



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE
INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

ESCUELA DE POSGRADO

**Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total y la
composición fisionómica de la vegetación en los sistemas
agroforestales con café y en bosques secundarios del Corredor
Biológico Volcánica Central-Talamanca, Costa Rica**

Por:

VICTOR ELEAZAR MENA MOSQUERA

*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, 2008

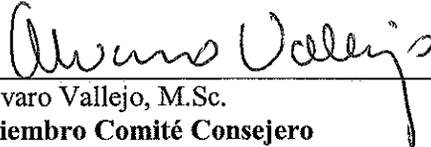
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

MAGISTER SCIENTIAE EN AGROFORESTERÍA TROPICAL

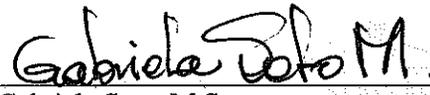
FIRMANTES:



Carlos Navarro, Ph.D.
Consejero Principal



Álvaro Vallejo, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

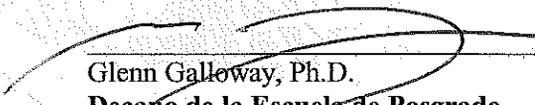


Gabriela Soto, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

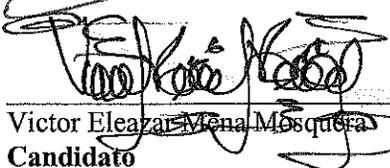


Diego Delgado, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

Hernán Andrade, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Glenn Galloway, Ph.D.
Decano de la Escuela de Posgrado



Victor Eleazar Viena Mosquera
Candidato

DEDICATORIA

Al ser supremo que es Dios, por su bondad de brindarme mucha salud en todo momento y por darme la confianza de hacer realidad este sueño.

A mi esposa Erica y mis hijos Víctor Leonardo y Alba Adriana quienes han sido la fuente de inspiración más importante especialmente para el logro de esta meta.

A mis padres Alba Eneida y Apolinar (Q.E.P.D), por darme la vida, apoyo y buenos consejos en mi vida y a quienes debo lo que soy.

A mis hermanos, Carlos Gregorio, Jhon Fredy, Apolinar Eduardo, Balmes Juanico y demás familiares y amigos por su cariño y continuo apoyo durante el transcurso de mi vida.

A mis amigos Mario Onny Arriaga, Eduardo A. García y Carlos A. Córdoba, por haber creído mis condiciones, capacidades y darme la oportunidad de alcanzar esta meta en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al programa de cooperación UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DEL CHOCO-WAGENINGEN-ALTIERRA-NUFFIC, Proyecto Gestión Ambiental Local y Cadenas Productivas (NUFFIC NPT/COL/073).

A mi consejero principal Ph.D Carlos Navarro, por su amistad, confianza, enseñanza, sabios consejos y correcciones desde que inició la tesis hasta la elaboración de este documento.

Al Ph.D Hernán Andrade, por su amistad, enseñanza, colaboración y por sus acertadas correcciones en este documento.

A los MS.c Álvaro Vallejo, Gabriela Soto y Diego Delgado miembros del comité consejero, por el tiempo que me brindaron durante todo lo que significó la elaboración de la Tesis, y por las correcciones y consejos en beneficio del presente documento.

A mi Universidad Tecnológica del Chocó (UTCH) y a mi organización Asociación de Egresados de la Universidad Tecnológica del Chocó (ASEUTCH), por su estimación, apoyo y comprensión en todo momento.

Al CATIE, Proyecto Forestería Análoga, por haber financiado parte del trabajo de campo.

A mi esposa Erica y mis hijos Víctor Leonardo y Alba Adriana quienes soportaron mis angustias, penas y me apoyaron en los momentos más difíciles.

A Gustavo López, Alfredo Ortega, Fernando Casanoves y Carlos Marschall por brindarme su valioso tiempo y apoyo en los análisis estadísticos y traducción del resumen.

A Nelson Zamora por la calidad profesional que le caracteriza y echarle muchas ganas a la identificación de las muestras botánicas.

A Christian y Hugo Brenes por el gran apoyo aportado en esta tesis.

A Willian Cordero, Carlos Castro, Limberto Elizondo, Manuel Sojo, Esteban Araya y Erica Rentaría por su amable colaboración durante el trabajo de campo.

A Francisco Aguilar, Guillermo Madrid, Luis Guillermo Ramírez y Carlos Cordero por su colaboración y apoyo permitiendo la realización de este estudio en predios de su propiedad y/o administración.

A todo el personal de la Escuela de posgrado, del laboratorio de suelos, de la biblioteca conmemorativa ORTON y demás funcionarios del CATIE, por su amable colaboración.

A todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron para la realización de este estudio. Muchas gracias. Dios les bendiga siempre.

BIOGRAFÍA

El autor nació en la ciudad de Quibdó departamento del Chocó (pacífico colombiano), el 15 de abril de 1973. Realizó estudios primarios y secundarios en la Escuela Normal Nacional de Varones (ENNV) y superiores en la Universidad Tecnológica del Chocó (UTCH) "Diego Luis Córdoba", en donde se graduó de Ingeniero Agroforestal.

El desempeño profesional lo hizo durante los 7 últimos años, habiéndose desempeñado los primeros dos años como investigador asociado en los proyectos Plan de Manejo Ambiental para la obra de reubicación de de la población de Bellavista cabecera municipal del municipio de Bojayá y Esquema de Ordenamiento Territorial para los municipios del Chocó, en el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP), en la ciudad de Quibdó. Los siguientes 5 años ha estado vinculado a la UICH como docente de tiempo completo, adscrito al programa de Ingeniería Agroforestal.

Finalmente en el año 2007, ingresa al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) para realizar estudios de posgrado en la maestría Agroforestería Tropical.

CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
BIOGRAFÍA.....	V
CONTENIDO	VI
RESUMEN	IX
ABSTRACT.....	XI
ÍNDICE DE CUADROS	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	XV
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos del estudio	3
<i>1.1.1 Objetivo general</i>	3
<i>1.1.2 Objetivos específicos</i>	3
1.2 Hipótesis del estudio	3
2. MARCO CONCEPTUAL	4
2.1 El efecto invernadero	4
2.2 EL dióxido de carbono.....	5
2.2.1 <i>Fuentes de CO₂</i>	6
2.2.2 <i>Sumideros de CO₂</i>	6
2.3 El papel de las coberturas forestales y agroforestales en la fijación y almacenamiento de carbono	8
2.3.1 <i>Los bosques como fijadores de carbono</i>	9
2.3.2 <i>Las plantaciones forestales como fijadoras de carbono</i>	9
2.3.3 <i>Importancia de los SAF en el almacenamiento de carbono</i>	10
2.4 Estimación de biomasa y carbono	12
2.4.1 <i>Métodos para estimar biomasa en la vegetación</i>	13
2.4.1.1 Método directo	13
2.4.1.2 Método Indirecto.....	14
2.5 Carbono y materia orgánica en el suelo.....	14
	VI

2.5.1	<i>El papel fundamental de la materia orgánica en los suelos</i>	15
2.5.2	<i>Almacenamiento de carbono en el suelo</i>	16
2.5.3	<i>Métodos para determinar carbono orgánico en el suelo (COS)</i>	17
2.5.4	<i>Estimación del almacenamiento de COS</i>	17
2.5.4.1	Densidad aparente	18
2.5.4.2	Profundidad.....	18
2.5.4.3	Pedregosidad o rocosidad	18
2.6	La fisionomía de la vegetación	19
2.6.1	<i>Fórmula fisionómica de la vegetación (FFV)</i>	21
2.7	Los sistemas de producción de café.....	21
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1	Descripción del área de estudio	24
3.2	Selección de los pisos altitudinales y los sistemas de uso de la tierra	25
3.3	Variables evaluadas en los SUT	28
3.4	Unidad experimental o parcela temporal de muestreo.....	29
3.5	Métodos de muestreo y descripción en PTM de los sistemas estudiados.....	29
3.5.1	<i>Muestreo de biomasa en PTM de los sistemas estudiados</i>	29
3.5.1.1	Vegetación herbácea, brinzales y latízales bajos (Db < 5cm).....	30
3.5.1.2	Fustales, latízales altos y palmas (DAP ≥ 5 cm).....	30
3.5.1.3	Hojarasca y madera caída	30
3.5.2	<i>Muestreo y determinación del carbono orgánico, densidad aparente y el porcentaje de pedregosidad del suelo en las PTM de los sistemas estudiados</i>	31
3.5.2.1	Carbono orgánico.....	31
3.5.2.2	Densidad aparente	31
3.5.2.3	Porcentaje de pedregosidad	31
3.5.3	<i>Descripción fisionómica de la vegetación</i>	32_Toc214254086
3.6	Métodos de estimación en PTM de los sistemas estudiados	34
3.6.1	<i>Estimación de biomasa</i>	34
3.6.1.1	Biomasa arriba del suelo	34
3.6.1.2	Biomasa abajo del suelo.....	35
3.6.1.3	Necromasa.....	36
3.6.2	<i>Estimación del carbono almacenado</i>	36

3.6.2.1	Carbono almacenado en la biomasa total (CABt).....	36
3.6.2.2	Carbono orgánico en el suelo.....	37
3.6.2.3	Carbono total almacenado.....	37
3.6.3	<i>Estimación de las variables fisionómicas y la composición fisionómica de la vegetación (CFV).....</i>	37
3.6.3.1	Porcentaje de cobertura.....	38
3.6.3.2	Número de estratos.....	38
3.6.3.3	Altura del dosel.....	38
3.6.3.4	Área basal.....	38
3.6.3.5	Consistencia de las hojas.....	39
3.6.3.6	Tamaño de las hojas.....	39
3.6.3.7	Composición fisionómica de la vegetación (CFV).....	39
3.7	Análisis de datos.....	39
3.7.1	<i>Carbono almacenado entre los pisos altitudinales y entre los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT.....</i>	40
3.7.2	<i>Composición fisionómica de la vegetación entre los pisos altitudinales y entre los SUT estudiados en el CBVCT.....</i>	40
3.7.3	<i>Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación de los SUT estudiados en el CBVCT.....</i>	41
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
4.1	Carbono almacenado entre los pisos altitudinales y entre los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT.....	43
4.1.1	<i>Carbono almacenado en la biomasa total.....</i>	43
4.1.2	<i>Carbono orgánico en el suelo.....</i>	44
4.1.3	<i>Carbono total almacenado.....</i>	45
4.2	Composición fisionómica de la vegetación entre los pisos altitudinales y entre los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT.....	48
4.3	Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación de los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT.....	50
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
6.	LITERATURA CITADA.....	58
7.	ANEXOS.....	64

Mena Mosquera, V.E (2008). Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación en los sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios del Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca, Costa Rica. Turrialba, CR. CATIE, Tesis Mag. Sc. 90 p.

RESUMEN

Diferentes autores señalan la importancia de realizar estudios que logren estimar el carbono fijado o almacenado en los diferentes sistemas de uso de la tierra, cuantificar económicamente su valor y otorgar un pago por el servicio ecosistémico brindado. Se determinó la relación entre el carbono almacenado en la biomasa total (CABt) y la composición fisionómica de la vegetación (CFV) en los sistemas agroforestales (SAF) laurel-café y poró-café y, en bosques secundarios, en tres pisos altitudinales del Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca (CBVCT), Costa Rica. Se establecieron 18 parcelas temporales de muestreo (PTM) en los tres sistemas de uso de la tierra (SUT), ubicados en los pisos altitudinales (PA) bajo 600, medio 800 y alto 1300 m de altitud (Jardín Botánico CATIE y los distritos Atirro y Aquiares, respectivamente). En primer lugar, se estimó la biomasa total y el carbono total almacenado en los SUT. Se utilizaron ecuaciones alométricas desarrolladas para bosques tropicales y las especies presentes en los SAF y una fracción de carbono promedio de 0,5. En segundo, lugar, se utilizó la fórmula fisionómica de la vegetación para describir y estimar la composición fisionómica en los SUT. En tercer lugar, se utilizaron los valores de las variables CABt y CFV para realizar análisis de regresión lineal y se probaron modelos con y sin variables transformadas. Con esta información, se generaron ecuaciones alométricas para estimar el carbono almacenado en la biomasa total en función de la CFV. El carbono almacenado en la biomasa total reportó en promedio (69,4 Mg C ha⁻¹). El PA inferior (600 m) y el SUT bosque secundario reportaron el mayor almacenamiento de carbono en la biomasa total (93,7 y 158,7 Mg C ha⁻¹, respectivamente). El carbono total almacenado en los bosques secundarios presentó en promedio 271,7 Mg C ha⁻¹ (69,2%) distribuidos en carbono en la biomasa aérea total, biomasa de las raíces, necromasa y carbono orgánico en el suelo (124,8; 24,3; 9,6 y 113,1 Mg C ha⁻¹, respectivamente). Asimismo, los SAF con café reportaron un carbono total almacenado promedio 121,1 Mg C ha⁻¹ (30,8%) distribuidos en carbono en la biomasa aérea total, biomasa de las raíces, necromasa y carbono orgánico en el suelo (18,2; 4,2; 2,2 y 96,5 Mg C ha⁻¹, respectivamente). La CFV fue en promedio de 42 % con una variabilidad entre 23 y 72 %. El PA inferior (600 m) y el SUT bosque secundario presentaron el mayor porcentaje de CFV (52

y 69 %, respectivamente). Se encontraron diferencias significativas en el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación entre los PA estudiados y entre los SUT. La disminución en la altitud tuvo un efecto positivo en el CABt y la CFV de los sistemas de uso de la tierra estudiados. Se presentó una relación significativa entre el CABt y la CFV de los SUT estudiados. Los modelos de mejor ajuste son de una entrada y de tipos Log-Log, Log-Raíz², Log-LN y LN-Raíz². Estos modelos pueden estimar el carbono almacenado en la biomasa total en función del CFV debido a que explican más del 94% de la variabilidad y tienen un alto poder explicativo de los datos ($R^2 = 0,96$). Además, tiene como ventajas que son el resultado de la utilización de una metodología de bajo costo, que las variables fisionómicas son fáciles obtener en el campo y su cálculo es simple. Se recomienda utilizar esta nueva técnica, para describir y estimar, cuantitativamente la CFV y estimar el CABt en sistemas de uso de la tierra y en especial para los ecosistemas forestales complejos.

Palabras claves: carbono, biomasa total, composición fisionómica de la vegetación, sistemas agroforestales con café, bosques secundarios, pisos altitudinales, sistemas de uso de la tierra, ecuaciones alométricas, Costa Rica.

Mena Mosquera, V.E (2008). Relation between the carbon stored in the biomass and the physiognomic composition of the vegetation in the agroforestry systems with coffee and in secondary forests of the Volcánica Central-Talamanca Biological Corridor (CBVCT) in Costa Rica. Turrialba, CR. CATIE, Tesis Mag. Sc. 90 p.

