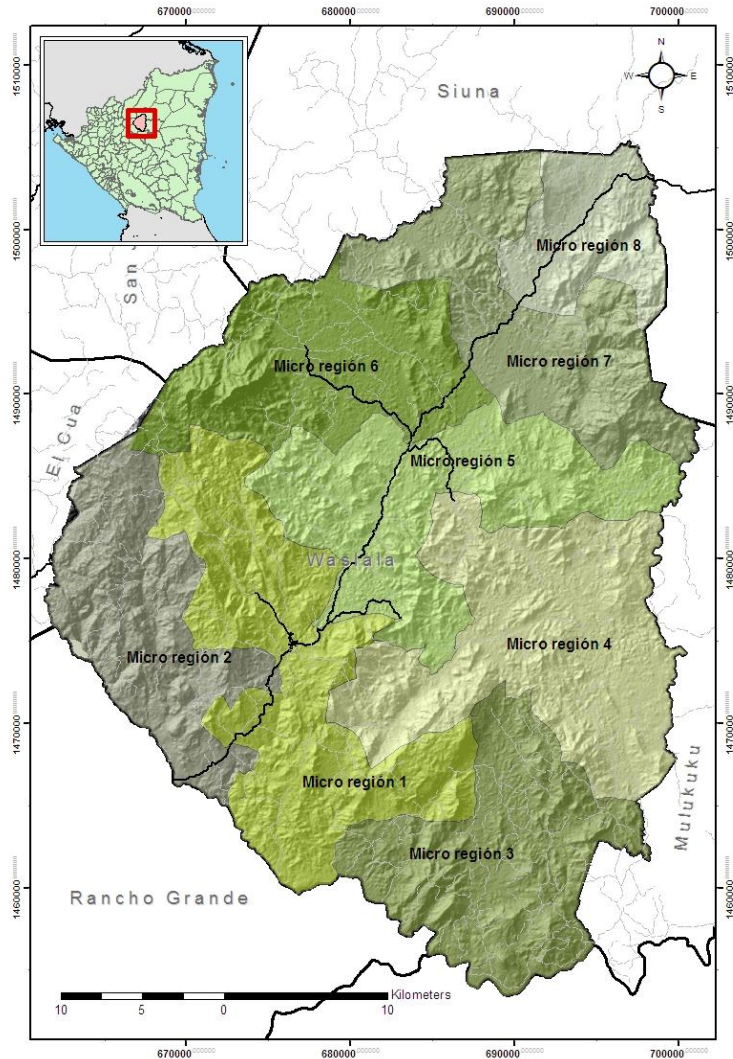


Figura 5. Mapa de Ubicación de Waslala. Nicaragua

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 m² (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:

ΔC = cambio anual promedio en las existencias de carbono (Mg ha⁻¹ año⁻¹)

C_{t_1} = existencias de carbono promedio en el 2011 (Mg ha⁻¹ año⁻¹)

C_{t_2} = existencias de carbono promedio en el 2009 (Mg ha⁻¹ año⁻¹)

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⁻¹ 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	$Bt = 10^{(-1,11 + 2,64 * \log(dap))}$	Andrade <i>et al</i> (en preparación)
Laurel (<i>Cordia alliodora</i>)	$Bt = 10^{((-0,76 + 2,38 * \log(dap))}$	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	$Bt = 10^{((2,3408 * (\log(dap))) - 0,9578)}$	Ortiz (1997)
Arboles mayor 50 cm dap	$Bt = \text{Exp}(-2,289 + 2,649 * \text{Ln}(dap) - 0,021 * (\text{Ln}(dap))^2)$	
Cacao (<i>Teobroma cacao</i>)	$Bt = 10^{(-1,63 + 2,63 * \log(dap30))}$	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 $3,3 \pm 1,6$ Mg ha⁻¹ año⁻¹ de carbono en la biomasa arriba y debajo del suelo, con variaciones entre 0,9 a 5,5 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ (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
C-Total		261.6	272.3	65.7	78.1	1.1	9.1	80.5	86.3	1.1	4.0	0.4	10.0	2.0	12.2	412.3	471.0	58.6	29.3
C promedio		29.1	30.3	7.3	8.7	0.1	1.0	8.9	9.6	0.1	0.4	0.04	1.1	0.2	1.4	45.8	52.3	6.5	3.3
C anual fijado			0.59		0.69		0.44		0.32		0.16		0.54		0.57				3.3
% fijación C			18		21		13		10		5		16		17				100

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⁻¹ año⁻¹ (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
2009	54	34.0	195	23	11.1	21.7	10	6.8	37.6	8	2.2	7.3	95	54.1	261.6
2011	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
Tasa de cambio	18	2.1	6.7	1	-0.3	-0.1	2	0.6	2.5	2	0.4	1.5	23	2.8	10.6

*AB (m² ha⁻¹); C (Mg ha⁻¹)

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⁻¹. En cambio, la *Cordia alliodora* como maderable se encontró a densidades promedio de 7 árboles ha⁻¹ (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).

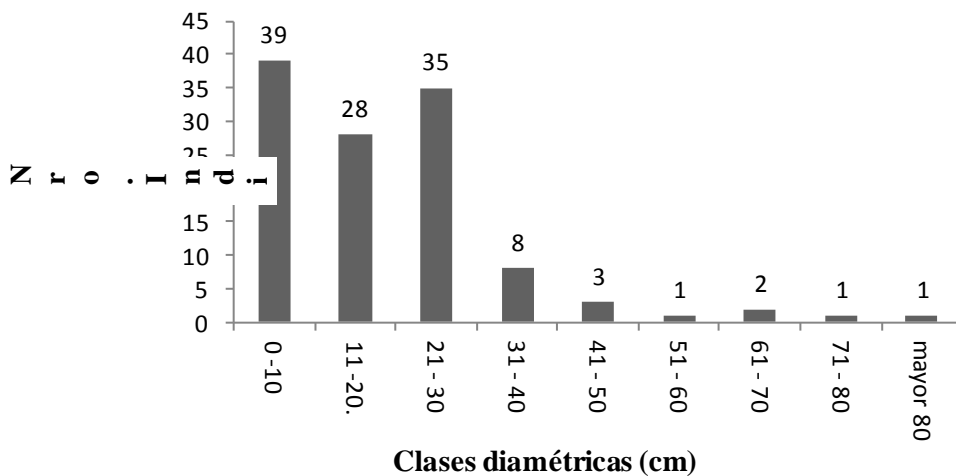


Figura 7. Distribución diamétrica de árboles censados en 2011 en 9 PPM de cacao en Waslala, Nicaragua.

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 Mg ha^{-1} de biomasa en parcelas con *E. poeppigiana* y 168 a 184 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 compartimientos 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⁻¹ año⁻¹ 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 ha¹, 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.

5. ARTÍCULO 2. HUELLA DE CARBONO Y ESTRATEGIAS DE REDUCCIÓN EN EL CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DEL CACAO (*Theobroma cacao* L.) EN WASLALA, NICARAGUA.

5.1 INTRODUCCIÓN

El calentamiento global y la reducción de las emisiones de carbono son la agenda actual de los países en torno al medio ambiente (Weidema et ál. 2008). Esta creciente preocupación mundial sobre el clima ha impulsado a organizaciones e instituciones a profundizar el conocimiento sobre los gases de efecto invernadero (GEI; Schneider y Samaniego 2010). Los GEI como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nítrico (N₂O) y fluorocarbonos han aumentado sus concentraciones en un 70% desde 1970 a 2004 por actividades humanas (IPCC 2007).

El comercio internacional de bienes y servicios generan la cuarta parte de las emisiones antropogénicas en el mundo. En el 2005 las emisiones por actividades humanas alcanzaron a 42 Gt de CO₂e (dióxido de carbono equivalente), siendo 14,3 Gt atribuido al comercio de productos agrícolas (Carbón Trust 2011). En la próxima década, se espera que los bienes producidos con baja emisión de GEI sea un elemento clave en los negocios y políticas de Estado en la lucha contra el cambio climático (Carbón Trust 2011).

Un indicador de medida de los GEI producidos por actividades, procesos y productos es la Huella de carbono (HC), un indicador que cuantifica la presión que ejerce el ser humano a los ecosistemas que tienen la capacidad de remover y almacenar carbono (Guerra 2007). La HC en la cadena de producción permite identificar las rutas para controlar, reducir o mitigar las emisiones de GEI y sus impactos, siendo cada vez mayor su alcance en el comercio de bienes y servicios tranzados entre países (Schneider y Samaniego 2010). La medición de la HC no tiene una metodología estándar a nivel mundial y países como Reino Unido, Francia, Alemania han optado por medir la HC de los productos a partir de normas internacionales ISO basadas en el análisis del ciclo de vida (Schneider y Samaniego 2010).

Existen formas de reducir la HC que generan los productos. Estudios al respecto plantean un uso bajo de carbono en términos de utilización de combustibles fósiles en los procesos productivos. En cambio, otros orientan su atención a los ecosistemas naturales como una opción importante de reducción a las emisiones (Carbon Trust 2011). El Panel intergubernamental sobre el cambio climático considera que el secuestro de carbono en el suelo, mediante el manejo de tierras, así como la recuperación de tierras degradadas ofrecen un potencial importante de mitigación al cambio climático (IPCC 2006).

El cacao producido por los socios de la Cooperativa de Servicios Agroforestales y de Comercialización de Cacao (CACAONICA) en Waslala, Nicaragua es comercializado a la empresa chocolatera Ritter Sport de Alemania (96% de la producción) y al mercado nacional. El objetivo del estudio es conocer la HC que genera la cadena de producción y comercialización cacao de la cooperativa CACAONICA y a partir de ello proveer recomendaciones para reducirla.

5.2 MATERIALES Y MÉTODOS

5.2.1 Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en la Cooperativa de Servicios Agroforestales y de Comercialización de Cacao (CACAONICA), ubicada en el Municipio de Waslala en la Región Autónoma del Atlántico Norte (RAAN) de Nicaragua. El Municipio se ubica entre los paralelos 13°20'-13°31' latitud norte y 85° 13'- 85°22' longitud oeste. Los sistemas agroforestales (SAF) de cacao se ubican a una altitud media de 390 m (240 a 622 m), temperatura media anual 24°C (INETER 2003) con máximas en mayo y las mínimas en diciembre. La precipitación media anual es de 2224 mm y su distribución es bimodal (INETER 2003) con máximas de mayo a noviembre y las mínimas de diciembre hasta el mes de abril (Figura 8). La humedad relativa media es de 84% (Philipp y Gamboa 2003).