ABSTRACT

Different authors indicate the importance of making studies for estimating the carbon fixed or stored in different land use systems. These studies have been conducted to quantify an economic value and granting a payment for the ecosystem service provided. The relation between carbon stored in the total biomass (CStB) and the physiognomic composition of the vegetation (PCV) in the agroforestry systems (AS) coffee-laurel (*Cordia alliodora*), coffee-*Erithryna poeppigiana* (poró in Spanish) and in secondary forests was determined in three different altitudes of the Volcánica Central-Talamanca Biological Corridor (CBVCT-abbreviation in Spanish) in Costa Rica. Eighteen temporary sampling plots were established. They were located in three land use systems (LUS) in three different altitudinal floors (AF) being the lowest 600 m , the medium 800 m and the highest 1300 m (CATIE's Botanical Garden, Atirro town and Aquiares town , respectively). Firstly, an estimation of the total biomass and stored total carbon was made in the LUS. For this purpose, allometric equations were used, already developed for tropical forests, and the species in the AS including a carbon fraction average carbon of 0,5. Secondly, the physiognomic formula for the vegetation was used to describe and estimate the physiognomic composition of the vegetation in the LUS .Thirdly, the CStB and the PCV variable values were used to make several linear regression analyses. Numerous models were proved using transformed and non- transformed variables. With this information, numerous allometric equations were generated to estimate the carbon stored in the total biomass in relation to the PCV. The carbon stored in the total biomass presented (69,4 Mg C ha⁻¹) in average. The lowest AF (600 m) and the LUS (secondary forests) presented the greatest storage of carbon in the total biomass (93,7 y 158,7 Mg C ha⁻¹, respectively). The stored total carbon in the secondary forests presented 271,7 Mg C ha⁻¹ in average (69,2%) distributed in the total amount of carbon in the aerial biomass, root biomass, necromass and organic carbon in the soil (124,8; 24,3; 9,6 and 113,1 Mg C ha⁻¹, respectively). Likewise, the AS with coffee reported a total stored carbon average of 121,1 Mg C ha⁻¹ (30,8%) distributed in the total amount of carbon in the aerial biomass, root biomass , necromass and organic carbon in the soil (18,2; 4,2; 2,2 and 96,5 Mg C ha⁻¹, respectively). The

PCV was in 42% in average. The lowest AF (600 m) and the LUS (secondary forests) presented the highest percentage of PCV (52 and 69%, respectively). The decrease of the altitude had a positive effect in the CStB and the PCV of the studied land use systems. Significant differences in the carbon stored in the total biomass and the physiognomic composition of the vegetation between the AF and the studied LUS were found. A significant relation between the CStB and the PCV in the studied LUS was found. The best estimation models used were the ones of an entry belonging to the Log-Log, Log-Root², Log-NL and NL-Root² types. These models can estimate the carbon stored in the total biomass in relation to the PCV , because they explain more than 94% of the data variability and have an important explanatory value ($R^2 = 0,96$). Besides, these models have advantages resulting from the utilization a low-cost methodology. Moreover, the physiognomic variables are easy to obtain in the field and their calculation is simple. It would be recommendable to use this new technique to describe and estimate the PCV quantitatively, and also to estimate the CStB in land use systems, especially, in complex forest ecosystems.

Keywords: carbon, total biomass, physiognomic composition of the vegetation, coffee agroforestry systems with coffee, secondary forests, altitudinal floors, land use systems, Costa Rica.

LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS

(CATIE): Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

(CBTJ): Corredor Biológico Turrialba Jiménez

(CBVCT): Corredor Biológico Volcánica Central -Talamanca

(PA): Pisos Altitudinales

(SUT): Sistemas de Uso de la Tierra

(SAF): Sistemas Agroforestales

(BO): Bosque secundario

(LC): Laurel-Café

(PC): Poró-Café

(PTM): Parcelas temporales de muestreo

(CABt): Carbono Almacenado en la Biomasa total

(IFV): Composición o Índice Fisionómica de la Vegetación

(RIFA): Red Internacional de Forestería Análoga

(FURARE): Fundación Rainforest Rescue

(FFV): Formula Fisionómica de la Vegetación

(IPCC): Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático

(GEI): Gases de Efecto Invernadero

(CO₂): Dióxido de Carbono

(CO): Monóxido de carbono

(O₂): Oxígeno diatómico

(C): Carbono

(H₂O): Vapor de agua

(CH₄): Metano

(N₂O): Óxidos nitrosos

(CFC'S): Cloro-fluoro-carbonados

(NO_x): Óxidos de nitrógeno

(O₃): Ozono troposférico

(ppm): Partes por millón

(Pg): Peta gramos $1 \cdot 10^{15}$ g

(Gg): Giga gramos $1 \cdot 10^9$ g

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Aumento de la concentración atmosférica global de dióxido de carbono</i>	5
<i>Figura 2. Estructura y composición florística de los principales sistemas de producción con Café</i>	22
<i>Figura 3. Mapa de ubicación Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca</i>	24
<i>Figura 4. Mapa de ubicación de los pisos altitudinales y los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT</i>	26
<i>Figura 5. Parcelas temporales de muestreo para la descripción fisionómica y muestreo de biomasa y carbono orgánico en el suelo</i>	29
<i>Figura 6. Carbono almacenado en la biomasa total en los pisos altitudinales y los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT</i>	42
<i>Figura 7. Carbono orgánico en el suelo en los pisos altitudinales y los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT</i>	43
<i>Figura 8. Carbono total en los pisos altitudinales y los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT</i>	45
<i>Figura 9. Composición fisionómica de la vegetación en los pisos altitudinales y los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT</i>	49
<i>Figura 10. Carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómicos de la vegetación en los SAF con café y bosques secundarios estudiados en el CBVCT</i>	50
<i>Figura 11. Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total estimado con los modelos de mejor ajuste y la composición fisionómica de la vegetación de los SAF con Café y los bosques secundarios estudiados en el CBVCT</i>	48
<i>Figura 12. Comparación de los modelos de mejor ajuste en la estimación del carbono almacenado en la biomasa total en los SAF con Café y los bosques secundarios estudiados en el CBVCT</i>	52

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características de los pisos altitudinales y los SAF con café y bosques secundarios estudiados en el CBVCT	27
Cuadro 2. Variables evaluadas en los sistemas de uso de la tierra estudiados	28
Cuadro 3. Base de datos para la aplicación de la Fórmula Fisionómica de la Vegetación (FFV)	33
Cuadro 4. Ecuaciones alométricas empleadas para estimar biomasa aérea total en SAF y bosques del CBVCT, Costa Rica	34
Cuadro 5. Carbono total almacenado en los pisos altitudinales y los SAF con Café y Bosques secundarios estudiados en el CBVCT	46
Cuadro 6. Formulas fisionómicas de la vegetación de los SAF con Café y bosques secundarios estudiados en el CBVCT	47
Cuadro 7. Coeficiente de correlación de Pearson, carbono almacenado en la biomasa total, variables fisionómicas y distribuciones porcentuales de la composición fisionómica de vegetación de los SAF con Café y los bosques secundarios estudiados en el CBVCT	48
Cuadro 8. Coeficiente de correlación de Pearson, carbono almacenado en la biomasa total y las distribuciones porcentuales de la composición fisionómica de la vegetación de los SAF con Café y los bosques secundarios estudiados en el CBVCT	49
Cuadro 10. Modelos de mejor ajuste para estimar carbono almacenado en la biomasa total en los SAF con Café y bosques secundarios estudiados en el CBVCT	49

(Mg): Mega gramos $1 \cdot 10^6$ g
(ha): Hectárea
(dap): Diámetro a la Altura del pecho
(d_{15}): Diámetro a 15 cm del suelo en (cm)
(d_b): Diámetro base de la rama
(h): Altura
(ht): Altura total
(m): Metro
(cm): Centímetro
(cm^2): Centímetro cuadrado
(cm_3): Centímetro cubico
(g): Gramo
(kg): Kilogramos
(g/cm^3): Gramo/centímetro cubico
(mg/m^3): Miligramo/metro cubico
(t/m^3): Toneladas/metro cubico
(msnm): Metros sobre el nivel del mar
(°C): Grados Centígrados
(%): Porcentaje
(%P): Porcentaje de pedregosidad
(VP): Volumen de piedras
(S): Densidad de la madera o gravedad específica
(DA): Densidad Aparente
(COS): Carbono Orgánico del Suelo
(SAS): Statistical Analysis System
(Log_{10}): Logaritmo base 10
(LN): Logaritmo Natural
(Raíz): Raíz Cuadrada
(R^2 -ajust): Coeficiente de determinación ajustado
(RCME): Raíz del cuadrado medio del error
(PRESS): Suma de los cuadrados de los residuos

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los modelos climáticos indican que las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI), como metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y, en especial, las de dióxido de carbono (CO_2) han comenzado a generar importantes variaciones en el clima mundial, en el ciclo hidrológico (IPCC 2007). El uso de combustibles fósiles genera en la actualidad del 80 al 85% del CO_2 emitido, el cual incrementó su concentración de 280 a 360 ppm entre 1750 y 2000 (IPCC 2007). Estos gases atrapan una porción creciente de radiación infrarroja terrestre y se espera que harán aumentar la temperatura planetaria entre 1,4 y 5,8 °C durante el presente siglo (IPCC 2001a). Como respuesta a esto, los patrones de precipitación global están cambiando y el nivel del mar aumenta entre 10 y 80 cm (IPCC 2007).

Una forma de mitigar los efectos del CO_2 , además de reducir las emisiones, es almacenarlo, durante el mayor tiempo posible en la biomasa y en el suelo. Lo primero se puede lograr mediante la fotosíntesis y lo segundo mediante la acumulación de la materia orgánica (López et ál. 1999). El mantenimiento de reservas de carbono mediante los bosques y sistemas agroforestales (SAF), se ha convertido en un servicio ambiental reconocido a escala global, que puede tener un valor económico considerable para países en vía de desarrollo (Ramírez et ál. 1999).

Los bosques son el principal sumidero terrestre de CO_2 . Sin embargo, los SAF pueden remover cantidades significativas de carbono de la atmósfera, ya que las especies arbóreas en estos sistemas pueden retener carbono por un tiempo prolongado, principalmente en su madera y en muchos casos contribuyen a aumentar el carbono almacenado en el suelo. Algunos autores consideran que los SAF podrían acumular entre 1,1 y 2,2 Pg C en los próximos 50 años en todo el mundo (Albrecht y Kandji 2003). Una hectárea bajo uso agroforestal puede almacenar un promedio de 95 Mg C, además de suministrar bienes y servicios que pueden potencialmente evitar que se deforesten de 5 a 20 $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ (López et ál. 1999).

Son varios los métodos existentes para la estimación de flujos de carbono, muchos de ellos desarrollados para hacerlo a nivel global. Estas estimaciones se apoyan en el acopio de grandes bases de datos provenientes de imágenes de satélite, y torres de intercambio gaseoso procesados con modelos matemáticos complejos. Este tipo de estimaciones requieren

comprobaciones de campo que muchas veces no son confiables o no existen para ciertas regiones, especialmente en los trópicos (Canadell et ál. 2000; Schimel et ál. 2001). Igualmente, las estimaciones globales no permiten una buena aproximación para las estimaciones regionales o locales. Hay un vacío en las estimaciones de sumideros y flujos de carbono en las regiones tropicales; allí además, la diversidad de los ecosistemas hace difícil la cuantificación puntual a partir de las estimaciones globales.

Brown (1997), propone varios métodos para la estimación del carbono en ecosistemas forestales: 1) estimación de la biomasa con base en los inventarios de volumen existente. 2) estimación con base en inventarios forestales comerciales y aplicación de ecuaciones de biomasa. 3) desarrollo de ecuaciones de biomasa e inventarios *in situ*. 4) estimación con modelación utilizando sistemas de información geográfica. La mejor aproximación a la estimación de la biomasa en una comunidad forestal se obtiene, desarrollando ecuaciones de biomasa con datos locales obtenidos de parcelas permanentes (MacDicken 1997).

Los estudios de cálculo de biomasa de los ecosistemas forestales y agroforestales son esenciales para obtener un aproximado del carbono almacenado, ya que existe una estrecha relación entre la biomasa y el carbono de 2:1 (Ciesla 1996). Diferentes autores (Brown 1994; Dixon 1995; Alvarado et ál. 1999; Budowski 1999; Fischer y Trujillo 1999; Segura 1999), señalan la importancia de realizar estudios que logren cuantificar el carbono fijado o almacenado en los diferentes sistemas de uso de la tierra, estimar económicamente su valor y otorgar un pago por el servicio ambiental (PSA) brindado.

El presente estudio aporta información sobre la contribución y potencial de los SAF con café y los bosques secundarios en el almacenamiento de carbono en la biomasa total y su relación con la composición fisionómica de la vegetación. Dicha información servirá como una opción más de estimar carbono, la ampliación del PSA por estos usos de la tierra y que sean considerados como un manejo estratégico en la política de “carbono neutral”.

1.1 Objetivos del estudio

1.1.1 Objetivo general

Relacionar el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación en los sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios, de tres pisos altitudinales del Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca en Costa Rica.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estimar el carbono almacenado en la biomasa arriba y abajo del suelo y el carbono orgánico en el suelo de los SAF con café y los bosques secundarios.
- Describir y cuantificar la composición fisionómica de la vegetación en los sistemas de uso de la tierra estudiados.
- Establecer el impacto de los pisos altitudinales y los sistemas de uso de la tierra en el carbono almacenado en la biomasa total, el carbono orgánico del suelo, el carbono total almacenado y la composición fisionómica de la vegetación.
- Estimar la relación existente entre el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación de los sistemas de uso de la tierra estudiados.

1.2 Hipótesis del estudio

- Existen diferencias significativas en el carbono almacenado en la biomasa total, el carbono orgánico en el suelo y el carbono total almacenado entre los pisos altitudinales y entre los sistemas de uso de la tierra estudiados.
- La composición fisionómica de la vegetación entre los pisos altitudinales y entre los sistemas de uso de la tierra estudiados es diferente.
- El carbono almacenado en la biomasa total de los sistemas de uso de la tierra estudiados, se relaciona significativamente con la composición fisionómica de los mismos.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 El efecto invernadero

Este es un fenómeno natural que ha permitido el desarrollo de la vida en el planeta, producido por ciertos gases que están presentes en la atmósfera, y que son los responsables de mantener el planeta a una temperatura apta para la vida. Los principales gases son el vapor de agua y el gas carbónico, el cual es el más importante debido a que es afectado por las actividades antropogénicas (Ramírez 1997). Los gases de invernadero bloquean la radiación terrestre infrarroja, impidiendo que escape directamente de la tierra hacia el espacio. La radiación infrarroja absorbida por la atmósfera es emitida de nuevo en parte hacia la tierra y en parte hacia el espacio, por lo tanto, mucha de la energía que la tierra emite es reflejada por la atmósfera y es devuelta hacia la tierra. La temperatura media de la tierra es de 15,5°C debido al efecto invernadero, si este proceso no se llevara a cabo, la temperatura media global sería de -18°C, por lo que no existirían las condiciones aptas para la vida.

Los principales gases, en su mayoría producto de la actividad humana, que contribuyen a la amplificación del efecto invernadero son el dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), el vapor de agua (H₂O), el metano (CH₄), los óxidos nitrosos (N₂O), los cloro-fluoro-carbonados (CFC'S), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el ozono troposférico (O₃) (Andrasko 1990; Centeno 1992; MARENA 1995; PNUD 1997). Altas concentraciones de estos gases en la atmósfera absorben más calor, aumentando así la temperatura de la superficie. Las consecuencias pueden llegar lejos: cambio en la precipitación, en el número de días libres de heladas, en la frecuencia y severidad de las tormentas, en el comportamiento y distribución de plantas y animales y en los procesos de formación del suelo. Existe además la posibilidad de que el nivel de los océanos se incremente al derretirse los casquetes polares (Ciesla 1995). Los efectos del cambio climático podrían tener serias complicaciones en el futuro para la agricultura, la forestería y la pesca como resultado de alterar los ciclos biogeoquímicos y de la constante pérdida de la biodiversidad (Vitousek 1994). Ramírez (1997) asegura que de no darse un cambio para el año 2100, se tendrá un incremento de la temperatura del orden de 4,5°C, el cual haría que la mayor parte de las especies vivas no pudieran adaptarse al cambio climático.

2.2 EL dióxido de carbono

El dióxido de carbono (CO_2) es el gas antropogénico de efecto invernadero más importante. La concentración atmosférica global de CO_2 ha aumentado de un valor preindustrial de 280 ppm a 379 ppm (Figura 1). La concentración atmosférica de dióxido de carbono en 2005 excede por lejos la gama natural sobre los últimos 650.000 años (180 a 300 ppm) determinado como de centros de hielo. La tasa de crecimiento anual de la concentración de CO_2 fue más grande durante los últimos 10 años (1995-2005 medio: 1,9 ppm por año), que lo presentado desde el principio de medidas atmosféricas, directas y continuas (1960 – 2005 medio: 1,4 ppm por año) (IPCC 2007).

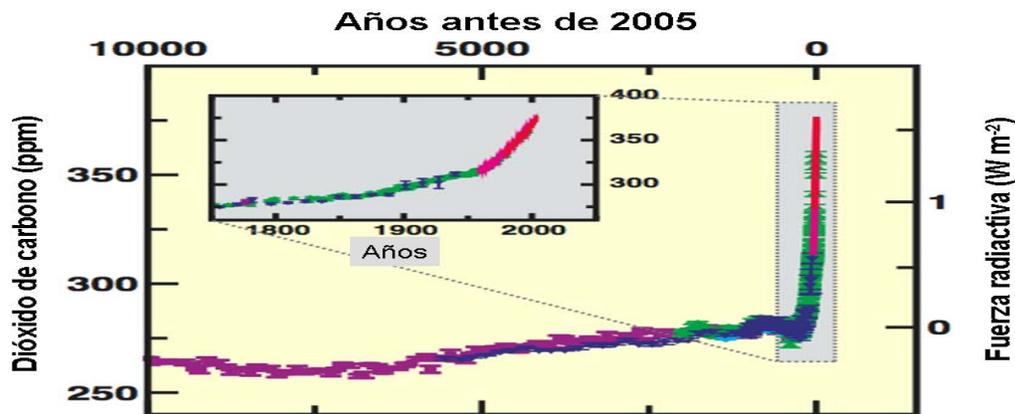


Figura 1. Aumento de la concentración atmosférica global de CO_2 (IPCC 2007)

Las moléculas de CO_2 , a diferencia de otros componentes del aire puro, poseen la propiedad de absorber la radiación infrarroja (calor) del sol, por cuanto más CO_2 haya en la atmósfera más calor puede ésta absorber (Nekrásov 1981). Cantidades enormes de CO_2 entran cada año a la atmósfera como consecuencia del uso generalizado de combustibles fósiles (carbón, petróleo o gas natural). Debido al constante intercambio de CO_2 entre la atmósfera y el océano (el cual puede absorber una gran parte de CO_2), solamente parte del CO_2 antropogénico permanece en la atmósfera. Sin embargo, no hay duda alguna de que la concentración de CO_2 en la atmósfera ha estado aumentando de año en año, por ejemplo, las emisiones de este gas crecieron a una tasa de 4,3% anual desde 1860 a 1970 y una de 2,8 entre 1970 y 1979 (Fernández 1991).

2.2.1 Fuentes de CO₂

Antes del comienzo de la revolución industrial (hacia 1750, cuando el escocés James Watt perfeccionó las máquinas de vapor) la concentración de CO₂ en la atmósfera era de unas 280 ppm (0,028%) y ahora alcanza casi las 380 ppm (0,038%). Aunque la mayor parte de este incremento es atribuible a la quema de combustibles fósiles para generar electricidad, de la industria y del transporte, se calcula que nada menos que un 35 % del aumento en los últimos 300 años ha sido debido a los cambios de usos del suelo impuestos por la agricultura (Foley 2005).

Entre 1850 y 1998 se han emitido a la atmósfera, como consecuencia del quemado de combustibles de origen fósil y de la producción de cementos, aproximadamente 270 (+30) Gg C en forma de CO₂. Como consecuencia del cambio de uso de la tierra predominantemente de los ecosistemas forestales, se han emitido unas 136 (+55) Gg C, lo cual a llevada a un aumento del contenido de CO₂ en la atmósfera de 176 (+10) Gg C (IPCC 2005).

2.2.2 Sumideros de CO₂

En la actualidad, el carbono en la atmósfera aumenta en promedio unos 3 Pg C al año. Sin embargo, las emisiones antrópicas de carbono superan los 6 Pg C. Por lo tanto, ni siquiera la mitad del carbono emitido es retenido en la atmósfera (Raitso 2005). Existen todavía muchas dudas sobre la localización de los sumideros actuales y en qué proporción se produce el reparto entre los océanos y la vegetación de esa emisión de carbono que no se queda en la atmósfera (Battle 2000). Probablemente los océanos acumulan unas tres veces más CO₂ que los continentes.

Sabine (2004) encontró que 244 Pg C emitidos por la quema de combustibles fósiles y la fabricación de cemento entre 1800 y 1994, 118 Pg C fueron absorbidos por los océanos y 106 Pg C fueron añadidos a la atmósfera en forma de CO₂. En los continentes, hubo una emisión neta de unos 24 Pg C, que resulta de restar lo absorbido por el sumidero de la biomasa terrestre a lo emitido por los cambios de uso del suelo. Sin embargo, en el período 1980-1999, los análisis mostraron que de los 117 Pg C emitidos por los combustibles fósiles y el cemento, 65 Pg C fueron añadidos a la atmósfera, 37 Pg C fueron absorbidos por los océanos, y 15 Pg C fueron absorbidos por la superficie continental.

El porcentaje del carbono emitido que se queda en la atmósfera esta disminuyendo. Por ejemplo, en la década de los 70, el porcentaje de CO₂ antrópico que se quedaba en la atmósfera era el 70% del emitido, pero en la década de los 90 fue inferior al 50%. Una incógnita muy importante para calcular el incremento futuro del CO₂ atmosférico es saber si este porcentaje continuará disminuyendo y a qué ritmo (Schimel 2001).

La diferencia creciente entre las emisiones antrópicas y el incremento atmosférico es debida al aumento de la cantidad de CO₂ absorbido por los océanos, la vegetación y los suelos (Joos 1999 y 2003). Los cálculos se basan en los cambios registrados en la concentración atmosférica y oceánica de O₂, y en los gradientes latitudinales observados en las mediciones, tanto de CO₂ como de O₂ (Keeling 1996).

Una prueba del incremento de la biomasa terrestre se fundamenta en la curva de evolución del CO₂ atmosférico. En los últimos 30 años la amplitud del ciclo anual de la concentración de CO₂ atmosférico ha aumentado, aunque de forma irregular. Esto es probablemente una consecuencia de una mayor actividad vegetativa, que implica una mayor absorción terrestre en primavera-verano (por incremento de la fotosíntesis global) y una mayor liberación de CO₂ en otoño-invierno por incremento de la materia orgánica oxidada (Kaufmann 2004).

Respecto a los ecosistemas terrestres, se sabe que los del hemisferio norte absorben más CO₂ atmosférico neto que los del hemisferio sur. El aire troposférico en el hemisferio norte contiene solamente unas 3 ppm de CO₂ más que el aire del hemisferio sur, pero la mayor parte del CO₂ es emitido en ese hemisferio, lo que debería ocasionar una diferencia superior, de unas 4 o 5 ppm. El importante sumidero de la vegetación continental existente en el hemisferio norte podría explicar la anomalía. En este sentido, algunos cálculos indican que en el territorio de los Estados Unidos y de Canadá el CO₂ absorbido por el suelo y la vegetación es superior incluso a las emisiones antrópicas de este gas en esos países (Schimel 2001). Otros cálculos más conservadores indican que la masa de CO₂ absorbida por el territorio estadounidense es la tercera parte de la emitida: 0,5 Pg de carbono absorbido frente a 1,5 Pg de carbono emitido. Los cálculos para Europa indican que la biomasa absorbe entre el 7 y el 12 % de las emisiones (Janssens 2003).

2.3 El papel de las coberturas forestales y agroforestales en la fijación y almacenamiento de carbono

La actividad forestal orientada a la conservación consiste en la aplicación de las mejores prácticas verificables para el manejo de los recursos forestales, incluyendo zonas boscosas y árboles. Se espera que estos sistemas sean ecológicamente racionales y aceptables, económicamente viables y socialmente responsables; que conduzcan al potencial de estos recursos para producir múltiples beneficios en el presente y en el futuro (Duncan et ál. 1999).

Investigaciones recientes sugieren que la calidad del manejo forestal puede hacer una contribución fuerte a controlar los niveles de CO₂ en la atmósfera; otras actividades de uso de la tierra que pueden contribuir a este fin son la conservación de bosques en peligro de deforestación, rehabilitación de bosques, forestación-reforestación, la agricultura y la agroforestería (Duncan et ál. 1999; Fischer et ál. 1999).

La alternativa más viable de ampliación de sumideros de GEI es la forestación de nuevas áreas de tierras con características favorables para ello. Las variables a considerar para elevar al máximo la fijación de carbono incluyen las especies de árboles a plantar, las tasas de crecimiento y la longevidad de las mismas, las características de los sitios a forestar, los periodos de rotación y la duración y uso de los productos forestales a extraer. La forestación y reforestación son las actividades forestales mencionadas explícitamente en el protocolo de Kyoto para mejorar y ampliar los sumideros de GEI (Beaumont 1999).

La forestería ha recibido especial importancia en los últimos años debido a su contribución a la reducción del efecto invernadero mediante las siguientes posibilidades (Andrasko 1990):

1. Reducir la emisión de GEI (disminuyendo la quema y tala de bosques)
2. Mantener los actuales depósitos de GEI, conservando el bosque natural incluyendo los bosques localizados dentro de las áreas protegidas (bosques de propiedad pública) y en zonas de amortiguamiento (bosques en terrenos de propiedad privada).
3. Ampliar los depósitos de GEI por medio de la creación de nuevas áreas forestales, la regeneración natural en tierras abandonadas (bosques secundarios) y el establecimiento y manejo de plantaciones forestales y sistemas agroforestales (Alfaro 1997; Finegan 1997).

2.3.1 Los bosques como fijadores de carbono

Todo bosque almacena carbono en su biomasa, contribuyendo en forma pasiva al control del calentamiento global, mientras que la tala de árboles contribuye a la emisión de CO₂, aumentando su contenido en la atmósfera. Únicamente los bosques que tienen un crecimiento neto, son capaces de una absorción neta de CO₂ (Begon et ál.. 1996; Finegan y Delgado 1997), y por lo tanto, de contribuir a la reducción de CO₂ atmosférico.

La biomasa acumulada por el crecimiento de los árboles en los bosques disminuye gradualmente conforme aumenta la edad del bosque (Kyrkund 1990; Finegan 1997) y por lo tanto su potencial de captura de carbono también disminuye. Sin embargo, esto no quiere decir que los bosques no fijen carbono en algunos periodos de crecimiento. Esta variabilidad que muestran los bosques naturales con respecto a las características de captura y almacenamiento de carbono, sirve de base para diseñar alternativas de manejo en bosques naturales y otros ecosistemas forestales para aumentar su contribución al almacenamiento y disminuyan la emisión de CO₂.

Los estudios de estimaciones de biomasa de los ecosistemas forestales son esenciales para obtener un aproximado de carbono almacenado, ya que existe una estrecha relación entre la biomasa y el carbono de 2:1 (Ciesla 1996). El nivel de acumulación de carbono varía entre los diferentes ecosistemas. Por ejemplo en un proyecto en Talamanca Costa Rica, se estimó que la tasa promedio de acumulación de carbono en la vegetación de áreas de regeneración natural (bosques secundarios jóvenes), entre 1 y 10, fue de 6,3 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ (Segura 2005).

2.3.2 Las plantaciones forestales como fijadoras de carbono

Se tiene la idea de establecer grandes cantidades de bosques nuevos con el fin de tener impacto sobre la mitigación de los GEI en la atmósfera. Se ha sugerido que los países tropicales poseen clima, suelos y condiciones favorables para el establecimiento de plantaciones forestales, brindando una oportunidad para fijar y almacenar grandes cantidades de carbono, debido al potencial de incremento de biomasa y la extensión territorial disponible para la reforestación. Además, el desarrollo planificado de plantaciones es un uso legítimo de la tierra que puede ayudar a los países productores de madera tropical a manejar sus recursos

forestales de forma sostenible reduciendo la presión sobre los bosques naturales (Asamadu 1999).

Las plantaciones forestales como sumideros de carbono deben considerar la selección de especies de rápido crecimiento, preferiblemente nativas, que en cortos periodos fijen grandes cantidades de carbono en su biomasa (Brown 1997; Asamadu 1998). La importancia de las plantaciones forestales de rápido crecimiento para almacenar carbono (más que en los bosques primarios y secundarios maduros) se basa en la mayor tasa de fijación. Por ejemplo, se estima que una plantación arbórea sana absorbe alrededor de 10 Mg C ha⁻¹año⁻¹ de la atmósfera dependiendo de las condiciones del lugar (Asamadu 1999). Además de una tasa de producción de biomasa alta, otra característica importante a tomar en cuenta es el tiempo de permanencia de la plantación hasta su cosecha (Finegan y Delgado 1997; Beaumont 1999).