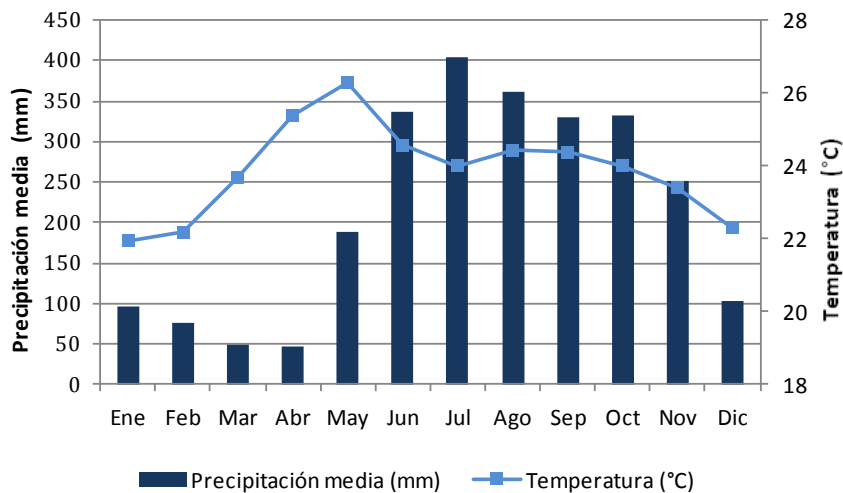


Figura 8. Precipitaciones y temperaturas mensuales de Waslala, Nicaragua (según datos de clima INETER 2003)

5.2.2 Cadena de producción y comercialización de cacao de la cooperativa CACAONICA

El estudio de HC midió las emisiones generadas desde la producción en la finca hasta la comercialización del grano de cacao por la cooperativa (Figura 9). Se identificaron tres rutas de producción-venta de cacao a la cooperativa: 1) los productores cosechan el cacao fresco (en baba) en la finca y lo transportan a un centro de acopio local en su comunidad, donde fermentan y secan el grano para luego transportarlo al centro de acopio CACAONICA, 2) los productores realizan la fermentación y secado en la misma finca y luego transportan el cacao al centro de acopio CACAONICA y 3) otros productores entregan el cacao en baba a la central de acopio CACAONICA, donde continua el proceso de beneficiado. Luego la cooperativa re-selecciona las calidades finales del cacao seco para la venta sus compradores. El cacao orgánico y convencional que cumple estándares de calidad se vende a la compañía chocolatera Ritter Sport en la ciudad de Sébaco (120 km de Waslala aprox.) y las calidades convencional, tradicional (cacao no fermentado) y de rechazo por Ritter Sport son destinadas a pulperías y al mercado de Managua en Nicaragua (Figura 10; Escobedo 2010).

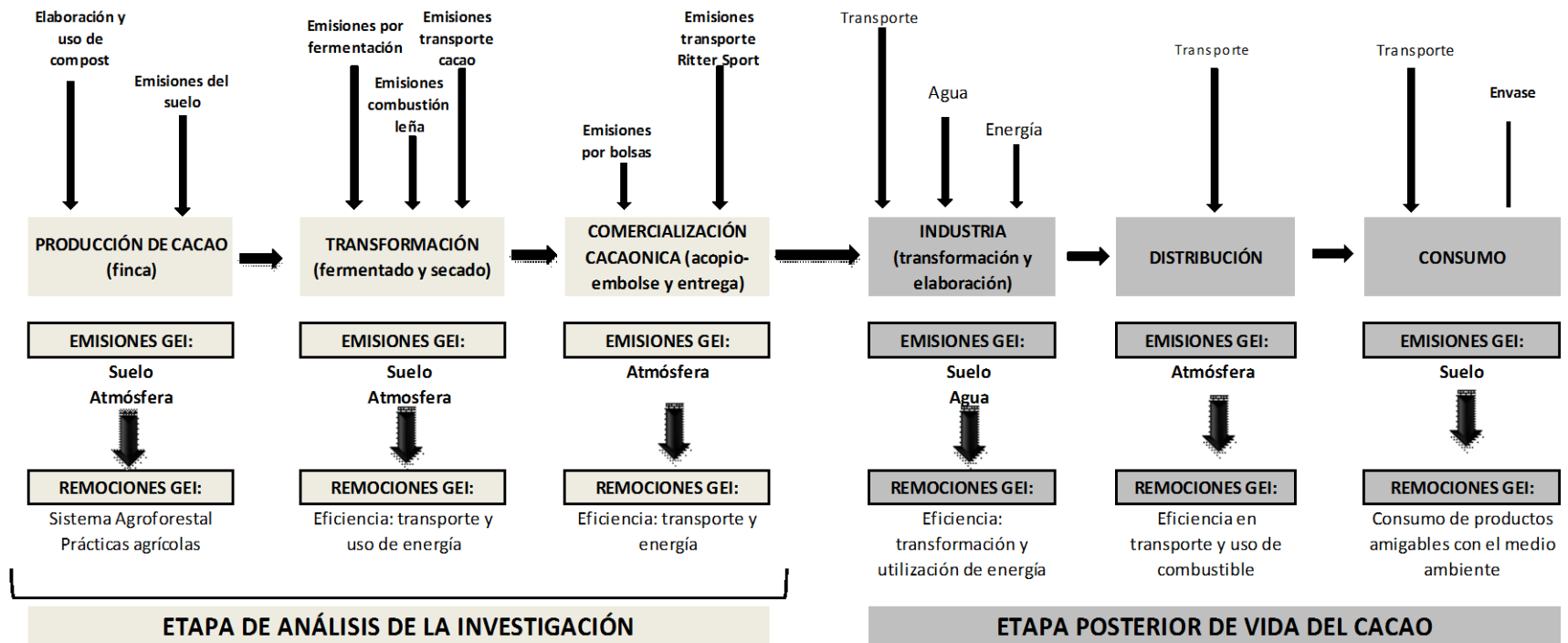


Figura 9. Diagrama del análisis del ciclo de vida (ACV) del cacao en el área de influencia de CACAONICA, Waslala, Nicaragua

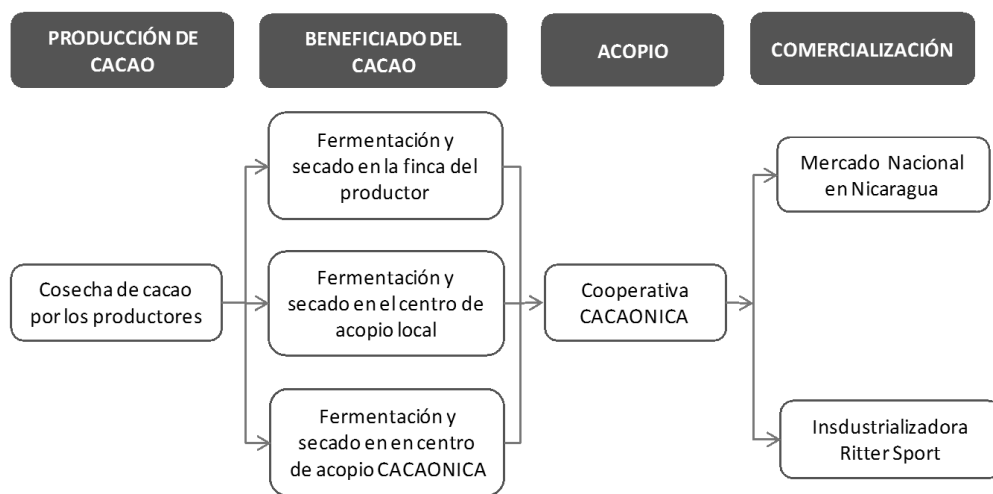


Figura 10. Cadena de producción y comercialización del cacao de la cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua.

5.2.3 Alcance de medición de la huella de carbono del cacao

Un análisis del ciclo de vida (ACV) completo del cacao incluye medir emisiones del cultivo, transformación, comercialización, industria en el extranjero, distribución, consumo y reciclaje. En el estudio en Waslala se evaluó solo tres etapas iniciales del ACV que tiene control la cooperativa CACAONICA (Figura 9). Estas etapas contemplaron evaluar en un ciclo de 1 año: 1) Emisiones de GEI en el suelo de los SAF de cacao, 2) Emisiones de N₂O por elaboración y aplicación de compost al cacao, 3) Emisiones de CO₂ en la fermentación del cacao, 4) Emisiones por quema de leña en el secado del cacao húmedo, 5) Emisiones por fabricación y uso de sacos de "plástico" y "yute" para el empaque del cacao y 6) Emisiones por uso de combustible en el transporte de cacao. Todas expresadas en kg CO₂e por kg de cacao seco.

5.2.4 Metodología

5.2.4.1 Cálculo de la Huella de carbono del cacao

Las fuentes de emisión de la HC del cacao se eligieron con base a consideraciones tomadas en la norma PAS 2050 (2011), estándar internacional que considera todas las fuentes de emisión a excepción de las emisiones del suelo, que para efectos del estudio fue considerado importante, debido a los cambios de carbono que se generan en el suelo.

Emisiones en el suelo de los SAF de cacao

Para estimar las emisiones del suelo se seleccionaron tres Parcelas Permanentes de Medición (PPM) del Proyecto Cacao Centroamérica (PCC-CATIE) en Waslala. Para esa elección, se hizo un análisis de conglomerados utilizando variables relacionadas con el manejo del cacao, características físico químicas del suelo, niveles de carbono almacenado en los SAF y condiciones de topografía y altitud. A partir del análisis de conglomerados se seleccionó una parcela de cada uno de los tres grupos resultantes (Anexo 2). En cada parcela se hicieron mediciones de CH₄, NO₂ y CO₂ mediante la técnica de la cámara cerrada (Figura 11b), instalando tres cámaras por parcela en forma diagonal (Ferreira 2008) donde se recolectaron las muestras de gases durante los meses de abril a junio del 2011.

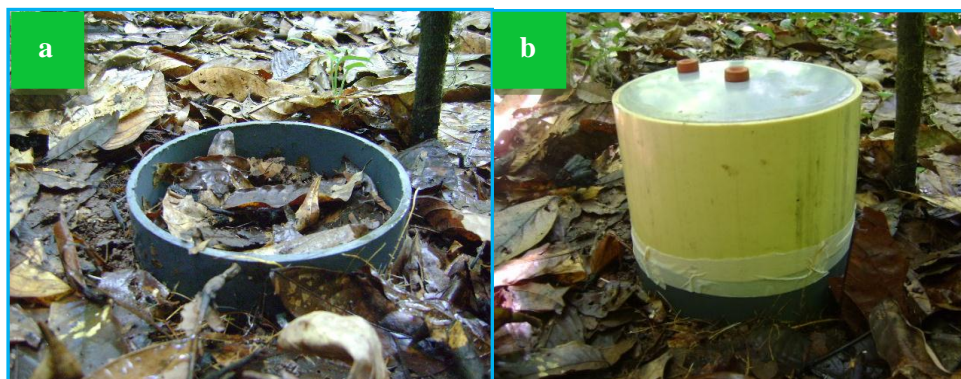


Figura 11. (a) Anillo y (b) Cámara de cerrado para muestreo de gases en cacaotales de Waslala, Nicaragua.