Las plantaciones de madera para aserrío contribuyen en mayor medida a la mitigación de GEI que aquellas destinadas para pulpa de papel o para la producción de leña. Sin embargo, las especies para pulpa son generalmente de crecimiento más rápido y logran fijar más CO₂ en poco tiempo (Alfaro 1997).

La manera más eficaz de aprovechar los bosques y plantaciones para fijar CO₂ es fomentar la producción industrial de artículos de madera obtenida sosteniblemente de bosques naturales debidamente ordenados y sobre todo de las plantaciones forestales, aumentando el uso de madera originaria de plantaciones de rápido crecimiento, para su utilización en construcción de muebles, casa encofrados, juguetes y tornería; así el carbono fijado queda almacenado en las estructuras por largo tiempo (Kyrkund 1990; Alfaro 1997; Stella 1999).

2.3.3 Importancia de los SAF en el almacenamiento de carbono

Los SAF pueden, en diversos grados, mantener y hasta aumentar las reservas de carbono en la vegetación y los suelos. De hecho, la agroforestería incentiva prácticas sostenibles que utiliza insumos orgánicos de la finca que mejoran la calidad de los suelos y contribuyen a un mejor desarrollo de la planta, aumento de materia orgánica y el ciclaje de nutrientes, lo cual contribuye a almacenar bancos de carbono que son estables por décadas o siglos (Kurstén y Burschel 1993).

En sistemas agroforestales, el componente más importante de la biomasa arriba del suelo es la biomasa de los árboles. ANACAFE (1998) encontró que en promedio el carbono almacenado en el sistema cafetalero fue 93 Mg C ha^{-1} , distribuidos en 61, 23, 6, 3, C ha^{-1} para el carbono orgánico del suelo (0-30 cm), biomasa arriba del suelo, hojarasca y biomasa abajo del suelo, respectivamente. Se concluyó al comparar con los resultados de carbono en tierras degradadas y cultivos anuales, que el carbono adicional fijado por el sistema cafetalero respecto a estos usos del suelo se encuentra en los árboles que conforman la sombra del sistema agroforestal café árboles. Fournier (1996) presenta valores de fijación de carbono en bosque pluvial, bosque estacional y cafetales sin sombra, los cuales son 263, 205 y 77 Mg C ha^{-1} , respectivamente.

El carbono almacenado directamente por los árboles dentro de los diferentes SAF oscila normalmente de 3 a 25 Mg C ha^{-1} ; en el caso de huertos caseros y taungya se logra superar los 50 Mg C ha^{-1} (Kursten y Burschel 1993). El potencial para el almacenamiento de carbono en SAF, incluyendo el carbono del suelo, oscila entre 12 y 228 Mg C ha^{-1} (Dixon 1995), siendo el potencial para el almacenamiento de carbono mayor en el trópico húmedo.

El almacenamiento de CO_2 depende de la especie arbórea y densidad de siembra, la materia orgánica presente en el suelo, edad de los componentes, tipo de suelos, características del sitio, factores climáticos y del manejo silvicultural al que se vea sometido (Cubero y Rojas 1999; Segura 1999).

Pandey (2002) sugiere que un sistema agroforestal crea una interacción sinérgica entre los cultivos y los árboles para sostener la productividad, mientras que al mismo tiempo el carbono es secuestrado. Los sistemas agroforestales tienen dos beneficios principales para conservar carbono (Dixon 1995; Pandey 2002):

1. Almacenaje directo de C a corto y mediano plazo (décadas y hasta siglos) en los árboles y en el suelo.
2. Reducción indirecta de la emisión de los gases de efecto invernadero causada por la deforestación y la agricultura migratoria.

En los sistemas agroforestales, el secuestro de carbono es un proceso dinámico y se puede dividir en fases: cuando se establecen muchos sistemas probablemente son fuentes de

gases de efecto invernadero (pérdida de carbono y nitrógeno de la vegetación y del suelo). Luego sigue una fase rápida de acumulación y período de maduración cuando el carbono es almacenado en los troncos, raíces y en el suelo y al final del periodo de rotación, cuando los árboles son cosechados y en la tierra se vuelve a cultivar (sistemas secuenciales), parte del carbono será lanzado de nuevo a la atmósfera. Por lo tanto, un secuestro efectivo de carbono solo puede ser considerado si hay un balance positivo después de varias décadas al compararlas con una reserva de carbono inicial (Albrecht y Kandji 2003).

La implementación de proyectos agroforestales puede ser justificada por múltiples razones:

1. Incrementan el carbono en el suelo aumentando además la sostenibilidad y la productividad de los mismos.
2. Costo financiero de secuestrar carbono mediante proyectos agroforestales es mucho menor que otras formas de mitigación.
3. Aspectos de seguridad alimentaria

Las reservas de carbono en varias partes del mundo enseñan que significantes cantidades pueden ser removidas de la atmósfera en los próximos 50 años si los sistemas agroforestales son implementados a escala global (Albrecht y Kandji 2003).

2.4 Estimación de biomasa y carbono

Brown (1997), propone varios métodos para la estimación del carbono en ecosistemas forestales: 1) Estimación de la biomasa con base en los inventarios de volumen existente. 2) Estimación con base en inventarios forestales comerciales y aplicación de ecuaciones de biomasa. 3) Desarrollo de ecuaciones de biomasa e inventarios *in situ*. 4) Estimación con modelación utilizando sistemas de información geográfica. La mejor aproximación a la estimación de la biomasa en una comunidad forestal se obtiene, desarrollando ecuaciones de biomasa con datos locales obtenidos de parcelas permanentes (MacDicken 1997).

La estimación del carbono almacenado y la capacidad de fijación de los ecosistemas forestales necesitan información sobre la edad, volumen de madera existente en el ecosistema,

la densidad específica de las especies que lo conforman y la cantidad de biomasa por hectárea (Segura 1997).

El procedimiento general para estimar la biomasa consiste en cortar algunos individuos representativos, pesarlos, tomar las muestras de componentes diferentes aéreos de los árboles, y secar submuestras de estos componentes. La biomasa del árbol entonces es calculada aplicando la pérdida de la humedad de las muestras a los pesos verdes de los componentes. El número de muestras tomadas de un árbol puede variar de acuerdo al criterio del investigador. Nelson et ál. (1999), secó una sola muestra del tronco a la altura del pecho, mientras Kraenzel et ál. (2003) secó una muestra separada para cada metro de la longitud del tronco. Además, el tiempo es aquel en el que se lleve la muestra a peso constante y usar una temperatura no muy alta que queme los tejidos. Nelson et ál. (1999) secó las muestras a 105°C hasta que el peso constante fuera alcanzado mientras Kraenzel et ál. (2003) secó la madera por 1 semana a 70°C. Otros investigadores (Líkens y Bormann 1970) han secado las muestras a 80°C.

La mayoría de los investigadores estiman el contenido de carbono con una constante del 50% de la biomasa (Brown 1986; Montagnini y Porras 1998). Sin embargo, otros autores han utilizado una fracción de carbono de 45% (Whittaker y Líkens 1973). Generalmente, el carbono es medido directamente quemando las muestras en un analizador del carbono (Kraenzel et ál. 2003).

2.4.1 Métodos para estimar biomasa en la vegetación

En cada sistema se identifican las partes en donde se concentra el carbono y se estima midiendo el carbono contenido en cada uno de los reservorios presentes en el área considerada (Kurstén y Burschel 1993). A continuación se describen algunos métodos para estimar el contenido de biomasa aérea.

2.4.1.1 Método directo

Este método destructivo consiste en medir las dimensiones básicas de un árbol, cortarlo y determinar la biomasa a través del peso directo de cada uno de los componentes (raíces, fuste, ramas y follaje) (Segura 1999). A su vez la biomasa de raíces y ramas se puede subdividir en categorías diamétricas extrapolando los resultados a grandes áreas. Al final se

suman los volúmenes para obtener el volumen total estimado del fuste o de las ramas gruesas. Se toman muestras de madera de estos componentes del árbol y se pesan en el campo, luego se calcula en el laboratorio los factores de conversión de volumen a peso seco, es decir la densidad básica (g/cm^3) (Segura 1999).

2.4.1.2 Método Indirecto

Brown et ál. (1999), explica que en caso de contar con el diámetro a la altura del pecho (dap, cm), la altura total (h, m), y la densidad de la madera o la gravedad específica (GE, Mg/m^3), se puede calcular el carbono almacenado en la biomasa total de cada árbol. Estos métodos se basan en ecuaciones alométricas, las cuales son utilizadas para la estimación de biomasa generalmente para grupos de especies y bosques enteros (bosques tropicales y templados), su elección dependerá de los datos que estén disponibles al momento de realizar la estimación.

A partir de mediciones directas o indirectas, es posible calcular, mediante técnicas de regresión entre las variables colectadas en el campo y los inventarios forestales (dap, h comercial y total, crecimiento diamétrico, etc.) la biomasa o el contenido de carbono (Segura 1999). Estos modelos son denominados modelos alométricos, los cuales son una relación matemática para estimar una variable (volumen o biomasa) con base en una o más variables independientes (dap, h).

2.5 Carbono y materia orgánica en el suelo

El carbono en el suelo se encuentra en forma orgánica e inorgánica; la forma orgánica representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera y se estima a nivel global en cerca de 1.500 Pg de C a un metro de profundidad y cerca de 2.456 Pg a dos metros de profundidad. El carbono inorgánico representa cerca de 1.700 Pg (Robert 2002). La vegetación (650 Pg) y la atmósfera (750 Pg) almacenan considerablemente menos cantidades de carbono que los suelos. Esta es la razón por la cual los cambios en estos depósitos, pueden tener un impacto en el equilibrio global (Kanninen 2001).

El carbono orgánico presente en los suelos naturales representa un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición

(mineralización). En condiciones aeróbicas del suelo, gran parte del carbono que ingresa al mismo es lábil y solo una pequeña fracción del que ingresa (1% equivalente a 55 Pg año⁻¹) se acumula en la fracción húmica estable (0,4 Pg año⁻¹) (Robert 2002). Los diferentes reservorios de carbono que existen en el suelo tienen distintos tiempos de residencia dependiendo de su composición bioquímica. Por ejemplo, la lignina es más estable que la celulosa y su tiempo de residencia va de décadas o a más de 1.000 años (fracción estable). También hay alguna conexión con su composición, pero principalmente con el tipo de protección o el tipo de uniones químicas (Puget et ál. 1995; Balesdent et ál. 2000).

FAO (2000) indica que los modelos conceptuales y de simulación separan la materia orgánica del suelo en fracciones que son fácilmente descompuestas y resistentes, que se caracterizan por bajas tasas de recambio. Parton et ál. (1987) dividen a la materia orgánica del suelo en tres fracciones: 1) fracción activa, que consta de microorganismos vivos y productos microbianos, corresponde a 4% del carbono orgánico total (Theng et ál. 1989), y el tiempo de recambio está entre 2 a 4 años; 2) fracción lenta, que es más resistente a descomposición (tiempo de recambio 20-50 años) como resultado de la protección física y química. 3) fracción pasiva, que es físicamente protegida o químicamente resistente y tiene un tiempo de recambio más prolongado (800 a 1200 años); estas dos últimas fracciones representan aproximadamente el 96 % del carbono orgánico total (Theng et ál. 1989).

2.5.1 El papel fundamental de la materia orgánica en los suelos

La materia orgánica del suelo es un indicador clave de la calidad del suelo, tanto en sus funciones agrícolas (p. ej. producción y economía) como en sus funciones ambientales, tal como la captura de carbono y calidad del aire. La materia orgánica del suelo es el principal determinante de su actividad biológica, ya que la cantidad, la diversidad y la actividad de la fauna del suelo y están directamente relacionadas con ella. La materia orgánica y la actividad biológica que ésta genera tienen gran influencia sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos (Robert 1996). La agregación y la estabilidad de la estructura del suelo aumentan con el contenido de materia orgánica. Estas a su vez, incrementan la tasa de infiltración y la capacidad de agua disponible en el suelo así como la resistencia contra la erosión hídrica y eólica. La materia orgánica del suelo también mejora la dinámica y la biodisponibilidad de los principales nutrientes de las plantas.

2.5.2 Almacenamiento de carbono en el suelo

Durante el último siglo, aproximadamente 150 Pg C han sido liberados a la atmósfera como consecuencia de los cambios en el uso de la tierra. Esto equivale, en proporciones actuales, a aproximadamente 30 años de emisiones de combustible fósil (Kanninen 2001).

Oades (1988) indica que varios factores favorecen la retención del carbono en el suelo y permiten mayores tasas de recambio y tiempos de residencia. Estos incluyen, distribución por debajo de la superficie del suelo, asimilados con bajo contenido de nutrientes, materiales ricos en lignina y ceras, inundación, bajas temperaturas, texturas arcillosas, alta saturación de bases, agregación y superficies de cargas variables. Los factores que aceleran el flujo hacia el suelo de asimilados de carbono en las plantas son: hojarasca con concentraciones altas de asimilados, asimilados ricos en nutrientes, carbohidratos, aireación, altas temperaturas, textura arenosa, acidez y superficies con poca carga. La magnitud con la cual el suelo puede ser un sumidero de carbono depende del balance entre las tasas de los procesos de adquisición y la tasa de rotura del carbono resistente como del carbono adquirido (FAO 2000).

Un buen sistema agropecuario es el que secuestra más carbono del que emite (Nepstad et ál. 1991). Las pasturas con base en gramíneas mejoradas secuestran más carbono en partes profundas del perfil del suelo, generalmente debajo de la capa arable (10-15 cm). Esta característica hace que este carbono este menos expuesto a los procesos de oxidación y por tanto su pérdida como gas de efecto de invernadero (Fischer et ál. 1994).

En pasturas bien manejadas donde antes fueron bosques, los sistemas radicales de los pastos pueden redistribuir el carbono en las capas más profundas del suelo (Nepstad et ál. 1991), donde se almacena en formas más estables y es menos susceptible a oxidación (Batjes y Sombroek 1997). Muestreos repetidos en sitios cultivados que habían sido convertidos a pasturas mostraron incrementos en carbono orgánico de suelo durante varias décadas. Las altas tasas de producción de raíces de los pastos y su alta velocidad de senescencia y descomposición pueden explicar la alta capacidad de acumulación de carbono de las pasturas (Cerri et ál. 1991; Brown et ál. 1992).

Estudios realizados demuestran que el cambio de uso de la tierra de las áreas de pastura hacia sistemas silvopastoriles contribuye a mejorar la calidad de los suelos, la productividad

de las fincas y a beneficiar el medio ambiente. Andrade (2007) demuestra la importancia que tiene el suelo y los árboles bajo sistemas silvopastoriles en el secuestro de carbono. El carbono orgánico del suelo (COS) en sistemas silvopastoriles de *Pithecellobium saman*, *Diphysa robinoides* o *Dalbergia retusa* con *Brachiaria brizantha* o *Hyparrhenia rufa* promedió 100 Mg C ha⁻¹ en los primeros 60 cm de suelo. *B. brizantha* pareció estimular la producción de raíces de los árboles, lo cual estuvo altamente correlacionado con la fracción liviana del carbono orgánico del suelo, resultando en incrementos de hasta 9,9 Mg C ha⁻¹ año⁻¹.

2.5.3 Métodos para determinar carbono orgánico en el suelo

Se han desarrollado un gran número de métodos de separación para identificar los distintos constituyentes de la materia orgánica del suelo, grupos cinéticos, por ejemplo grupos que pueden ser definidos por una cierta tasa de recambio del carbono etc. El sistema tradicional de separación en fracciones fúlvicas y húmicas no separa las fracciones con diferentes tasas de recambio como se considera en los modelos (Balesdent 1996).

Los métodos de separación física, tal como el fraccionamiento según el tamaño de las partículas, la densidad de las fracciones o las fracciones por tamaño de los agregados permiten la separación de fracciones cinéticas significativas (Jenkinson et ál. 1987; Parton et ál. 1987; Balesdent 1996). La fracción de tamaños que van desde 53 a 2000µm, da una estimación precisa de la fracción lenta, mientras que fracciones menores que 53µm, dan una estimación exacta de la fracción pasiva (Cambardella y Elliot 1992). La biomasa microbiana representa 1-5% del total de la materia orgánica del suelo y es una fuente de reserva de nutrientes (N, P). Esta es una fracción muy lábil que responde rápidamente a los cambios de manejo del suelo (Tiessen et ál. 1984; Robert 2002).

2.5.4 Estimación del almacenamiento de carbono orgánico en el suelo (COS)

La concentración de carbono en el suelo correlaciona con la densidad aparente (DA), la cual varía con la profundidad del suelo, manejo y otras propiedades físicas. Para calcular la materia orgánica del suelo y almacenaje de carbono, se considera el carbono como el producto de la concentración de COS, DA y el espesor del suelo. De este modo, las comparaciones de carbono en el suelo son basadas en los mismos espesores o volúmenes (por ejemplo, 60 Mg C

ha⁻¹ a 30 cm), por lo tanto, se sugiere expresar el carbono almacenado en términos de una masa equivalente de suelo por unidad de área (Ellert et ál. 1999; FAO 2006).

2.5.4.1 *Densidad aparente*

La densidad es un término que expresa la masa por unidad de volumen de una sustancia. Cuando se aplica a suelos, se denomina densidad aparente porque incluye el espacio poroso. Como regla general, la densidad aparente tiene un valor máximo en suelos de textura gruesa porque tienden a la menor porosidad, aún cuando el tamaño de sus poros es grande. Inversamente, el espacio poroso total de un suelo con textura fina tiende a ser mayor y por tanto, su densidad aparente es baja (Cavazos et ál. 1992).

2.5.4.2 *Profundidad*

La profundidad del perfil es importante, ya que define el volumen de suelo a estimar, además existe un patrón de acumulación de carbono que varía en cada horizonte. Así, tenemos que el perfil “A” superficial es rico en materia orgánica en descomposición y por tanto se espera que sea rico en (COS). Sin embargo, dependiendo del uso anterior o de la cobertura vegetal es posible encontrar casos en los que el perfil “B”, cuyo carbono está menos disponible y se acumula, presente mayor contenido de carbono (Ellert et ál. 1999).

2.5.4.3 *Pedregosidad o rocosidad*

La pedregosidad o rocosidad es el contenido de piedras o rocas que interfieren en las labores de labranza, crecimiento de raíces y el movimiento de agua. Se define como el contenido de grava cuyo tamaño varía de 0.2 a 20 mm, las piedras que tienen más de 2 cm de diámetro y rocosidad como la proporción relativa de exposición de la roca fija, ya sea por afloramiento en suelos muy delgados o por conglomerados (Mata 2003). La pedregosidad o rocosidad presenta las siguientes categorías:

1. *Sin pedregosidad*: no hay piedras o rocas o son tan pocas que no interfieren en la preparación del suelo. Las rocas cubren menos de 1 m²/ha, o sea inferior de 0,01% del área. Es esta categoría se acepta hasta 5% del volumen del suelo con grava.

2. *Ligeramente pedregoso*: el contenido de piedras interfiere con la preparación de terrenos pero sin impedir esta labor.
3. *Moderadamente pedregoso*: el contenido de piedras es suficiente para dificultar la preparación del terreno, por lo que esta labor debe desarrollarse cuidadosamente. El área ocupada por las piedras varía de 10 a 300 m²/ha o sea 0.1-3% del área. Se acepta de 10 a 15% del volumen del suelo con grava.
4. *Pedregoso*: el contenido de piedras sólo permite la utilización de maquinaria liviana o herramientas de mano para preparar el terreno. El área ocupada por las piedras varía de 300 a 800 m²/ha, o sea 3-8% del área. Se acepta de 15 a 25% del volumen del suelo con grava.
5. *Muy pedregoso*: el contenido de piedras es suficiente para impedir cualquier uso de maquinaria agrícola en la preparación de terrenos por lo que sólo se pueden usar implementos manuales.
6. *Fuertemente pedregoso*: la superficie se encuentra cubierta de piedras, las cuales ocupan entre 20 y 50% de la superficie. Sólo se podrán usar implementos manuales ocasionalmente. Se acepta de 50 a 75% del volumen del suelo con grava.
7. *Extremadamente pedregoso*: la superficie se encuentra prácticamente cubierta de piedras con más de 50% de la misma cubierta por éstas. Se acepta más de 75% del volumen del suelo con grava.

2.6 La fisionomía de la vegetación

La fisionomía es un aspecto que presenta a la apreciación visual una comunidad o una especie vegetal cualquiera y depende del conjunto de estructuras espaciales y formas características de sus constituyentes biológicos. La fisionomía se refiere, en un sentido amplio, tanto a la estructura, (altura y espaciamiento), a las formas de crecimiento (morfología gruesa y forma o aspecto del crecimiento) de las especies predominantes y a los caracteres foliares (estacionalidad, forma, fenología, duración, talla y textura) de las plantas dominantes o componentes. Estos rasgos proporcionan una forma rápida y eficiente de caracterizar la vegetación (Fosberg 1961, Beard 1973).

La unidad básica de cualquier clasificación fisonómica es la formación: “Un tipo de comunidad definida por la dominancia de una forma de crecimiento del estrato superior o

dominante de la comunidad, o por una distribución de formas de crecimiento dominantes.” (Whittaker 1962).

Un ejemplo de un sistema de clasificación fisionómico a nivel mundial es el diseñado por la UNESCO (Mueller-Dombois y Ellenberg 1969 y 1974). Es un sistema jerárquico de fisionomía y estructura; algunos factores geográficos y ambientales fueron usados para caracterizar los tipos de vegetación. Otros conceptos útiles para una clasificación y una nomenclatura de las comunidades vegetales son las formas de vida o de crecimiento.

Las plantas superiores desarrollan tres grandes tipos de formas de vida o de crecimiento

1. Los árboles: plantas perennes, leñosas, generalmente de más de cuatro m de alto, con un tronco bien definido a partir del cual comienzan a ramificarse. Cuando son dominantes forman los bosques.
2. Los arbustos o matas: plantas perennes, leñosas, generalmente de más de 0.5 m de altura y ramificadas desde la base. Cuando son dominantes forman los matorrales.
3. Las hierbas: plantas de consistencia herbácea, es decir, sin tejido secundario o leño; de altura variable, anual, bianual o perenne. Cuando son dominantes forman los herbazales (incluyendo los pastizales).

La fisionomía de la vegetación está determinada por la estructuración de las especies y por la influencia del ambiente. El análisis fisionómico utiliza el Método de la Línea (Canfield 1941), modificado por Tirado (1997), El cual consiste en la realización de censos de vegetación ubicando la proyección del dosel sobre transectos lineales perpendiculares al suelo.

Las medidas de cobertura se hacen con base a las proyecciones verticales de las especies que son interceptadas por la línea, el porcentaje de cobertura por tanto es la relación de la longitud ocupada por la muestra con relación a la longitud de la línea. Los estratos y la longitud de la línea pueden ser tomados arbitrariamente pero la longitud de la línea depende básicamente de la visibilidad y de la variación del segmento de vegetación.

2.6.1 Fórmula fisionómica de la vegetación (FFV)

La cobertura vegetal es quizá el indicador más directo y de fácil interpretación en un ecosistema, dado que un sistema equilibrado tiene características específicas de estructura y funciones ecológicas. Un ecosistema disturbado pierde su estructura y, por supuesto, las funciones que cumplía, tal como fuente de material orgánico para la formación y estabilidad del suelo, reservorio de nutrientes, sombra, alimento para fauna y regulación hídrica (Senanayake y Jack 1998).

De acuerdo a lo anterior, la evaluación de la estructura de un área se puede realizar mediante la descripción del estado fisionómico de su comunidad vegetal. Para ello, la Red Internacional de Forestería Análoga (RIFA) utiliza como herramienta la FFV. La Fundación Rainforest Rescue FURARE (2006) indica que la aplicación de la fórmula fisionómica de vegetación, permite obtener de una manera fácil y rápida, una descripción (en símbolos) de la estructura del componente vegetal arbóreo y no arbóreo.

2.7 Los sistemas de producción de café

El café es cultivado bajo diversos sistemas de producción, resultado de factores socioeconómicos y biofísicos, que comprenden desde los sistemas tradicionales bajo sombra diversificada a los sistemas modernos de monocultivo y/o bajo sombra especializada (Perfecto et ál. 1996, Beer et ál. 1998, Moguel y Toledo 1999, Donald 2004, Somarriba et ál. 2004). Los sistemas tradicionales de producción de café (rústico, policultivo tradicional y comercial, se basan en una estrategia de aprovechamiento integral de recursos locales, se desarrollan en pequeñas superficies de producción. Estos sistemas tradicionales generalmente emplean mano de obra familiar, y el ingreso económico no solo depende de la producción del café sino también de los beneficios obtenidos del componente de la sombra diversificada, tal como frutales, medicinales, maderables. Por el contrario, los sistemas modernos de producción monocultivo bajo sombra y sin sombra, se caracterizan por su objetivo de obtener máximos rendimientos por unidad de superficie, posee una alta dependencia de insumos externos, predominan las grandes fincas con capital para inversión en mano de obra y agroquímicos, y el componente de árboles de sombra frecuentemente es monoespecífica o eliminada totalmente (Perfecto et ál. 1996, Beer et ál. 1998, Moguel y Toledo 1999, Yopez 2001, Donald 2004).

De acuerdo a la complejidad estructural, composición florística e intensidad de manejo se han realizado clasificaciones de los diferentes sistemas de producción de café predominantes en América Latina. La distribución de estos factores da como resultado un gradiente continuo de sistemas de producción de café que comprenden desde el sistema rústico al monocultivo sin sombra (Moguel y Toledo 1999, Somarriba et ál. 2004). De acuerdo con la clasificación de los sistemas de producción de café de Moguel y Toledo (1999), en América Latina existen cinco tipos principales de producción de café (Figura 2).

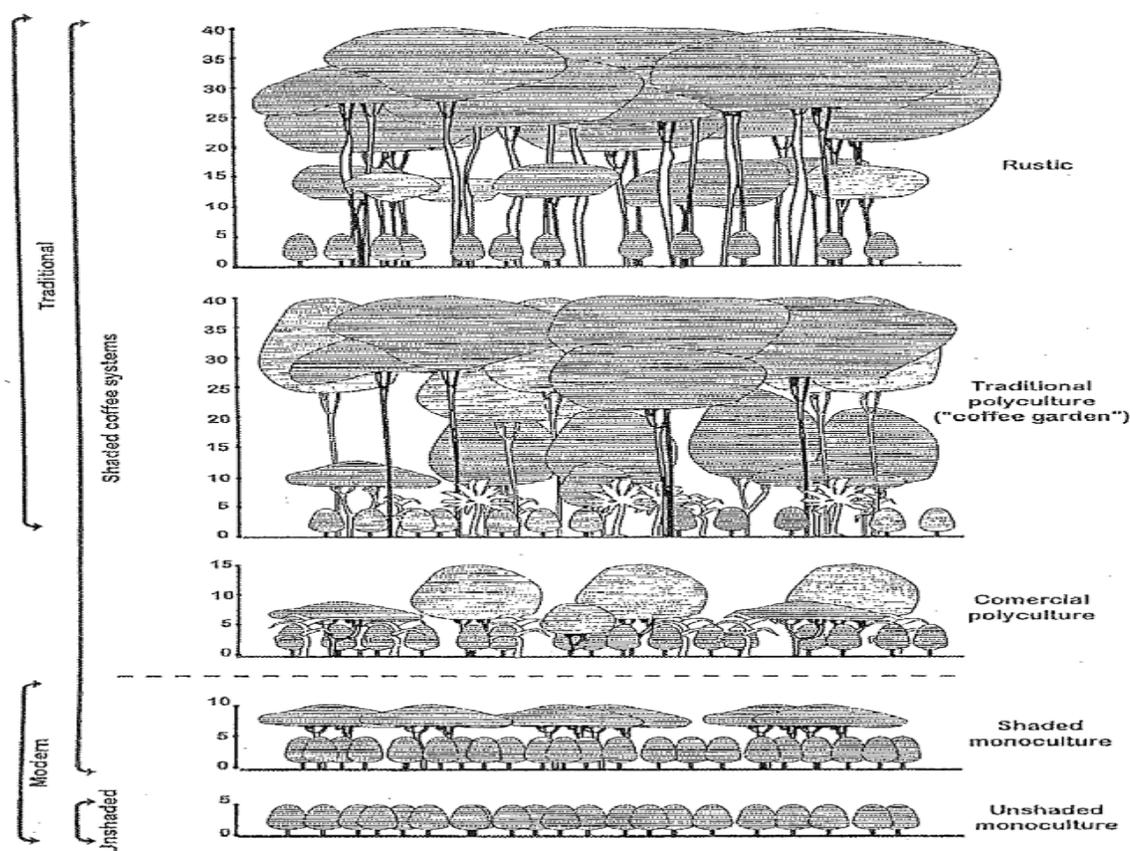


Figura 2. Estructura y composición florística de los principales sistemas de producción con café (Moguel y Toledo 1999)

1. Sistema rústico: se caracteriza por la sustitución del estrato bajo de bosques tropicales y subtropicales por plantas de café. Por lo tanto, la diversidad del dosel arbóreo es preservada en una forma modificada. Este sistema de producción es característico de zonas indígenas, con un manejo mínimo y una nula aplicación de agroquímicos, además de tener un bajo rendimiento.