Los muestreos de gases en el suelo se realizaron cada 14 días (Figura 12a), extrayendo 15 ml de gas con una jeringa en tiempos de 0 y 30 minutos (Ferreira 2008). En cada recolección se eliminaron 5 ml de gas y los restantes 10 ml fueron transferidos a un frasco de

vidrio al vacío de 12 ml de capacidad. Paralelamente se midió la temperatura del aire en la cámara en los tiempos de muestreo de los gases (Figura 12b). Las muestras de gases y datos de temperatura fueron enviados al laboratorio del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT-Colombia) para calcular la concentración y flujo de GEI mediante cromatografía de gases (Rondón 2000; Ferreira 2008).

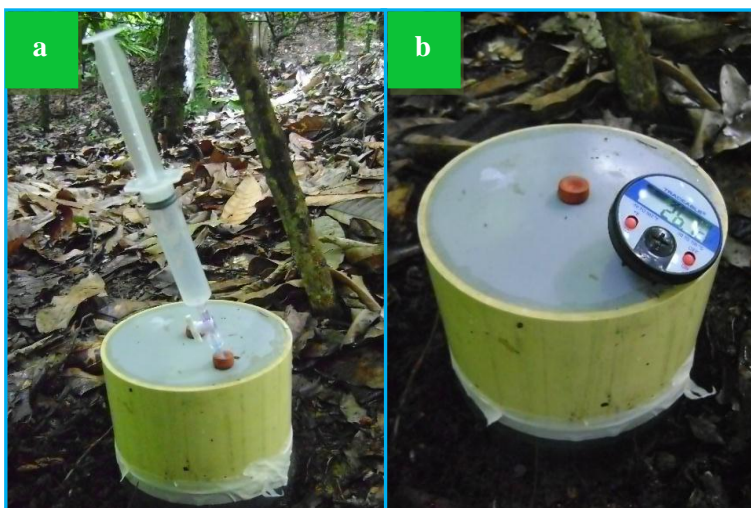


Figura 12. (a) Muestreo de gases y (b) Muestreo de temperatura mediante el método de cámara cerrada en Parcelas Permanentes de Medición en Waslala, Nicaragua

Las concentraciones de CO₂, CH₄ y N₂O reportados por el laboratorio fueron transformados a kg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹ para calcular las emisiones promedio de las tres PPM. Este valor promedio de emisión se dividió con el rendimiento promedio de cacao por hectárea de la zona (300 kg), para estimar la emisión que genera producir 1 kg de cacao seco. Según la siguiente relación.

$$E = (EP_1 + EP_2 + EP_3 / N) / R \quad [2]$$

$$EP = FA_{N_2O} * PCG_{N_2O} + FA_{CH_4} * PCG_{CH_4} + EF_{CO_2} \quad [3]$$

Donde:

E = emisión promedio de las tres parcelas permanente de medición (kg CO₂e kg⁻¹ cacao)

EP = emisiones por cada parcela (kg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹)

N = número de parcelas

R = rendimiento promedio de cacao seco en la zona (300 kg ha⁻¹ año⁻¹)

FA = flujo acumulado anual de cada gas obtenido en laboratorio (kg ha⁻¹ año⁻¹)

PCG= potencial de calentamiento global (CH₄=21; N₂O=310; CO₂=1)

Emissiones de N₂O por elaboración y uso de compost

Las emisiones por elaboración de compost se calcularon con base en datos de la certificación de la compañía Biolatina 2010 (Chavarria et ál. 2010). Se tomaron registros de producción de compost por cada socio y se compararon con la superficie aplicada por el agricultor (en preferencia solo fertilizan la plantación de cacao en producción) para estimar la cantidad de compost promedio elaborado por hectárea. Esta cantidad de compost por cada socio fue sumado entre todos para obtener un promedio de producción de compost de la cooperativa. A este promedio se multiplico un factor de emisión 0,31 (Hellebrand 1998) y se dividió el rendimiento promedio de cacao por hectárea (300 kg cacao), para calcular la emisión que genera producir 1 kg de cacao seco. Los cálculos parten de la siguiente relación.

$$E = [\sum (x_1 + x_2 \dots x_n) / N] * FE / R * 0,26 \quad [4]$$

Donde:

E = emisión promedio anual por elaboración de compost (kg CO₂e kg⁻¹ cacao)

x₁ + x₂ ... x_n = cantidad de compost anual elaborado por cada socio de la cooperativa (kg año⁻¹)

N = número de hectáreas en producción de cacao (ha)

R = rendimiento promedio de cacao seco (300 kg ha⁻¹ año⁻¹)

FE = factor de emisión del compost (0,31 kg CO₂e kg⁻¹ compost)

0,26 = porcentaje de productores que aplican compost

Las emisiones de N₂O por aplicación y volatilización fueron calculadas a partir de la cantidad promedio de compost elaborado por los socios de la cooperativa (asumiendo que la elaboración es igual a la aplicación de compost). A esta cantidad de compost se aplicó un factor de emisión de N₂O-directa y otra por volatilización (IPCC 2006) para calcular las emisiones por uso de compost. Siendo el cálculo el siguiente.

$$E_{N2O-Directa} = (\sum x_1 + x_2 \dots x_n / N) * \%NC * FE_1 * 1,43 \quad [5]$$

$$E_{N2O-Volatilización} = (\sum x_1 + x_2 \dots x_n / N) * \%NC * FE_4 * FRAC * 1,43 \quad [6]$$

$$E_{N2O-totales} = E_{N2O-Directa} + E_{N2O-Volatilización} \quad [7]$$

$$E_{CO2e-totales} = (E_{N2O-Totales} * PCG_{N2O} / R) * 0,26 \quad [8]$$

Donde:

$E_{N_2O_{Directa}}$ = emisión promedio directa por aplicación de compost al año ($kg\ N_2O\ ha^{-1}\ año^{-1}$)

$E_{N_2O_{Volatilización}}$ = emisión promedio por volatilización de compost al año ($kg\ N_2O\ ha^{-1}\ año^{-1}$)

$E_{N_2O_{totales}}$ = emisión promedio anual por aplicación de compost ($kg\ N_2O\ ha^{-1}\ año^{-1}$)

E_{APLIC} = emisión promedio anual por aplicación de compost ($kg\ CO_2e\ kg^{-1}\ cacao$)

$x_1 + x_2 \dots x_n$ = cantidad de compost anual elaborado por cada socio de la cooperativa ($kg\ año^{-1}$)

%NC = porcentaje de nitrógeno en compost (2% N)

FE_1 = factor de emisión de aportes de N por compost [$kg\ N_2O-N\ (kg\ N)^{-1}$] (0,01; IPCC 2006)

FE_4 = factor de volatilización de N por compost $kg\ N_2O-N\ (kg\ NH_3-N + NOX-N\ volatilizado)$
(valor 0,01 IPCC 2006)

F_{RAC} = factor de emisión por volatilización de N por compost ($kg\ NH_3-N + NOX-N$) ($kg\ N$ aplicado) (0,2; IPCC 2006)

R = rendimiento promedio de cacao seco ($300\ kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$)

1,43 = factor de conversión N_2O-N

PCG = potencial de calentamiento global del N_2O (IPCC 2006)

0,26 = porcentaje de productores que aplican compost

Emisiones de CO_2 en la fermentación del cacao

Las emisiones de CO_2 en la fermentación del cacao se calcularon midiendo la tasa oxidación de los azúcares (glucosa y fructuosa) contenidos en la pulpa del cacao. Estudios sobre fermentación de cacao reportan contenidos de $56,6 \pm 8,3\ mg\ g^{-1}$ materia seca (MS) para la glucosa y $88,8 \pm 6,9\ mg\ g^{-1}$ MS para la fructosa (Lagunes et ál. 2006). Estas cantidades de azúcares fueron transformadas a CO_2 siguiendo una balance estequiometrico ($C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$) y asumiendo que la glucosa y fructuosa cumplen con la misma reacción química en la fermentación. Los cálculos responden a la siguiente reacción.

$$E_{glucosa} = PM_{CO_2} * C_{glucosa-cacao} / PM_{glucosa} * kg\ cacao \quad [9]$$

$$E_{fructuosa} = PM_{CO_2} * C_{fructuosa-cacao} / PM_{fructuosa} * kg\ cacao \quad [10]$$

$$E = E_{glucosa} + E_{fructuosa} \quad [111]$$

Donde:

E= emisión total en la fermentación de cacao (kg CO₂e kg⁻¹ cacao)

PM_{CO₂} = peso molecular del dióxido de carbono (88 kg)

C glucosa-cacao = cantidad de glucosa contenida en un kg de cacao seco (kg)

C fructuosa-cacao = cantidad de fructuosa contenida en un kg de cacao seco (kg)

PM glucosa = peso molecular de la glucosa (180 kg)

PM fructuosa = peso molecular de la fructuosa (180 kg)

Emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O en el secado de cacao

Las emisiones en el secado de cacao se estimaron con base a registros de compra de leña que la cooperativa CACAONICA realizó en el periodo 08/2010-08/2011; a factores de emisión tomados de la literatura para *Betula cordifolia* (Haakonson et ál. 2001; Zhang et ál. 2000) y al consumo de leña promedio (kg) en cada secado de cacao. La emisión promedio generado en cada secado se dividió entre la cantidad de cacao seco procesado para determinar la emisión que produce secar 1 kg de cacao seco. Los cálculos responden a la siguiente relación.

$$E = CL (FE_{N_2O} \times PCG_{N_2O} + FE_{CH_4} \times PCG_{CH_4} + FE_{CO_2}) / CS \quad [12]$$

Donde:

E= emisión promedio de leña por cada secado (kg CO₂e kg⁻¹ cacao)

CL = consumo de leña en cada secado (kg)

EF= factor de emisión según para abedul (CH₄= 0,0058; N₂O= 0,000022; CO₂= 1,52)

PCG= potencial de calentamiento global (CH₄= 21; N₂O= 310; CO₂= 1)

CS = cantidad de cacao seco al finalizar el secado (kg cacao al 7% de humedad).

Emisiones de CO₂ por uso de combustible fósil en el transporte de cacao

Se identificaron dos fuentes de emisión en el transporte: a) aquel generado por productores desde la finca hasta el centro de acopio en Waslala y b) aquel realizado por la cooperativa para la entrega de cacao a Ritter Sport en Sébaco, Matagalpa.