2. Sistema policultivo tradicional: se trata de un sistema de manejo modificado de bosques nativos, en el cual se establece el café en el estrato bajo, pero a diferencia del sistema rústico, la sombra tiene un mayor manejo ya que se favorecen o introducen especies de interés para los caficultores. Además, es el resultado del conocimiento tradicional en el manejo de los recursos florísticos de grupos indígenas principalmente.
3. Sistema policultivo comercial: este SAF incluye solo especies de sombra introducidas (cultivadas), en el cual la cobertura forestal ya no se encuentra integrada por los árboles nativos, fomentándose árboles de sombra generalmente de leguminosas y/o con algún valor comercial. Las plantaciones son homogéneas, empleándose en muchos casos una sola variedad de cafetos, por lo que la diversidad florística es considerablemente menor que en el sistema anterior.
4. Monocultivo bajo sombra especializada: es un sistema moderno y comercial de producción de café, en el cual se utilizan solo sombras de leguminosas, tal como *Inga* o *Erythrina* principalmente. De esta forma se crea una plantación monoespecífica bajo un dosel (estrato de sombra) igualmente especializado. En este caso el uso de agroquímicos se torna una práctica obligada y la unidad productiva se concentra en una producción exclusivamente dirigida al mercado.
5. Monocultivo bajo sol: este sistema elimina el componente arbóreo de sombra y representa un sistema agrícola que pierde el carácter agroforestal. Convertido ya en una plantación especializada, el café requiere de grandes insumos de agroquímicos e incluso de maquinaria. En este sistema se alcanzan los más altos rendimientos de café por unidad de superficie.

En Costa Rica, el café es producido en siete regiones ubicadas en Tarrazú, Brunca, Orosí, Tres Ríos, Turrialba, Valle occidental y Valle central (ICAFE 2008). Los sistemas de producción predominantes son a pleno sol (Perfecto et ál. 1996), bajo sombras integradas principalmente por *E. poeppigiana* (Leguminosae), *C. alliodora* (Boraginacea) y *Musa* spp (Musacea) (DeClerck 2007). Los sistemas de producción bajo sombra se caracterizan por tener sombra monoespecífica de un solo estrato generalmente con *E. poeppigiana* o bajo sombra de dos estratos compuestos por *E. poeppigiana* y *C. alliodora* (Somarriba et ál. 2004).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en el Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca (CBVCT), anteriormente Corredor Biológico Turrialba Jiménez (CBTJ) (Figura 3), localizado en la provincia de Cartago (Costa Rica), cuenta con una extensión de 72.000 ha y tiene un rango altitudinal que va desde los 339 m en el distrito de Peralta hasta los 3340 m en el Volcán Turrialba (Canet 2003).

Las condiciones climáticas que imperan en el CBVCT están influenciadas por el sistema de vientos alisios que incursionan por la vertiente del Caribe y que aportan la humedad que se distribuye en toda la Cordillera Volcánica Central. Las condiciones ambientales imperantes en la zona son: temperatura promedio de 21,8 °C, precipitación promedio anual de 2693 mm y humedad relativa promedio de 88,1% (Janzen 1991).

En el corredor existen siete zonas de vida siendo las más representativas: bosque húmedo tropical premontano, bosque pluvial tropical premontano y el bosque muy húmedo tropical montano bajo que cubren 53,3; 21,7 y 5,3% del área total (Acuña et ál. 2001). En este corredor predominan dos tipos de suelo: Ultisoles e Inceptisoles que cubren 44,7 y 55,0% del área (Brenes et ál. 1999).

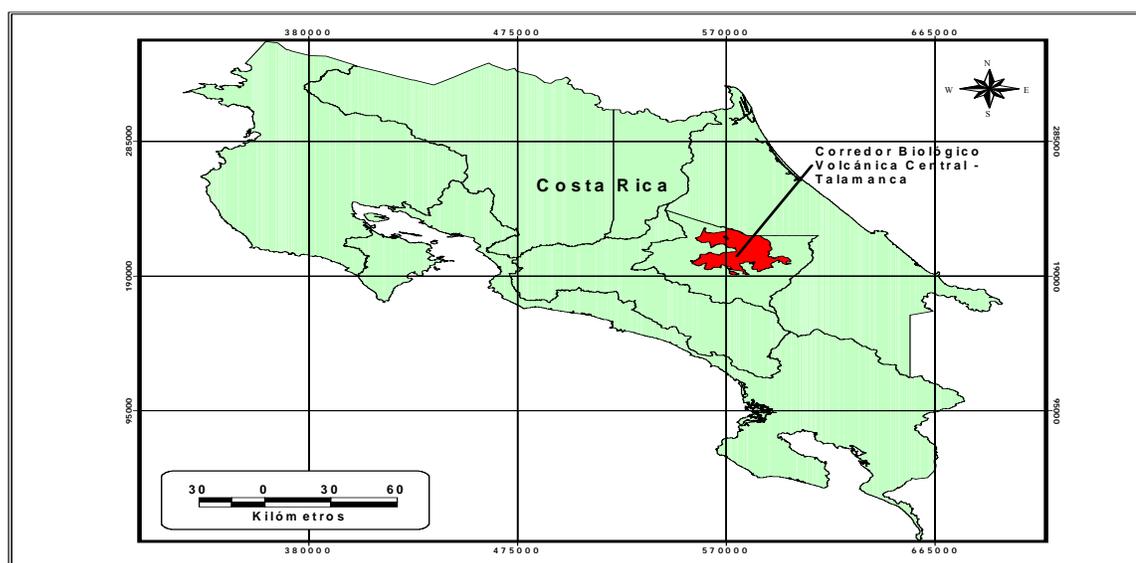


Figura 3. Mapa de ubicación Corredor Biológico Volcánica Centra-lTalamanca (Brenes 2007)

3.2 Selección de los pisos altitudinales y los sistemas de uso de la tierra

Los SAF con café en la zona de estudio se caracterizan por tener de uno a dos estratos de sombra, siendo frecuentes las especies conocidas como poró (*E. poeppigiana*, Leguminosae), laurel (*C. alliodora*, Boraginaceae) y diversas especies de *Musa* spp. (Somarriba et ál. 2004). Para la selección de los pisos altitudinales (PA), se realizaron recorridos y sondeos para ubicar e identificar los sistemas de uso de la tierra (SUT). Así mismo, se utilizó un formulario para obtener información biofísica, sobre la edad y el tipo de manejo general, tal como especies de cultivo, variedades, densidades de siembra, tipo y periodicidad de poda (Anexo 1). Para el presente trabajo de investigación se seleccionaron tres fincas Jardín Botánico, Zonex y AQUIARES localizadas en el Jardín Botánico del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y los distritos Atirro y AQUIARES del Caontón de Turrialba, ubicados en altitudes aproximadas de (600, 800 y 1300 m, respectivamente) (Figura 4).

Los SUT seleccionados fueron bosque secundario (BO), y dos SAF con café: laurel-café (LC) y poró-café (PC), comunes y frecuentes en el corredor biológico, con tecnología semitecnificada de producción convencional. Estos SAF corresponden a la clasificación tecnológica de producción moderna, caracterizado por una sombra especializada, uso de variedades de cafetos de porte bajo con alto rendimiento, altas densidades de siembra, aplicación de agroquímicos y podas frecuentes de árboles de sombra (Perfecto et ál. 1996).

Se seleccionaron dos parcelas temporales de muestreo (PTM) por SUT, ósea seis por PA para un total de 18, las cuales cumplieron con las características deseadas para el estudio (Cuadro 1).

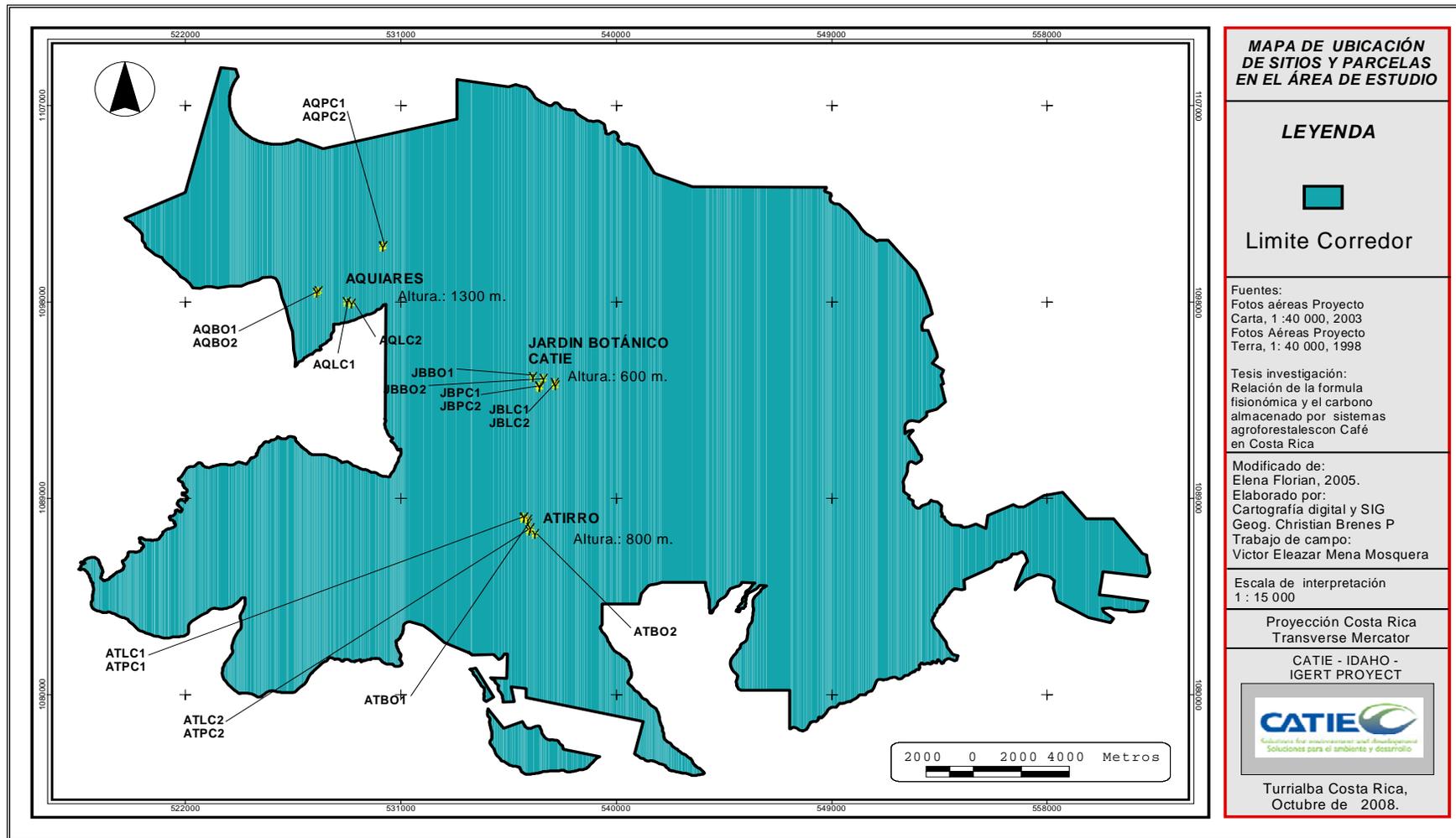


Figura 4. Mapa de ubicación de los pisos altitudinales y los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT (Brenes y Mena 2008)

Cuadro 1. Características de los pisos altitudinales y los SAF con café y bosques secundarios estudiados en el CBVCT

SITIO/PA	SUT	PARCELA	Coordenadas		Altitud (m)	Edad bosque Cafeto y árbol (años)	Variedad de Café	Distancia de siembra Café (m)	Distancia de siembra árbol de sombra (m)
			N	W					
AQUIARES 600 m	Bosque secundario	AQBO1	9°56'17,8''	083° 44'51,7''	1394	22	—	—	—
		AQBO2	9° 56'15,9''	083° 44'54,3''	1369	22	—	—	—
	SAF Laurel + Café	AQLC1	9° 56'02,0''	083° 44'13,3''	1193	10-10	Caturra	0,8 * 2	10 * 12
		AQLC2	9° 55'58,8''	083° 44'05,9''	1164	10-10	Caturra	0,8 * 2	10 * 12
	SAF Poró + Café	AQPC1	9° 57'27,3''	083° 43'21,2''	1342	10-10	Caturra	1,0 * 2	6 * 6
		AQPC2	9° 57'26,0''	083° 43'22,4''	1325	10-10	Caturra	1,0 * 2	6 * 6
ATIRRO 800 m	Bosque secundario	ATBO1	9° 50'29,6''	083° 40'00,1''	814	40	—	—	—
		ATBO2	9° 50'08,0''	083° 39'50,1''	800	40	—	—	—
	SAF Laurel + Café	ATLC1	9° 50'33,8''	083° 40'06,1''	759	10-10	Caturra	0,8 * 2	10 * 12
		ATLC2	9° 50'14,8''	083° 39'58,4''	809	15-15	Caturra	0,8 * 2	10 * 12
	SAF Poró + Café	ARPC1	9° 50'34,6''	083° 40'05,5''	750	10-10	Caturra	0,8 * 2	6 * 8
		ATPC2	9° 50'17,5''	083° 39'56,9''	818	15-15	Caturra	0,8 * 2	6 * 8
JARDÍN BOTÁNICO CATIE 1300 m	Bosque secundario	JBBO1	9° 54'07,3''	083° 39'52,4''	591	35	—	—	—
		JBBO2	9° 54'05,0''	083° 39'38,4''	613	35	—	—	—
	SAF Laurel + Café	JBLC1	9° 53'59,0''	083° 39'22,5''	621	20-20	Caturra	0,8 * 2	10 * 12
		JBLC2	9° 53'55,3''	083° 39'21,1''	623	20-15	Caturra	0,8 * 2	10 * 12
	SAF Poró + Café	JBPC1	9° 53'53,3''	083° 39'43,7''	628	25-20	Caturra	1,5 * 2	6 * 6
		JBPC2	9° 53'52,9''	083° 39'42,8''	629	25-20	Caturra	1,5 * 2	6 * 6

PA: piso altitudinal; SUT: sistema de uso de la tierra

Los PA y los SUT seleccionados fueron aquellos que cumplieron con los siguientes criterios:

- Que los PA tuvieran la presencia de los SUT (BO, LC y PC)
- Que los PA tuvieran diferencia altitudinal aproximada de 200 m
- Que los bosques fueran secundarios
- Que los SAF con café tuvieran una sola especies de sombra (laurel o poró)
- Que los SAF con café tuvieran el mismo manejo agronómico
- Que los cafetos se encontraran en producción
- Que los cafetos y los árboles de sombra tuvieran similar distancia de siembra

3.3 Variables evaluadas en los SUT

En los SUT bosque secundario y los SAF laurel-café y poró-café se evaluaron todos los reservorios de carbono y la composición fisionómica de la vegetación Cuadro 2.