La emisión en el transporte del cacao desde las fincas hacia el centro de acopio CACAONICA en Waslala se calculó monitoreando la procedencia (comunidad) y el número de entregas de los socios a la cooperativa en el año (base de datos de la cooperativa). A partir de ello, se aplicaron encuestas a conductores para determinar las distancias aproximadas, capacidad de carga y gasto de combustible utilizado desde las comunidades hacia el centro poblado de Waslala. Obtenido el gasto total de combustible se multiplicó un factor de emisión 2,83 kg CO₂ litro⁻¹ (IPCC 2006) y se dividió entre la cantidad de cacao transportado en el año, para estimar la emisión promedio que genera transportar 1 kg de cacao desde las fincas hacia el centro de acopio de la cooperativa. Según metodología de nivel 1 del IPCC (2006) presentado en la ecuación 13.

$$E = \sum CC * FE_{diesel} / CT \quad [13]$$

Donde:

E = emisión promedio anual del gasto de combustible (kg CO₂e kg⁻¹ cacao)

CC = cantidad de combustible utilizado al año (litro)

FE= factor de emisión del diesel (2,83 kg CO₂e litro⁻¹ diesel; IPCC 2006)

CT= cantidad de cacao seco transportado en el año

La emisión desde el centro de acopio en Waslala hacia las bodegas de Ritter Sport en Sébaco se calculó con en base a registros de volúmenes de venta y pagos por servicio de transporte que la cooperativa CACAONICA realizó en el año. Estos datos junto con la aplicación de entrevistas a conductores, permitieron estimar la distancia recorrida y el gasto de combustible realizado. La estimación de la emisión se realizó en base a la ecuación 13.

Emisiones por fabricación y reciclaje de sacos de cacao

Se tomaron registros de entrega de cacao que la cooperativa CACAONICA realizó entre el periodo 08/2010 al 08/2011 a la empresa Ritter Sport en Sébaco y mercado nacional. Obtenida la cantidad de sacos de yute (Ritter Sport) y de plástico (mercado nacional) se pesó una muestra de ellos para estimar el peso promedio de cada material. A cada peso promedio (yute o plástico) se multiplicó el número total de sacos utilizados y se aplicó un factor de emisión por fabricación (6 kg de CO₂e por kg de plástico) y reciclaje (3,5 kg de CO₂e por kg plástico incinerado; <http://timeforchange.org/plastic-bags-and-plastic-bottles-CO2-emissions>)

obteniendo las emisiones totales generadas. Estas emisiones totales se dividieron con el volumen total de cacao envasado (kg) en el año por la cooperativa, para calcular la emisión promedio que genera envasar 1 kg de cacao. Los cálculos se muestran en la siguiente ecuación.

$$E = [P * (FE_{Fabricación} + FE_{Reciclado})] / C \quad [14]$$

Donde:

E = emisión por fabricación y reciclado de sacos (kgCO₂ kg⁻¹ cacao)

P = peso total de sacos utilizadas al año (kg)

FE = factor de emisión, según corresponda (fabricación o reciclado)

C = cantidad de cacao seco envasado en la cooperativa al año

Los cálculos de la ecuación 14 responden a los siguientes supuestos: 1) Los factores de emisión por fabricación y reciclado fueron aplicados por igual a envases de plástico y yute, 2) No se consideraron las emisiones por transporte de bolsas desde la fábrica en Guatemala hasta Waslala.

Estimación de la huella de carbono del cacao

Se sumaron todas las emisiones en términos de "dióxido de carbono equivalente (CO₂e)" en cada etapa de movimiento del cacao. La unidad funcional utilizada en la medición de la HC fue kg CO₂e por kg de cacao seco y su cálculo responde a la siguiente relación.

$$HC = E_{SUELO} + E_{COMPOST} + E_{TRANSP} + E_{FERM} + E_{SECADO} + E_{BOLSAS} + E_{TRANSP\ RITTER} \quad [15]$$

Donde:

HC = huella de carbono del cacao grano (kg CO₂e kg⁻¹ cacao seco comercializado)

E_{SUELO} = emisiones en el suelo

E_{COMPOST} = emisiones por elaboración y uso de compost

E_{TRANSP} = emisiones por transporte de cacao de la finca al centro de acopio en Waslala

E_{FERM} = emisiones por fermentación de cacao

E_{SECADO} = emisiones por secado a leña del cacao

E_{BOLSAS} = emisiones por utilización y ciclaje de bolsas

$E_{\text{TRANSP RITTER}}$ = emisiones por transporte de cacao desde CACAONICA en Waslala hasta las bodegas de Ritter Sport en Sébaco

5.2.4.2 Balance de carbono a través de simulaciones

El balance de carbono en términos de CO_2 debe comprenderse como un proceso dinámico de movimiento de gases, donde existen salidas (emisiones de gases generadas en la HC) y entradas (remociones de gases por el componente arbóreo; GAMMA 2010). Sin embargo, por la naturaleza de esta investigación, cada variable que compone el balance, puede mostrar variabilidad en una medición a otra. Por tanto, una medida de tendencia central (como la media en el estudio) debe estar asociada a una medida de dispersión central (varianza, desvío estándar, error estándar, límites de confianza) para representar esta variabilidad.

Para este balance de carbono se combinaron 14 variables de estudio (7 variables de remoción del artículo 1 comparadas con 7 variables de emisión del artículo 2) con media y desvío estándar respectivamente. Mediante un lenguaje de programación (R) se simularon 10^6 combinaciones de estas variables para determinar la media y los intervalos de confianza del balance de carbono. Según muestra la siguiente relación.

$$BC = \sum R (\mu_1, \sigma_1^2 + \mu_2, \sigma_2^2 + \dots \mu_7, \sigma_7^2) - \sum E (\mu_1, \sigma_1^2 + \mu_2, \sigma_2^2 + \dots \mu_7, \sigma_7^2) \quad [16]$$

BC = balance de carbono entre remociones y emisiones ($\text{kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$ cacao seco)

\sum_R = remociones con media (μ) y desvío estándar (σ) del dosel de sombra; del cacao; raíces finas; raíces gruesas, necromasa fina; necromasa gruesa y hojarasca expresados en $\text{kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$ cacao seco.

\sum_E = emisiones con media (μ) y desvío estándar (σ) del suelo; por elaboración y uso de compost; por el transporte de la finca hacia el centro de acopio CACAONICA; fermentado del cacao; secado a leña del cacao; uso de sacos de empaque de cacao y emisiones por transporte del cacao desde el centro de acopio en Waslala hacia la bodegas de Ritter Sport en Sébaco expresados en $\text{kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$ cacao seco.

5.2.4.3 Análisis estadístico

Los datos de las emisiones de la HC se analizaron mediante estadística descriptiva (media, desvío estándar y valores porcentuales). Las tres tipologías agroforestales se

clasificaron mediante un análisis de conglomerados y un análisis de varianza multivariado (MANOVA) en el software Infostat (Di Rienzo et ál. 2009). Las simulaciones del balance de carbono se realizaron con el programa R, versión 2.10.1 (2009) a través de un lenguaje script combinando 14 variables (13 con distribución normal y una de distribución binomial) en el rango de su dispersión o desvió estándar.

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Huella de carbono

La producción y comercialización de 1 kg de cacao por la cooperativa CACAONICA a la empresa Ritter Sport (comprador del 96% de la producción de cacao) genera una emisión de 4,98 kg de CO₂e a la atmosfera. Las fuentes que mayor construyeron a la HC fueron el suelo y el secado a leña del cacao que representa el 91% de las emisiones totales (Cuadro 5).

Cuadro 5. Presentación de la Huella de Carbono (HC) del cacao producido por la cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua.

Fuentes de emisión en el ciclo de vida del cacao	Emisiones (kg CO₂e kg⁻¹ cacao)	* DE	% HC
Emision del suelo	3.85 ±	3.74	77.3
Elaboración y uso compost	0.14 ±	0.15	2.8
Transporte comunidades-Waslala	0.06 ±	0.03	1.2
Fermentacion de cacao	0.07 ±	0	1.4
Combustion de leña para secado	0.67 ±	0	13.5
Envasado del cacao	0.10 ±	0	2.1
Transporte Waslala-Sebaco (Ritter)	0.09 ±	0	1.7
Total	4.98		100.0

El suelo fue responsable del 77% (3,85± 3,74 kg CO₂e) de la HC, siendo el oxido nitroso (en términos de CO₂e) entre sus componentes el mayor emisor de gas en el suelo (50%), seguido de dióxido de carbono (48%) y metano (2%; Cuadro 6). Las tres tipologías agroforestales tuvieron alta variabilidad en las emisiones de GEI en el suelo (Figura 13). Los gases en el suelo se comportaron como emisor y sumidero en la época seca (febrero a mayo) y como emisor durante la época lluviosa (Figura 14).

Cuadro 6. Emisiones de gases efecto invernadero del suelo evaluadas en tres Parcelas Permanentes de Medición (PPM) en Waslala, Nicaragua

Descripción	Dioxido	Metano	Oxido	Emisión	DE*	Rdto. Prom.	Emisión	DE*
	carbono		nitroso	promedio		Cacao (kg	promedio	
		** kg CO ₂ e ha ⁻¹	ha ⁻¹	año ⁻¹		ha ⁻¹)	kg CO ₂ e kg ⁻¹ cacao	
PPM-Ocotetuma	694.2	-0.3	1260.7	651.5 ±	631.6	300	2.17 ± 2.11	
PPM-Kusulí	2273.9	30.1	3156.1	1820.1 ±	1611.6	300	6.07 ± 5.37	
PPM-Ciprés	2060.9	151.4	780.4	997.6 ±	973.1	300	3.33 ± 3.24	
Emision SAF	5029.0	181.3	5197.2	1156.4 ±	1120.7		3.85 ± 3.74	

*DE: desviación estándar

** metano y óxido nitroso están en términos CO₂equivalente

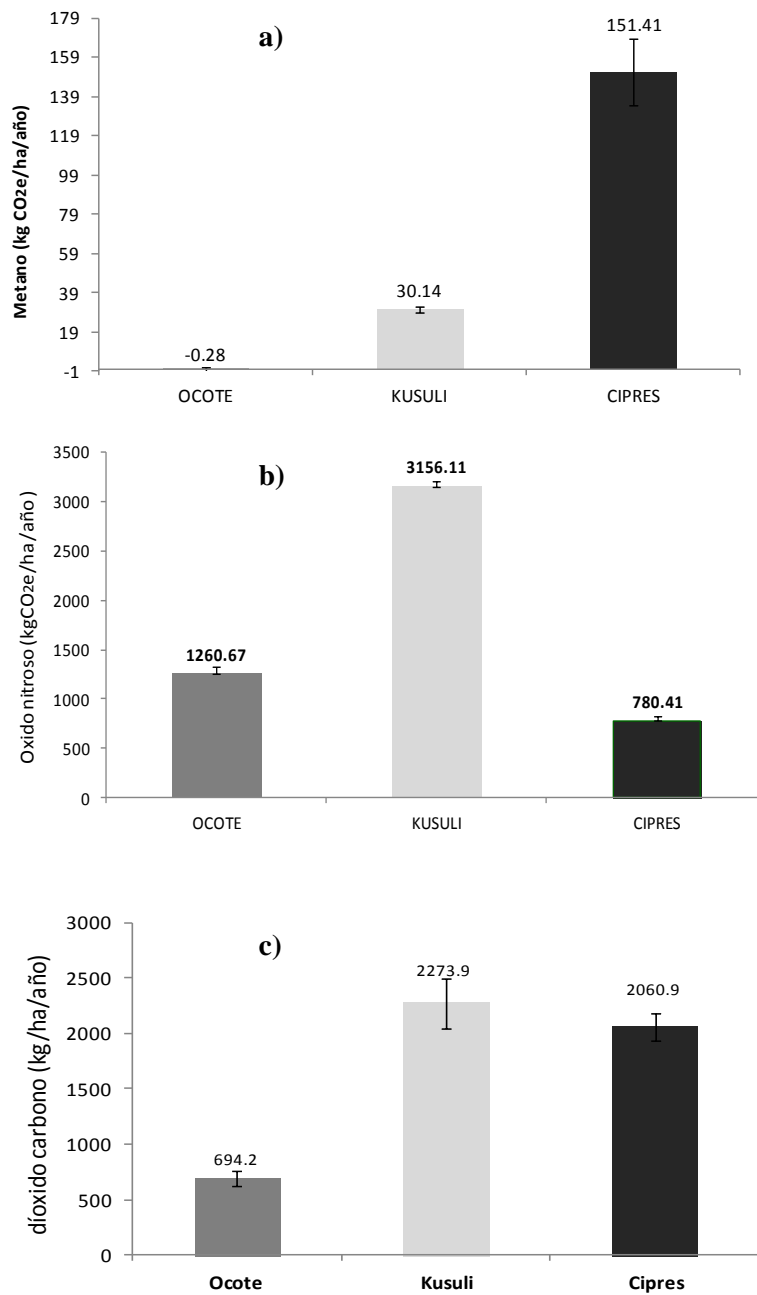


Figura 13. Emisiones acumuladas y desvío estándar promedio de los flujos anuales de GEI evaluadas en tres Parcelas permanentes de medición (PPM) en Waslala, Nicaragua. a) Emisiones CH₄; a) Emisiones de N₂O y c) Emisiones de CO₂.

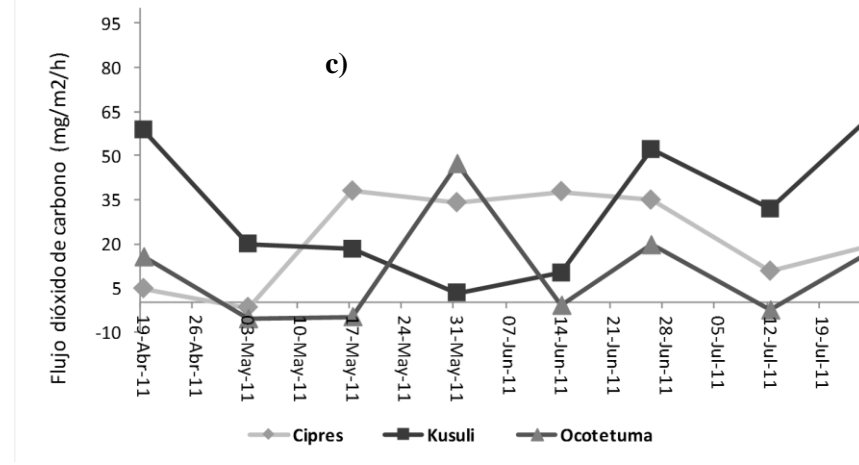
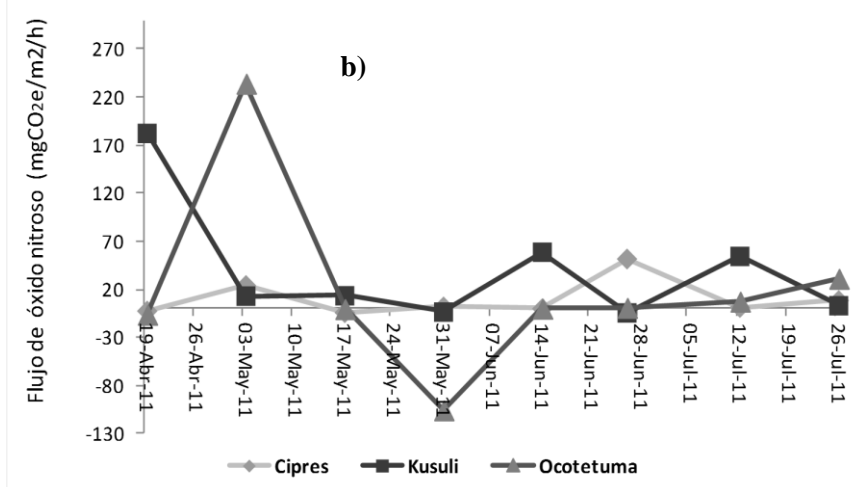
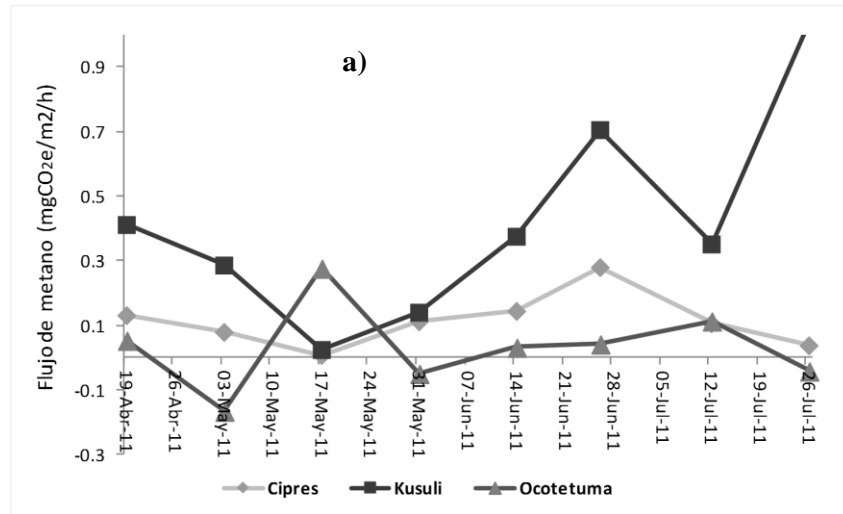


Figura 14. Flujos de GEI evaluados en tres Parcelas Permanentes de Medición (PPM) en Waslala, Nicaragua. a) Emisiones CH₄; b) Emisiones de N₂O y c) Emisiones de CO₂.

El uso de leña en el secado del cacao generó el 14% (0,67 kg CO₂e se emiten al secar 1 kg de cacao al 7% humedad) de las emisiones de la HC (Cuadro 5). La época lluviosa (agosto a diciembre) fue la temporada de mayor acopio de cacao (Anexo 3), donde el 48% del cacao (388 qq seco) fue secado a leña. En cada proceso de secado se constató que 78 rajadas de leña (3,2 kg cada una) pueden alcanzar a secar 10,3 quintales de cacao al 7% de humedad, asumiendo una humedad inicial promedio de 25% (Cuadro 7).

Cuadro 7. Emisiones de dióxido de carbono anuales emitidos en la quema de leña para el secado de cacao húmedo en el centro de acopio CACAONICA, Waslala, Nicaragua

Capacidad de la secadora (qq seco)	% Humedad ingreso de cacao	Tiempo secado de cacao (hr)	Nro rajadas utilizadas por secado	Cantidad cacao seco 7% H (qq)	*FE (kg CO ₂ e/kg leña)			Emisiones totales (kg CO ₂ e)	Emisión (kg CO ₂ e kg cacao seco)
					CH ₄	N ₂ O	CO ₂		
13	25%	13	78	10.3	0.006	0.000035	1.52	412.5	0.67

**FE: factores de emisión para abedul*

Se consideró que cada quintal de cacao pesa 60 kg en promedio

El compost generó la tercera parte de las emisiones de la HC (Cuadro 5; Anexo 4) siendo el 26% de los productores (54 socios) responsables de su elaboración (a base de insumos como: cascara de cacao, tallo de banano, tierra negra, estiércol y ceniza principalmente), mientras el 74% utilizó la biomasa del SAF (tronco, ramas, hojas de cacao y dosel) como único aporte de materia orgánica al suelo. La fermentación de cacao generó 1,3% de las emisiones de la HC (Cuadro 5, Anexo 5) y la contribución de CO₂ por la oxidación de azúcares en la baba del cacao fue la principal fuente de emisión. El empaque de cacao en sacos de yute y plástico generó el 2% de las emisiones de la HC, siendo los sacos de yute responsables del 61% de las emisiones (Anexo 6). El transporte de cacao desde las comunidades al centro de acopio CACAONICA generó 1% de las emisiones de la HC (Anexo 7) con variaciones en temporadas de mayor (agosto a enero) y menor acopio (febrero a julio) en el año (Anexo 8). En cambio, el transporte de cacao orgánico y de transición desde el centro de acopio CACAONICA hacia las bodegas de Ritter Sport en Sébaco generó 2% de las emisiones de la HC (Cuadro 5) que en volumen representa transportar el 96% (776 sacos) del cacao comercializado por la cooperativa CACAONICA (Anexo 3).

5.3.2 Simulación del balance de carbono

Los SAF de cacao pueden remover de la atmósfera $39,8 \pm 0,03$ kg CO₂ por cada kg de cacao seco producido en el año (Cuadro 8). La producción y comercialización de 1 kg de cacao generó una HC de $4,98 \pm 0,004$ kg CO₂e año⁻¹. La diferencia entre las remociones y emisiones en un modelo de simulación al 95% de confianza generó un balance positivo de carbono en promedio ($34,8 \pm 33,1$ kg CO₂e), con intervalos que van desde -30,0 hasta 99,6 kg CO₂e. Esto significa que los SAF pueden remover en promedio 8,0 veces más carbono que la HC y los límites de confianza pueden tomar valores desde negativos a positivos.

Cuadro 8. Construcción de medias, error estándar y límites de confianza para 10⁶ de simulaciones de balance de carbono para la cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua.