Cuadro 2. Variables evaluadas en los sistemas de uso de la tierra estudiados

Variables evaluadas	BO	SAF
Carbono almacenado de la vegetación (árboles y sotobosque)	X	X
Carbono almacenado en árboles muertos en pie y madera caída	X	X
Carbono almacenado en la vegetación herbáceas	X	X
Carbono almacenado en la hojarasca	X	X
Carbono almacenado en las raíces	X	X
Carbono orgánico en el suelo superficial (0-30 cm)	X	X
Carbono almacenado en los árboles de laurel y poró		X
Carbono almacenado en los cafetos		X
Composición fisionómica de la vegetación	X	X

BO: bosque secundario; SAF: sistema agroforestal

3.4 Unidad experimental o parcela temporal de muestreo (PTM)

En cada PA, se establecieron dos PTM de 50 * 20 m (1000 m²) y subparcelas de 1, 25, 100, 400 y 500 m² (Figura 5). En las PTM de 1000 m² se realizó la descripción fisionómica y el muestreo de biomasa y carbono orgánico del suelo. Cada parcela de estudio se ubicó en un lugar representativo de las condiciones predominantes del sistema. Se escogió aleatoriamente un punto de partida, iniciando el recorrido a la derecha hasta cerrar y armar el rectángulo de la parcela. En las esquinas los árboles (o estacas) se marcaron con cinta plástica amarilla y también se tomaron coordenadas con GPS para facilitar la ubicación en posteriores visitas.

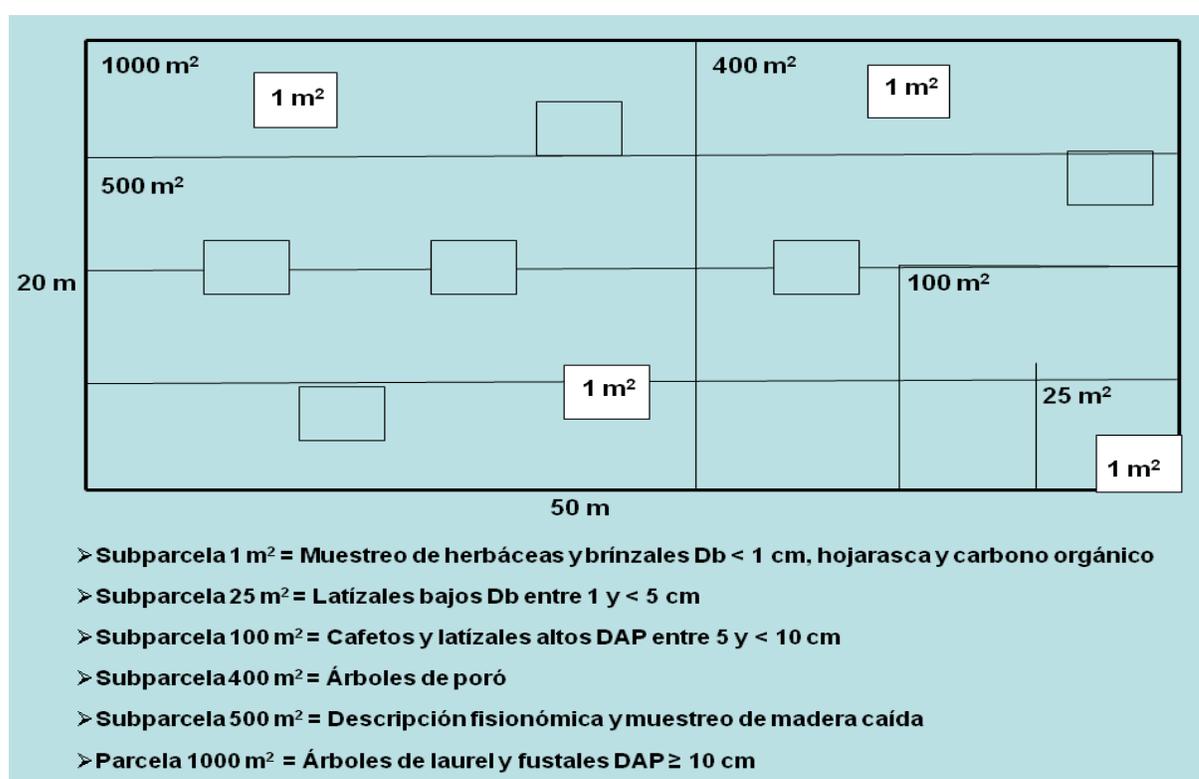


Figura 5. Parcelas temporales de muestreo para la descripción fisionómica y muestreo de biomasa y carbono orgánico en el suelo

3.5 Métodos de muestreo y descripción en PTM de los sistemas estudiados

3.5.1 Muestreo de biomasa en PTM de los sistemas estudiados

El muestreo para biomasa se realizó todas las PTM, a continuación se detalla por componente:

3.5.1.1 *Vegetación herbácea, brinzales y latizales bajos ($Db < 5\text{ cm}$)*

En las cuatro subparcelas de 1 m^2 se cortó, recolectó y pesó el total de hierbas y brinzales con diámetro a la base del tallo (Db) $< 1\text{ cm}$, con el fin de determinar su peso fresco. Del total de la muestra, se tomó una submuestra para ser secada en el laboratorio a $80\text{ }^\circ\text{C}$ por 24 horas para determinar la materia seca y, posteriormente, obtener la biomasa. Se midió el Db y altura total (h) de latizales bajos con Db entre $1\text{ y } < 5\text{ cm}$, en la subparcela de 25 m^2 .

3.5.1.2 *Fustales, latizales altos y palmas ($DAP \geq 5\text{ cm}$)*

A todos los árboles del bosque y palmas en pie con diámetro a la altura del pecho (DAP) $\geq 10\text{ cm}$, se les midió el DAP con cinta diamétrica y la h con vara graduada, clinómetro, haga y cinta métrica en la parcela de 1000 m^2 . Se midió el DAP y h a los latizales altos con DAP entre $5\text{ y } < 10\text{ cm}$ en la subparcela de 100 m^2 ; diámetro a 15 centímetros de la base del tallo (d_{15}) y h de los cafetos en la subparcela de 100 m^2 ; diámetro en el centro del fuste (Dc), altura del fuste, diámetro de la protuberancia, altura de la protuberancia, diámetro en la base de la rama (Db) y longitud de la rama (l) a los árboles de poró en la subparcela de 400 m^2 ; DAP y h de los árboles de laurel en la parcela de 1000 m^2 .

3.5.1.3 *Hojarasca y madera caída*

Se recolectaron cuatro muestras de hojarasca, en un marco metálico de $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ (1 m^2). En cada subparcela de 1 m^2 , se colectó cuidadosamente toda la hojarasca dentro del marco metálico evitando trozos de ramas grandes podridas, piedras, material en descomposición o cualquier otro elemento que no fuera la muestra deseada. Todo el material seleccionado en el marco metálico se colocó en una bolsa plástica grande, tomando antes el peso fresco y se tomó una sub-muestra de aproximadamente 200 g para obtener materia seca en laboratorio (24 h a $80\text{ }^\circ\text{C}$) y, posteriormente, obtener la biomasa total.

Para el muestreo de la madera caída, se trazó sobre el suelo una línea de 50 m de longitud en el centro de la subparcela de $50 * 10$ (500 m^2), y se midió el diámetro en el centro del tronco y la longitud de todos los fustes y ramas caídas presentes en esa área.

3.5.2 Muestreo y determinación del carbono orgánico en el suelo, densidad aparente y el porcentaje de pedregosidad del suelo en las PTM de los sistemas estudiados

3.5.2.1 Carbono orgánico en el suelo

Las muestras de suelo se obtuvieron utilizando un barreno a profundidad 0 a 30 cm. Las muestras fueron extraídas en diez subparcelas de 1 m² ubicadas en las PTM. El material se colectó y se colocó en una bolsa grande, después de extraídas todas las muestras de los orificios, se procedió a mezclarlas, y se sacó una sub-muestra homogénea de aproximadamente 250 g. El carbono orgánico se determinó en el laboratorio de suelos de CATIE mediante analizador de CHN.

3.5.2.2 Densidad aparente

Se utilizó el método del cilindro de volumen conocido (Márquez 2000), se seleccionó una de las subparcelas de 1 m² en cada PTM. Se hizo una minicalicata de 30*30*30 cm para extraer una muestra a 15 cm de profundidad con ayuda de un cilindro metálico. Las muestras tomadas con el cilindro metálico se llevaron al laboratorio, se colocó en un horno hasta secar completamente (peso constante), se pesó en seco y se calculó la DA mediante la siguiente ecuación:

$$DA = (P2 - P1) / Vol. Cilindro \quad Ec. 1$$

Donde: DA: densidad aparente (g cm³); P1: peso del cilindro (g); P2: peso del cilindro más el peso seco del suelo (g); volumen del cilindro = área en la base x longitud (cm³)

3.5.2.3 Porcentaje de pedregosidad

En cada PTM, se hicieron cuatro minicalicatas de 30*30*30 cm. Se seleccionaron las PTM con minicalicatas que presentaron piedras con diámetros $\geq 7,5$ cm, se sacó y separó todo el material (tierra y piedras). Las piedras fueron lavadas y llevadas al laboratorio para estimar su volumen por calicata y luego sacar el promedio. El porcentaje de pedregosidad se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$\% P = (VP * 100) / Vh \quad Ec. 2$$

Donde: %P: porcentaje de pedregosidad (%); VP: volumen de las piedras (m^3); Vh: volumen de una hectárea del terreno a una profundidad de 30 cm (m^3).

3.5.3 Descripción fisionómica de la vegetación

En la subparcela de 50 * 10 (500 m^2) de las PTM, se realizó la descripción fisionómica de la vegetación, utilizando la metodología para la aplicación de la FFV (Fundación Rainforest Rescue 2006) (Cuadro 3). Se siguieron los siguientes pasos:

1. Ubicación del área de evaluación
2. Definición del número de doseles o estratos del sistema.
3. Identificación de algunos árboles como referencia.
4. Inicio de la descripción de las plantas leñosas de cada dosel, empezando por el más alto (utilizando el símbolo correspondiente a su forma de crecimiento).
5. De las especies prominentes o dominantes de cada dosel, determinar: la altura, cobertura, consistencia y tamaño de la hoja. Separar cada dosel con (,)
6. A continuación se describe (con el símbolo respectivo), las plantas herbáceas, su altura promedio y cobertura. Cuando terminamos la descripción del último dosel (el más bajo), separar con una coma (;)
7. Seguimos con la descripción de las formas de crecimiento especial, su altura promedio o rango de altura y cobertura. Se separa con punto y coma (;) cada categoría de forma de crecimiento especial.

Cuadro 3. Base de datos para la aplicación de la Fórmula Fisionómica de la Vegetación (FFV)

A. Crecimiento por Categorías	
1. Formas Básicas de Crecimiento	Símbolo
<i>Plantas leñosas</i>	
Siempreverdes de hoja ancha	
Deciduos de hoja ancha	V
Acícula siempreverde	D
Acícula decidua	A
Áfilo (Sin presencia de hojas)	C
Semi decíduo (V+D)	O
Mixto	S
<i>Especies no- leñosas</i>	
Gramíneas	M
Plantas herbáceas (ej. helechos)	G
Líquenes y Musgos	H
	L
2. Formas de Crecimiento Especial	
Trepadoras (Lianas)	T
Suculentas (Cactus)	Z
Plantas de Ramillete (Banano)	R
Bambúes	B
Epífitas	E
Palmas	P
3. Características de la hoja	
<i>Consistencia</i>	
Dura	
Suave	d
Suculenta	s
<i>Tamaño</i>	
Mesofila (>12.7 cm)	z
Notofila (12.6 – 7.6cm)	g
Microfila (7.5-2.5cm)	m
Nanofila (< 2.5cm)	p
	n
B. Categoría de Estructura	
1. Altura (Estratificación)	Símbolo
8 => 35 m	
7 = 20 – 35 m	
6 = 10 – 20 m	
5 = 5 – 10 m	
4 = 2 – 5 m	
3 = 0.5 – 2 m	
2 = 0.1 – 0.5 m	
1 = < 0.1m	
2. Cobertura	
Continua (< 75%)	c
Interrumpida (50 - 75%)	i
En parches (25 - 50%)	p
Raro (de 6 a 25%)	r
Esporádico (1 - 6%)	e
Casi ausente (> 1%)	a

Fuente: Fundación Rainforest Rescue (2006)

3.6 Métodos de estimación en PTM de los sistemas estudiados

3.6.1 Estimación de biomasa

Con la información de las mediciones y muestreos realizados en las PTM, establecidas en los sistemas de uso de la tierra estudiados, se estimó la biomasa total utilizando ecuaciones alométricas. A continuación se detalla por componentes.

3.6.1.1 Biomasa arriba del suelo

La biomasa arriba del suelo se refiere a la biomasa aérea total de las especies encontradas en los sistemas estudiados, está se estimó utilizando ecuaciones alométricas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Ecuaciones alométricas empleadas para estimar biomasa aérea total en SAF y bosques del CBVCT, Costa Rica

Ecuación	R2 ajustado	Rango dap	Especie	Fuente
4. $B_t = 10^{(-1,5+2,7*\text{Log}(dap))}$	0,89	5 - 60	49 Sp del bosque secundario CR	Segura et ál. en preparación.
5. $B_t = \exp^{(0,76+0,00015*dap^2)} * 1000$	0,71	60 - 105	7 Sp del bosque natural CR	Segura y Kanninen (2005)
6. $B_t = 42,69 - 12,80*(dap) + 1,242*(dap^2)$	0,92	5 - 148	Sp del trópico húmedo	Brown et ál. (1989)
7. $B_t = 10^{(-1,5+1,06*LN(dap))}$	0,88	0,3 - 9,3	Individuos con (dap < 10cm)	Andrade et ál. en preparación.
8. $B_t = 10^{(-0,51+2,08*\text{Log}(dap))}$	0,88	3,9 - 102	Laurel	Andrade et ál. en preparación.
9. $B_t = 10^{(-1,11+1,58*\text{Log}(d15)+0,58*\text{Log}(ht))}$	0,94	0,3 - 7,4	Café	Segura et ál. (2006)
10. $B_t = 10^{(-1,5 + 2,44*\text{Log}(Db))}$	0,87	1 - 17	Ramas de poró	Mena y Andrade. en preparación.
11. $B_t = 24,56 + 4,92*ht + 1,02*h^2$	0,82	Rango ht 0,2 - 14,5	Palmas	IPPC (2003)

Bt: biomasa aérea total (kg árbol⁻¹); dap: diámetro a la altura del pecho en (cm); d₁₅: diámetro a 15 cm del suelo en (cm); d_b: diámetro a la base de la rama en (cm); ht: altura total en (m); Log: logaritmo base 10; LN: logaritmo natural; exp = potencia base e.