Variables	Media	Error	Límite	Límite
	kg CO ₂ e kg ⁻¹ cacao			
Remoción SAF-cacao	39.8	0.032	39.7	39.8
Emisión HC-cacao	4.98	0.004	4.97	4.99
Balance (remoción-emisión)	34.8	33.1	-30.0	99.6

5.4 DISCUSIONES

5.4.1 Huella de carbono

La HC de la cooperativa se encuentra dentro del rango medio reportado en el trópico seco de Costa Rica, donde la producción láctea tuvo una HC de 1,28 kg CO₂e por kg de leche y la producción bovina una HC de 13 kg CO₂e por kg de carne (GAMMA 2010). Sin embargo, la HC del cacao fue inferior al café (8,4 kg de CO₂e kg⁻¹ de café) producido por la empresa T-Chivo en Alemania (PCF 2008) y superior a la producción de café orgánico (0,1 CO₂e por kg de café oro) y café convencional (0,33 kg de CO₂e por kg de café oro) de la cooperativa Triunfo Verde en México (Aguilar 2012). La HC en la producción y distribución de fresas en España (0,9 kg CO₂e kg⁻¹ de fresa producida) y la producción de huevos orgánicos en Alemania (2,85 kg CO₂e kg⁻¹ de huevo; PCFP 2009) fueron bajas en comparación al estudio de Waslala.

La HC del cacao es una cadena corta de evaluación que mide tres primeras etapas del ciclo de vida del cacao (producción en la finca, transformación y comercialización del grano de cacao por la cooperativa). Sin embargo, existen cadenas largas que miden la vida completa del producto, comenzando desde su origen hasta su consumo final. Así por ejemplo, la HC en la producción láctea y bovina en Costa Rica, la producción de café en Alemania, la producción y distribución de fresas en España y la producción de huevos en Alemania. En cambio, mediciones de HC parciales como el cacao de Waslala o el café orgánico y tradicional de México deben completar su ciclo de vida en las siguientes etapas (la industria, manufactura, distribución) hasta llegar al consumidor final. Esto implica que la HC del producto irá en incremento. Por tanto, los estudios de HC cortas y largas no son comparables en su medición, debido a que los supuestos (condiciones) y los alcances de medición son diferentes en cada caso en particular (GAMMA 2010).

Las emisiones de mayor contribución a la HC del cacao se debieron al suelo y el uso de leña en el secado del cacao. Las emisiones del suelo ($1,1 \text{ Mg CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) fueron bajas en comparación a SAF de café con *Inga densiflora* ($10,2 \text{ Mg CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en el Valle Central de Costa Rica (Hergoualc'h et ál. 2008).

La entrada de C y N en forma de hojarasca, necromasa y raíces (descomposición y exudación) generan emisiones de CO_2 y N_2O en el suelo (Hergoualc'h 2008). El estudio de Waslala muestra que aportes de $2,1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de biomasa al suelo en raíces finas (20 cm de profundidad), necromasa fina y hojarasca (Cuadro 3) pueden generar una tasa de emisión de $1,2 \text{ Mg CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en el suelo, siendo el 50% atribuido al N_2O y 49% al CO_2 . Al respecto un SAF de café en Costa Rica reporta emisiones de 18% por N_2O ($1,8 \text{ Mg CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y 82% por CO_2 ($8,4 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) al acumular $20 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de necromasa y hojarasca seca en el suelo (Hergoualc'h 2008), emisiones altas en relación a los cacaotales en Waslala.

Las emisiones generadas en la HC del cacao pueden clasificarse en dos categorías: a) aquellas debido a procesos naturales como las emisiones del suelo y la fermentación de cacao que son inevitables y aquellas b) por actividades antropogénicas como el transporte de cacao, utilización de sacos de empaque, uso de leña en el secado de cacao que pueden ser controlados. Bajo esta clasificación, es posible calcular dos tipos de huella. La HC debida a

procesos naturales (3,92 kg CO₂e por kg de cacao) y la HC atribuible a procesos antropogénicos (1,06 kg CO₂e por cada kg de cacao comercializado) que suman la HC total.

Al aplicar metodologías de medición de HC como la norma PAS 2050 al estudio de Waslala, se reporta una huella inferior a la calculada, debido a que la norma no reconoce las emisiones del suelo en su contabilización (PAS 2050; 2011) que disminuye la HC en un 77%. En cambio, si se aplica la norma Greenhouse Gas (GHG Protocol) e ISO 14067 (International Organization for Standardization) la HC sería similar al reportado en Waslala. Por tanto, como no todas las normas consideran las mismas fuentes de emisión, es necesario tener una norma estándar como la ISO 14067 para el cálculo de la HC de los productos (Sevenster y Verhagen 2010).

5.4.2 Balance de carbono

El balance de carbono (34,8 kg CO₂e) entre las remociones (SAF) y emisiones (HC) fue positivo para la cooperativa CACAONICA, mostrando que los SAF pueden por un lado reducir todas las emisiones generadas en la producción y comercialización del cacao. Además de generar un superávit adicional de 83% en el secuestro de carbono (9,8 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹), útil para reducir las emisiones del próximo movimiento del cacao (transporte marítimo, industria, distribución consumo y reciclaje del producto) de la empresa Ritter Sport en Alemania.

Los intervalos de confianza tomaron valores negativos y positivos en el balance de carbono del cacao de la cooperativa CACAONICA. El balance negativo se presentó cuando a) las remociones por el SAF fueron bajas en relación a la HC y el balance positivo se presentó b) cuando los niveles de remoción por los SAF fueron altos en comparación a la HC. Esta estimación con intervalos de confianza es válida mediciones de HC en la agricultura, debido a que la medición de una variable de un evento a otro ofrece cambios (por ejemplo: emisiones del suelo durante época seca y lluviosa, fermentación de cacao). Por tanto, la presentación de la HC en los productos agrícolas debería ser bajo intervalos de confianza.

Si bien la huella de cacao es compensada con las actuales tasas de remoción de los SAF en Waslala, estos sistemas pueden incrementar aún más su nivel de carbono. El estudio comparativo (ver artículo carbono) muestran que el carbono removido por los cacaotales de Waslala es inferior ($3,3 \text{ Mg C ha}^{-1}$) a los cacaotales de Belice, Panamá, Costa Rica, Honduras, Guatemala (Somarriba et ál. en preparación). Esto implica que es necesario mejorar los SAF actuales y buscar estrategias para incrementar mayor carbono.

5.4.3 Estrategias para incrementar carbono en los actuales SAF cacao

Si planteamos la pregunta sobre ¿cuales estrategias son posibles de aplicar a los actuales SAF de Waslala para incrementar los niveles de carbono?, podemos pensar en alternativas que generen a los agricultores oportunidades de mejorar su nivel de ingresos. En ese marco, el componente arbóreo es una alternativa importante a la reducción de la HC del cacao.

Los SAF actuales con bajo nivel de sombra y carbono (menor número de árboles de clases diamétricas mayores a 30) ofrecen un potencial para incrementar la densidad de árboles de dosel. La elección de las especies de dosel estará en función a las recomendaciones del agricultor. Experiencias en Talamanca, Costa Rica (CATIE 2006) sugieren incorporar especies maderables nativas como: *Cordia alliodora*, *Dipteryx panamensis*, *Hyeronima alchorneoides*, *Cedrela odorata* y *Virola koschnyi*, e introducir de frutales como *Eugenia stipitata* y *Nephelium lappaceum* que proporcionan carbono y generan ingresos adicionales por venta de madera, frutas y leña.

La regeneración de especies maderables como: laurel (*Cordia alliodora*), Inga (*Inga sp*) y otros ofrecen oportunidades para incrementar mayor carbono en los actuales SAF, además de ofrecer habitats para la fauna y coadyuvar a generar ingresos (CATIE 2006). Los árboles de *Inga sp* por ejemplo son fuente importante de biomasa, estudios demuestran que después de 7 años la biomasa acumulada en los árboles y el suelo fue de $14,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$, que representa el 52% del carbono de la biomasa en un sistema café- Inga (Hergoualc'h 2008).

La madera de especies de crecimiento lento por lo general tienen mayor peso específico y mayor carbono (Nair et ál. 2010) y son consideradas maderas valiosas de alta gravedad específica que son utilizadas para la construcción, muebles y artesanías. Pero también existen especies maderables de baja gravedad específica y de corta duración que son destinadas para leña, fabricación de cajas de embalaje y otros usos. La mezcla de especies de crecimiento rápido con especies de crecimiento lento puede producir madera aprovechable en diferentes épocas (Montagnini y Nair 2004; Nair 2011) y generar en aquellas con alta gravedad específica oportunidades de almacenamiento de carbono por un largo tiempo.

La HC por lo general utiliza un sistema de medida que relaciona unidades de peso/peso; peso/volumen o peso/ por unidad de producto (PAS 2050; 2008). Por ejemplo, si la unidad definida fuera $\text{kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$ de cacao producido en una hectárea (caso cacaotales de Waslala), podríamos suponer que esta relación peso/peso de la HC define la eficiencia productiva del cacao en la hectárea. Es decir, si mejoramos la eficiencia en el uso de energía (mayor rendimiento de cacao por árbol) por unidad de área, es posible reducir HC actual. Así, por ejemplo si un árbol produce 2 kg año^{-1} de cacao seco (material mejorado) a una densidad de plantación de $625 \text{ plantas ha}^{-1}$ tendríamos una producción de 1250 kg de cacao seco. Si consideramos la emisión del suelo, la hectárea de cacao generaría 1156 kg de CO_2e (Cuadro 7). Esta relación de energía utilizada/producción generaría una HC de $0,96 \text{ kg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ cacao seco. En cambio si la productividad por unidad de hectárea baja a 300 kg cacao seco (caso actual de Waslala) la HC sería de $3,85 \text{ kg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ cacao seco. Esta comparación de HC hace suponer que el rendimiento promedio en Waslala podría incrementarse utilizando plantas más productivas en la misma superficie, efecto que reduciría la HC actual.

Futuros materiales de cacao en Waslala en jardines clónales, ensayos multilocales y arboles superiores en fincas podrían ser la alternativa a la reducción de la HC del cacao. Evaluaciones en jardines clonales y ensayos multilocales han constatado rendimientos de 700 a $1000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en cacaotales de 7 años de edad (PCC 2009). Otras evaluaciones en clones CATIE R-1; CATIE R-4 y CATIE R-6 han registrado rendimientos de 1678 a 2538 a los 9 años de establecido la plantación (PCC 2009). Estas experiencias indican que el mejoramiento del cacao podría reducir la HC del cacao de la cooperativa CACAONICA.

Las estrategias de reducción de la HC del cacao pasan también por tener métodos y procedimientos de estimación de carbono validos y comparables. El impacto del almacenamiento de carbono de cualquier SAF depende de la calidad de la información obtenida en campo (medición de árboles, toma de muestras y métodos de análisis de laboratorio) y la aplicación correcta de modelos alométricos. La utilización de modelos desarrollados para arboles de bosque natural aplicados por ejemplo a SAF con composición y estructura diferente pueden generar sobre estimaciones o sub estimaciones en las mediciones de carbono (Nair 2011). Por tanto, es importante estandarizar métodos, procedimientos de cálculo y generar modelos alométricos locales para estimar de mejor manera el almacenamiento de carbono.

Los estudios sobre tasas de acumulación anual de carbono en el suelo y la biomasa son generalmente calculados mediante una relación de carbono en un tiempo "t" y edad "e" del cacaotal (considerando la edad de implementación del cacao como referencia). Calculó que provoca tasas de acumulación altas de carbono en SAF de menor edad y bajas en SAF adultos. En el caso del carbono orgánico del suelo, por ejemplo, esta proviene de procesos anteriores a la implementación del SAF. Así como existen SAF que se implementan con árboles de dosel ya existentes (sistema cabruca), lo que puede provocar realizar sobre o subestimaciones de biomasa (Nair 2011). Por tanto, una estrategia a tomar en cuenta es generar una línea base a partir del cual por diferencia de existencias se determine el carbono acumulado en un periodo de tiempo.

5.5 CONCLUSIONES

- ✓ La HC de 4,98 kg CO₂e por kg de cacao es alta en comparación a otros productos agrícolas, debido a que la emisión del suelo y el secado a leña del cacao representaron el 91% de las emisiones en la HC del cacao.
- ✓ Las emisiones del suelo no son contabilizadas en todas normas de medición de la HC lo que genera resultados con marcadas diferencias.
- ✓ La estimación de la HC a través de intervalos de confianza son válidos para estudios agrícolas, debiendo incluirse en el etiquetado de HC esta medida de confianza.
- ✓ Los árboles de dosel y cacao cumplen un rol importante en la reducción de las emisiones de GEI generados en la producción y comercialización del cacao, confirmando la importancia del componente arbóreo en la reducción de la HC y la mitigación al cambio climático.
- ✓ Es posible incrementar el carbono secuestrado a nivel de cacaotales y finca en los actuales paisajes que caracterizan la región de Waslala, a partir de diseños agroforestales que permitan mantener una relación directa entre la productividad de cacao y el dosel.

5.6 RECOMENDACIONES

- ✓ Es necesario realizar otros estudios de medición de gases en el suelo para corroborar los resultados encontrados en Waslala.
- ✓ Se recomienda desarrollar un conjunto de factores de emisión estándar para evaluar diferentes contextos biofísicos considerando diferentes parámetros (gestión agrícola, condiciones climáticas, tipo de suelo, etc) para aplicarlos a estudios similares.

5.7 LITERATURA CITADA

- Aguilar, J. 2012. Impacto socioeconómico y ambiental de la certificación orgánica-comercio justo de café (*Coffea arabica*) en la Región Frailesca, Chiapas, México. Tesis Mag.Sc. Turrialba, CR, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 175 p.
- Chavarria, CS; Ríos, RJA; Laguna, LAO. 2010. Informe anual del control interno de CACONICA, para la producción y acopio del cacao orgánico. Waslala, NI. 50 p.
- CATIE (Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza). 2006. Proyecto fijación de carbono en sistemas agroforestales con cacao de fincas indígenas en Talamanca, Limón, CR. 134 p.
- Carbon Trust. 2011. International Carbon Flows. Londres. UK. 24 p.
- Di Rienzo, JA; Casanoves, F; Balzarini, MG; Gonzalez, L; Tablada, M; Robledo, CW. InfoStat versión 2009. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Escobedo, Adriana, A. 2010. Cadena Productiva de cacao de Nicaragua. Proyecto Cacao en Centroamérica. Turrialba, CR. 28 p.
- Ferreira Catrileo, OI. 2008. Flujo de gases de efecto invernadero, Potencial de calentamiento global y Evaluación de emergencia del sistema Agroforestal Quesungual en el Sur de Lempira, Honduras. Tesis M.Sc. Universidad Nacional de Colombia. Lempira, HO. 98 p.
- Guerra, L. 2007. Construcción de la huella de carbono y logro de carbono neutralidad para el Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza (CATIE). Costa Rica. CR. Tesis M.Sc. CATIE. 94 p.
- GAMMA (Programa de Ganadería y manejo del medio ambiente). 2010. Programa de fomento de la producción agropecuaria sostenible. Determinación del balance de los GEI en fincas Ganaderas de la región de Chorotega. Como elemento de referencia para mejorar la competitividad. Informe final. SP N° 14-2009. 250 p.

- Hellebrand, H. 1998. Emission of nitrous oxide and other trace gases during composting of grass and green waste. *Journal of Agricultural Engineering Research* 69:365-375 p.
- Haakonson, G; Kvingedal E. 2001. Utslipp til luft fra vedfyring i Norge. Utslippsfaktorer, ildstedsbestand og fyringsvaner. Statistisk sentralbyrå – Statistics Norway, 2001. 36p.
- Hergoualc'h, K; Skiba, U; Harmand, JM; Hénault, C. 2008. Fluxes of greenhouse gases from Andosols under coffee in monoculture or shaded by *Inga densiflora* in Costa Rica. *Biogeochemistry* 89(3):329-345 p.
- Hergoualc'h, K. 2008 Soil greenhouse gases emissions and carbon storage in coffee plantations on Andosols in tropical climate in Costa Rica. Thesis doctoral. Universidad Montpellier. FR. 229 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, SH. 104 p.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático). 2006. Guía de las buenas prácticas. Capítulo 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Hayama. JP. 51-574 p.
- INETER (Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales). 2003. Sistemas de información digital, (correo electrónico). Managua, NI. (e-mail: ineter.gov.ni).
- Lagunes, GS; Loiseau, G; Paredes JL; Barel, M; Guiraud JP. 2007. Study on the microflora and biochemistry of cocoa fermentation in the Dominican Republic. *International Journal of Food Microbiology*, 114 (1), 124-130 p.
- Montagnini, F; Nair, FKR. 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61: 281- 295 p.
- Nair, PKR; Nair, VD; Mohan Kumar, B; Showalter, JM. 2010. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Advances in Agronomy* 108:237- 307 p.
- Nair, PKR. 2011. Agroforestry Systems and Environmental Quality: Introduction. *Journal. Environmental. Qual.* 40:784–790 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.
- PAS 2050. 2011. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. British standards. Gran Bretaña.UK. 38 p.
- PCC (Proyecto Cacao Centroamérica). 2009. Foro Genética del Cacao en Panamá. ¿Qué estamos haciendo y hacia dónde vamos ?. Memoria del evento. Changuinola. PA. 50 p.

- PCF (Pilot Projekt Deutschland). 2008. Case Study Tchibo Private Kaffee Rarity Machare By Tchibo GMBH. Alemania, DE. 38 p.
- PCFP. 2009. Product Carbon Footprinting in geeigneter Weg zu klimaverträglichen Produkten und deren Konsum? Berlin, DE. (en línea). Consultado 28 oct 2011. Disponible en www.oeko.de/oekodoc/883/2009-007-de.pdf.
- PAS 2050. 2008. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. Briish standards. Gran Bretaña.UK. 43 p.
- Rondón, M. 2000. Land use and balances of greenhouse gases in Colombian Tropical Savannas. Thesis. Ph.D. Cornell University. USA. 211 p.
- Schneider, H; Samaniego, JL. 2010. La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios. Documento proyecto. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago, CH. 43 p.
- Sevenster, M; Verhagen, J. 2010. GHG emissions of green coffee production.Toward a standard methodology for carbon footprinting. Delft, CE Delft. 47 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.
- Time for change. Sitio web (en línea). Consultado: 25 julio 2. Disponible en [www.http://timeforchange.org/plastic-bags-and-plastic-bottles-CO2-emissions](http://timeforchange.org/plastic-bags-and-plastic-bottles-CO2-emissions).
- Weidema, BP; Thrane, M; Christensen, P; Schmidt, J; Løkke, S. 2008. Carbon Footprint. Journal of Industrial Ecology 12(1):3-6 p.
- Zhang, J; Smith, K; Ma, Y; Ye, S; Jiang, F; Qi, W; Liu, P; Khalil, M; Rasmussen, R; Thorneloe, S. 2000. Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors. Atmospheric Environment 34(26):4537-4549 p.

6 ANÁLISIS E IMPLICACIONES DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN AL DESARROLLO

La huella de carbono es un concepto nuevo de competitividad de productos y lucha contra el cambio climático. En esa perspectiva, la Unión Europea lidera acciones tendientes a implementar etiquetas ecológicas en los productos, destacándose Francia (Ley Grenelle I y II para etiquetado) y el Reino Unido (PAS 2050) en su aplicación. Por su parte, EE.UU plantea una ley denominada "Acta de Energía Limpia y Seguridad" para aplicar una imposición arancelaria a productos con alta huella de carbono. Estos avances hacen suponer que el etiquetado será un elemento de obligatoriedad en los productos, donde a consumidores ayudará en la toma de decisiones de compra y a empresas apoyará a mejorar los procesos productivos tendiendo hacia una reducción de emisiones de carbono.

Países exportadores de materia prima, como el cacao de Nicaragua aun no están siendo afectados por el etiquetado de huella de carbono, debido a que la norma es nueva y voluntaria en su aplicación. Sin embargo, es posible que la competencia de mercado se amplíe gradualmente y el universo de aplicación vaya hacia los productos intermedios y materias primas (caso del grano de cacao), donde la obligatoriedad de informar el contenido de huella de carbono sea una responsabilidad en los actores de la cadena (agricultores, compradores, organizaciones de envío, los procesadores chocolateros, distribuidores y consumidores).

El etiquetado de la huella de carbono en el mercado ha hecho que algunas empresas voluntariamente vayan asumiendo su comprensión y la capacidad de administrar riesgos de tener altas emisiones en sus productos. Logrando en algunos casos, mejorar los procesos productivos y en otros casos buscando alternativas de reducción de sus emisiones mediante la compra de bonos de carbono. Sin embargo, otras empresas buscan intervenciones directas de reducción a sus emisiones, mediante proyectos de plantación de árboles, reforestación o agroforestería válidos en la procura de llegar a un carbono neutralidad, que significa que las emisiones de carbono de un producto o servicio producido, usado y descartado no causen impacto negativo sobre el medio ambiente.

Los resultados de la huella de carbono del cacao en Waslala, Nicaragua muestran que los sistemas agroforestales son una alternativa importante de reducción a las emisiones generadas en la producción y comercialización del grano de cacao por la cooperativa CACAONICA, debido a que las tasas actuales de remoción anual de carbono de los sistemas agroforestales, superan las emisiones generadas en la huella de carbono del cacao. Esto significa, que aparte de llevar hacia carbono neutralidad al cacao, los sistemas agroforestales pueden ofrecer un superávit adicional de carbono, capaz de cubrir, parte de las emisiones generadas en el próximo movimiento del cacao como por ejemplo el transporte marítimo, la industria, el distribuidor mayorista y minorista en el extranjero.

Si bien, los resultados de huella no son una exigencia del actual comprador de cacao Ritter Sport (Alemania), el estudio del carbono secuestrado por los sistemas agroforestales ofrece oportunidades y acceso hacia otros mercados de venta de carbono como: mercados voluntarios, mercados de reconocimiento local o indexaciones por la reducción de emisiones en las cadenas de valor agregado del producto, que pueden generar incentivos económicos y mejores condiciones de vida para los productores de la región.

7 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LOS RESULTADOS PARA LA FORMACIÓN DE POLÍTICAS

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) reconoce la importancia que tiene la producción de alimentos en el contexto del cambio climático. En este sentido, se plantea una estabilización y/o reducción de las emisiones con acciones que no sean contrarias a la producción de alimentos, estableciendo como eje fundamental la promoción de tecnologías y prácticas amigables con el medio ambiente.

Por ello, resulta esencial incorporar en la agenda política gubernamental, metodologías de evaluación de huella de carbono en productos agrícolas e iniciativas de reducción que permitan fortalecer no solo la competitividad de los productos exportables, sino también la contribución a la lucha contra el cambio climático. Por este motivo, es necesario difundir los resultados de la investigación a los actores locales, regionales y gubernamentales del país para orientar el diseño de nuevas políticas que permitan desarrollar proyectos de evaluación, mitigación y reducción de emisiones del sector cacaotero y agropecuario en general.

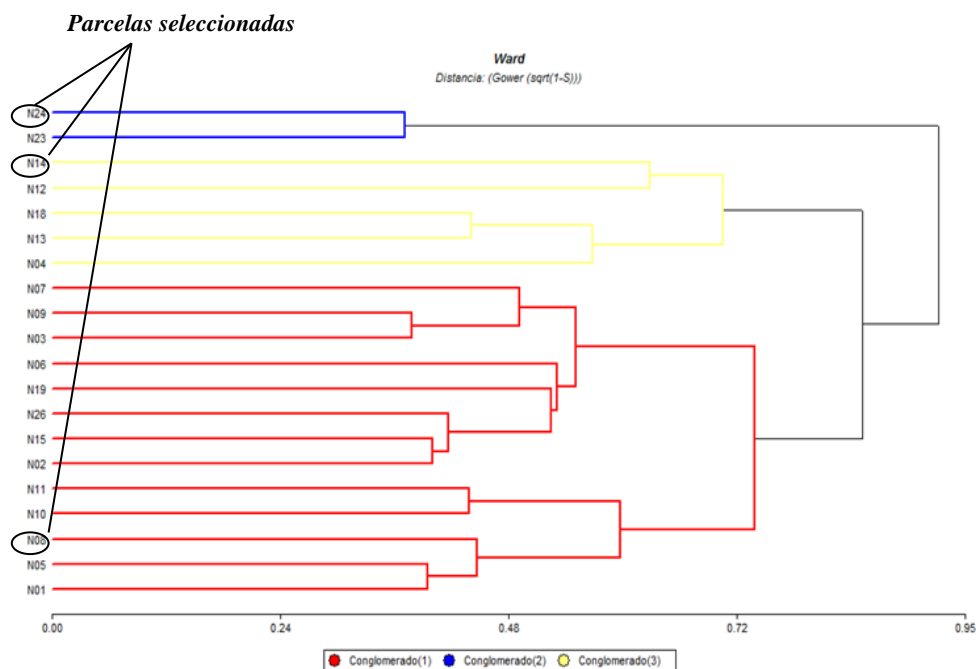
Los resultados de la remoción de carbono por los sistemas agroforestales, nos dan una aproximación del potencial de servicio ecosistémico que ofrece estas áreas, no solo en la captura de carbono, sino en ofrecer otros servicios como acoger la biodiversidad, proteger el suelo, proveer alimentos y otros. Por tanto, las políticas encaminadas por instituciones estatales (INTA, MAGFOR y el IDR) y no gubernamentales (LWR, SNV, GTZ, PAC, ADDAC y Pro Mundo Humano) deben estar orientadas en el trabajo en paisajes agrícolas y ganaderos de Waslala que permita mejorar los actuales servicios ecosistémicos y mejorar la economía rural de la población.

ANEXOS

Anexo 1. Índice de valor de importancia (IVI) de las 9 Parcelas Permanentes de Medición de la cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua

N. Científico	ABUNDANCIA		FRECUENCIA		DOMIMANCIA		IVI
	Abs.	%	Abs.	%	Abs.	%	
<i>Inga sp.</i>	40	32.8	7	14	15.2	26.7	73.5
<i>Bourreria huanita</i>	4	3.3	3	6	10.7	18.8	28.1
<i>Cordia alliadora</i>	5	4.1	5	10	2.3	4.1	18.2
<i>Bactris gasipaes</i>	10	8.2	2	4	2.6	4.6	16.8
<i>Mangifera indica</i>	7	5.7	3	6	2.6	4.5	16.2
<i>Erythrina poeppigiana</i>	6	4.9	3	6	1.4	2.4	13.4
<i>Cedrela odorata</i>	4	3.3	2	4	2.6	4.5	11.8
<i>Citrus sp.</i>	9	7.4	1	2	0.3	0.5	9.9
<i>Bursera simarouba</i>	1	0.8	1	2	3.7	6.5	9.3
<i>Tabebuia rosea</i>	5	4.1	1	2	1.6	2.9	9.0
<i>Rhizopora sp</i>	1	0.8	1	2	3.1	5.4	8.2
<i>Ceiba aesculifolia</i>	3	2.5	1	2	2.0	3.4	7.9
<i>Pera aoborea</i>	1	0.8	1	2	2.6	4.5	7.4
<i>Persea americana</i>	3	2.5	2	4	0.4	0.8	7.2
<i>Albizia andinocephala</i>	2	1.6	2	4	0.8	1.4	7.1
<i>Acosmium panamensis</i>	3	2.5	1	1.8	1.6	2.9	7.1
<i>Erithrina berteroa</i>	2	1.6	2	4	0.7	1.2	6.9
<i>Citrus sinensis</i>	3	2.5	1	2	0.4	0.7	5.2
<i>Pouteria sapota</i>	1	0.8	1	2	0.7	1.2	4.0
<i>Trichilia montana</i>	2	1.6	1	2	0.2	0.3	4.0
<i>Otras especies</i>	10	8.2	9	18	1.5	2.6	28.8
Total general	122	100	50	100	56.9	100	300

Anexo 2. Análisis de conglomerados para seleccionar tres Parcelas Permanentes de Medición en la evaluación de emisiones de gases en el suelo de los cacaotales de Waslala, Nicaragua.



Anexo 3. Acopio de cacao (Mg año-1) en el ciclo de producción 08/2010-08/2011 por la cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua.

Meses acopio	C-conv. (kg)	C-orgánico (kg)	C-Trad. (kg)	C- Transc. (kg)	Total cacao (kg)
Ene-11		3878.5	69.5	185.4	4133.4
Feb-11		748.6			748.6
Mar-11	30.0	1138.1			1168.2
Abr-11	238.9	2805.3		86.6	3130.8
May-11	1627.2			94.9	5708.1
Jun-11		892.0			892.0
Jul-11		290.3			290.3
Ago-10	11.7	1020.3		128.3	1160.3
Sep-10		1440.7		30.1	1470.8
Oct-10		5471.7		155.4	5627.1
Nov-10		11822.3		607.1	12429.4
Dic-10	25.2	11147.5		839.8	12012.5
Total	1933.1	44641.4	69.5	2127.4	48771.5

Anexo 4. Emisiones de oxido nitroso (en términos de CO₂e) en la elaboración y uso de compost a los cacaotales de la cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua

Compost elaborado (kg/ha)	*DE	FE(CO ₂ kg ⁻¹ compost)	Emisión por elaboración (kg CO ₂ e ha ⁻¹)	Emisión directa por uso	Emisión volatilización	Emisión (kg CO ₂ e kg ⁻¹ compost)	*DE	Rdto cacao (kg ha ⁻¹)	% Socios que aplican compost	Emisión (CO ₂ e/ kg ⁻¹ cacao)	*DE
381.0 ± 405.2		0.31	118.1	37.1	7.42	162.6 ± 173.0		300	0.26	0.14 ± ###	

**DE: desviación estándar

Anexo 5. Emisiones de dióxido de carbono emitidos en la fermentación del cacao en el centro de acopio CACAONICA en Waslala, Nicaragua

Tipo de emision	Contenido glucosa/ cacao seco (g/kg)	Contenido fructuosa/ cacao seco (g/kg)	Peso molecular Glucosa (gr/mol)	Peso molecular Fructuosa (gr/mol)	Peso molecular CO ₂ (gr/mol)	Emision Glucosa (kg CO ₂ e kg ⁻¹ cacao)	Emision fructuosa (kg CO ₂ e kg ⁻¹ cacao)	Emision total (kg CO ₂ kg ⁻¹ cacao seco)
Cacao seco fermentado	56.6	88.8	180	180	88	0.0277	0.0434	0.071

Anexo 6. Emisiones de dióxido de carbono por fabricación y uso de sacos de cacao utilizados por la cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua

Emisión por envases	Tipo de material	Cantidad de bolsas	FE (kg CO ₂ e/ kg plástico)	Peso promedio saco (kg)	Emisiones totales (kg CO ₂ e)	Peso promedio cacao por saco (kg)	Emisión (kg CO ₂ e kg ⁻¹ cacao)
Fabricación de sacos-plástico	plástico	33	6	0.25	50	60	0.03
Reciclado de sacos-plástico	plástico	33	3.5	0.25	29	60	0.01
Emisión de sacos-plástico							0.04
Fabricación de sacos-yute	yute	779	6	0.4	1870	60	0.04
Reciclado sacos-yute	yute	779	3.5	0.4	1091	60	0.02
Emisión de sacos-yute							0.06
Emisión total							0.10

*Para el cálculo de emisiones se utilizó como peso de yute 0,4 kg y de plástico 0,25 kg

Anexo 7. Emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) en el transporte de cacao desde las comunidades hacia el centro de acopio CACAONICA en Waslala, Nicaragua

Descripción	Cantidad utilizada (litro)	Nro. viajes	Nro. sacos transportados	kg cacao transportados	FE (kg CO ₂ litro ⁻¹)	Emisiones totales (kg CO ₂ e)	Emisión *DE kg CO ₂ e kg ⁻¹ cacao transp
Transporte bus	482	588	557	27870	2.83	1363.4	0.06 ± 0.03
Transporte Camión	285	286	334	16713	2.83	806.7	0.06 ± 0.03
Emisión promedio							0.06 ± 0.03

Los sacos transportados son de 60 kg promedio *DE: desviación estándar

Anexo 8. Curvas de acopio de cacao (Mg año⁻¹) en el ciclo de producción 08/2010-08/2011 por la cooperativa CACAONICA en Waslala, Nicaragua.