La biomasa de la vegetación herbácea y brínzales ($Db < 1$ cm), se estimó utilizando la Ec. 3

El volumen del fuste de los árboles de poró fue estimado mediante las fórmulas de Smalian y/o Huber. El volumen de la cabeza o protuberancia de los árboles de poró se estimó mediante la siguiente ecuación:

$$V_p = [(d_1+d_2+d_3)/3]^2 * \pi/4 * ht \quad \text{Ec. 12}$$

Donde: V_c : es volumen de la cabeza o protuberancia (m^3), $[(d_1+d_2+d_3)/3]^2 * \pi/4$ corresponde al área basal de la cabeza en (m^2), $d_1+d_2+d_3$, son los diámetros en el centro y dos diagonales de la cabeza o protuberancia (cm) y ht es la altura total en (m) independiente de la misma por encima del fuste o poste.

La biomasa del fuste y la protuberancia de árboles de poró se calcularon utilizando la siguiente ecuación:

$$B_{fp} = V * GE \quad \text{Ec. 13}$$

Donde: B_{fp} : es la biomasa del fuste y/o protuberancia ($t \text{ árbol}^{-1}$), V : es el volumen ($m^3 \text{ árbol}^{-1}$), GE : es la gravedad específica de la madera ($0,25 t m^{-3}$) (Avila 2000).

3.6.1.2 Biomasa abajo del suelo

La biomasa abajo del suelo se refiere a la biomasa de las raíces, está se estimó empleando la ecuación desarrollada por (Cairns et al. 1997), citada por el IPCC (2003) y recomendada para bosques tropicales.

$$B_r = \exp [-1,06 + 0,88 * LN(Bt)] \quad \text{Ec. 14}$$

Donde: B_r = biomasa de raíces ($t \text{ ha}^{-1}$); LN = logaritmo natural; \exp = potencia base e; Bt = biomasa aérea total ($t \text{ ha}^{-1}$).

3.6.1.3 *Necromasa*

Este componente incluye la hojarasca, madera caída y árboles muertos en pie. El volumen de la madera caída se obtuvo con la ecuación recomendada por (IPCC 2003).

$$V_{mc} = \pi^2 * (D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2) / (8 * L) \quad Ec. 15$$

Donde: V_{mc} : volumen de madera caída ($m^3 \text{ ha}^{-1}$); D_1, D_2, \dots, D_n = diámetros de las piezas interceptadas por la línea (cm); L : longitud de la línea (m).

El volumen del tronco de los árboles muertos en pie se estimó mediante las formulas de Smalian y/o Huber. Los valores de volumen se convirtieron a biomasa utilizando los resultados de gravedad específica, según la clasificación de la densidad en baja, media y alta (0,23, 0,42 y 0,6), respectivamente ($t \text{ m}^{-3}$) (IPCC 2003).

3.6.2 *Estimación del carbono almacenado*

3.6.2.1 *Carbono almacenado en la biomasa total (CABt)*

El carbono almacenado en la biomasa arriba y abajo del suelo y, en la necromasa, se estimó mediante el uso de una fracción de carbono promedio de 0,5 (IPCC 2005). Esto último se debe a que aproximadamente 50% del peso seco de cualquier organismo lo constituye el carbono (Brown et ál. 1992; Smith et al. 1993; Ordóñez, 1998). El carbono almacenado en la biomasa de brinzales, vegetación herbácea y hojarasca, se estimó utilizando la fracción de carbono determinada en el laboratorio de suelos (CATIE) para cada una de las muestras, (Anexo 2). Se utilizó la siguiente ecuación:

$$CA = B * Fc \quad Ec. 16$$

Donde: CA : carbono almacenado en la biomasa total ($Mg \text{ C ha}^{-1}$), B : biomasa total ($Mg \text{ C ha}^{-1}$), Fc : fracción de carbono contenida en la biomasa.

3.6.2.2 *Carbono orgánico en el suelo*

El carbono orgánico del suelo, se estimó utilizando la DA, el % de carbono determinado en el laboratorio de suelos (CATIE) (Anexo 2), la profundidad de muestreo y el porcentaje de suelo sin piedras. Se utilizó la ecuación modificada de (Andrade e Ibrahim 2003):

$$COS = \%CO * DA * P * \%SSP / 100 \quad \text{Ec. 17}$$

Donde: COS: carbono orgánico en el suelo (Mg C ha^{-1}), %CO: porcentaje de carbono orgánico (%), DA: densidad aparente del suelo (g cm^{-3}), P: profundidad del suelo muestreado (30 cm); %SSP: % de suelo sin piedras.

3.6.2.3 *Carbono total almacenado*

El carbono total almacenado se estimó sumando el carbono almacenado en cada uno de los reservorios. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$CTA = Cars + Cabs + Cos \quad \text{Ec. 18}$$

Donde: CTA: carbono total almacenado (Mg C ha^{-1}), Cars: carbono almacenado arriba del suelo, Cabs: carbono almacenado abajo del suelo, Cos: carbono orgánico del suelo.

3.6.3 *Estimación de las variables fisionómicas y la composición fisionómica de la vegetación (CFV)*

Con las formulas fisionómicas de la vegetación (FFV) obtenidas en las PTM, se procedió a estimar el valor de cada una de las variables fisionómicas (% cobertura, No. estratos, Altura del dosel, Consistencia de las hojas y Tamaño de las hojas), con base en los rangos establecidos en la base de datos para la aplicación de la FFV y los datos del muestreo de biomasa. Los valores de las variables fueron estimados de la siguiente forma:

3.6.3.1 Porcentaje de cobertura

El porcentaje de cobertura se calculó sumando el porcentaje de cobertura aportado por cada uno de los estratos presentes en la PTM, se utilizó la siguiente ecuación.

$$\%C = (\sum \%CE / 600) * 100 \quad \text{Ec. 19}$$

Donde: %C: porcentaje de cobertura; $\sum \%CE$: la sumatoria de los porcentajes de cobertura de los estratos.

3.6.3.2 Número de estratos

El número de estratos se obtuvo de la sumatoria de los estratos presentes en la PTM

$$NE = (\sum E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n) \quad \text{Ec. 20}$$

Donde: NE: número de estratos; $(\sum E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n)$: sumatoria de los estratos presentes en el sistema.

3.6.3.3 Altura del dosel

La altura del dosel se obtuvo del promedio del rango de altura del estrato superior (m)

$$AD = \text{PMEDIO RAES}$$

3.6.3.4 Área basal

El área basal se obtuvo de la sumatoria de las áreas basales de los árboles de las PTM (dap \geq 10 cm)

$$AB = (\sum G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n) \quad \text{Ec. 21}$$

Donde: AB: área basal (m²/ha); $(\sum G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n)$: sumatoria de las áreas basales de los árboles con dap \geq 10 cm presentes en el sistema.

3.6.3.5 Consistencia de las hojas

La consistencia de las hojas se estimó muestreando 10 hojas de distinta consistencia desde una más suave hasta una muy dura, se sacó y peso una submuestra de 25 cm² de cada hoja para estimar la consistencia de cada categoría de hoja. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$Ch = P * A \quad \text{Ec. 22}$$

Donde: Ch: Consistencia de la hoja g cm²; P: Peso de la hoja (g); A: Área de la hoja (cm²)

3.6.3.6 Tamaño de las hojas

Esta variable se obtuvo del promedio de los rangos establecidos en la FFV para hojas grandes medianas y pequeñas (cm).

$$Th = \text{PROMEDIO} (hg, hm \text{ y } hp)$$

3.6.3.7 Composición fisionómica de la vegetación (CFV)

La presente es una herramienta para describir cuantitativamente la composición fisionómica de la vegetación de los sistemas estudiados. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$CFV = \sum (\%C * 100 / VM\%C) \% + (NE * 100 / VMNE) \% + (AD * 100 / VMAD) \% + (AB * 100 / 100) \% \quad \text{Ec. 23}$$

Donde: CFV: composición fisionómica de la vegetación (%); %C: porcentaje de cobertura; NE: número de estratos; AD: altura del dosel; AB: área basal; %: porcentaje asignado a cada variable.

3.7 Análisis de datos

Para todos los análisis de los sistemas estudiados se utilizó el Software InfoStat 2008.

3.7.1 Carbono almacenado entre los pisos altitudinales y entre los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT

Para establecer la diferencia del carbono almacenado en la biomasa total entre los PA estudiados inferior 600, medio 800 y superior 1300 m de altitud y entre los SUT estudiados (bosque secundario, SAF laurel-café y poró-café), se transformó la variable carbono con (Log_{10}) y se utilizó un diseño completo al azar (DCA) con tres tratamientos (SUT) y dos repeticiones (parcelas) en tres pisos altitudinales (sitios). El modelo fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + P_j + SP_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde: Y_{ijk} = observaciones del carbono almacenado por PTM (Mg ha^{-1}); μ = promedio general del carbono almacenado por PTM (Mg ha^{-1}); S_i = efecto del i-ésimo SUT; P_j = efecto de la j-ésimo PA; SP_{ij} = interacción SUT * PA; ϵ_{ijk} = error.

Para establecer las diferencias del carbono orgánico en el suelo y del carbono total almacenado entre los PA estudiados y entre los SUT, se utilizó un diseño completo al azar (DCA) con tres tratamientos (SUT) y dos repeticiones (parcelas) en tres pisos altitudinales (sitios). El modelo fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + P_j + SP_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde: Y_{ijk} = observaciones del carbono almacenado por PTM (Mg ha^{-1}); μ = promedio general del carbono almacenado por PTM (Mg ha^{-1}); S_i = efecto del i-ésimo SUT; P_j = efecto de la j-ésimo PA; SP_{ij} = interacción SUT * PA; ϵ_{ijk} = error.

En los dos modelos se utilizó la técnica de análisis de varianza (ANDEVA) y la prueba de comparación de medias LSD de Fisher trabajando con un $\alpha = 0,05$.

3.7.2 Composición fisionómica de la vegetación entre los pisos altitudinales y entre los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT

Se utilizó la formula fisionómica de la vegetación (FFV), para describir fisionómicamente los SUT y estimar las variables fisionómicas: porcentaje de cobertura,

número de estratos, altura del dosel, consistencia de las hojas, tamaño de las hojas y área basal y la su composición fisionómica de la vegetación (CFV).

Se realizó un análisis de correlación de las variables fisionómicas con el carbono almacenado en la biomasa total de los SUT. Teniendo en cuenta las variables fisionómicas que resultaron mayormente correlacionadas con carbono, se estimó la CFV utilizando cuatro combinaciones porcentuales y se hizo un análisis de correlación de las diferentes CFV obtenidos con el carbono almacenado en la biomasa total de los SUT estudiados.

Para determinar las diferencias estadísticas entre las CFV entre los PA estudiados y entre los SUT, se utilizó un diseño completo al azar (DCA) con tres tratamientos (SUT) y dos repeticiones (parcelas) en tres PA (sitios). El modelo fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + P_j + SP_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde: Y_{ijk} = observaciones del carbono almacenado por PTM (Mg ha^{-1}); μ = promedio general del carbono almacenado por PTM (Mg ha^{-1}); S_i = efecto del i -ésimo SUT; P_j = efecto de la j -ésimo PA; SP_{ij} = interacción SUT * PA; ϵ_{ijk} = error.

Se utilizó la técnica de ANDEVA y la prueba de comparación de medias LSD de Fisher trabajando con un $\alpha = 0,05$.

3.7.3 Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación de los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT

Con el propósito de disminuir la variabilidad del carbono, debido a que las parcelas de un mismo sistema presentaban grandes diferencias, se estimó la CFV por SUT con cuatro combinaciones porcentuales y se hizo un análisis de correlación de las diferentes CFV con carbono almacenado en la biomasa total por SUT. Se seleccionó la CFV que presentó mayor correlación con el carbono almacenado en la biomasa total. En este análisis se tomó en cuenta el carbono almacenado en la biomasa total, debido a que es el componente que representa al SUT, es decir, el carbono que está presente debido al sistema de manejo del suelo.

Para establecer la relación entre la composición fisionómica de la vegetación y el carbono almacenado en la biomasa total de los SUT estudiados, se utilizó la técnica de análisis de regresión y se probaron modelos con y sin variables transformadas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Carbono almacenado entre los pisos altitudinales y entre los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT

4.1.1 Carbono almacenado en la biomasa total

Se encontraron diferencias significativas ($p = 0,0036$) en el carbono almacenado en la biomasa total entre los PA inferior 600, medio 800 y superior 1300 m de altitud (93,7; 79,6 y 34,8 Mg C ha^{-1} , respectivamente). Asimismo, se encontraron diferencias significativas ($p < 0,0001$) entre los SUT bosque secundario y SAF laurel-café y poró-café (158,7; 28,3 y 21,0 Mg C ha^{-1} , respectivamente) (Figura 6).

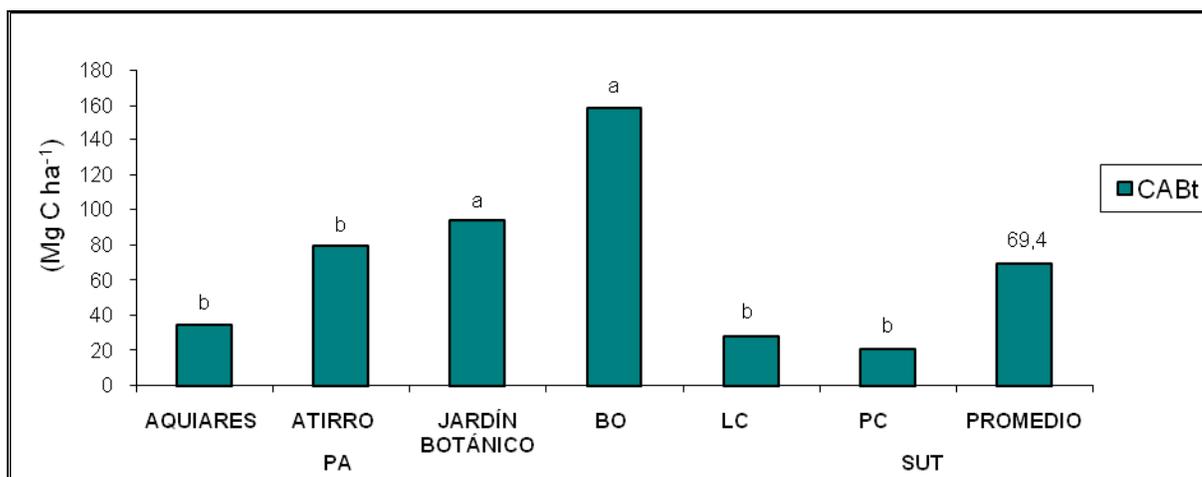


Figura 6. Carbono almacenado en la biomasa total en los pisos altitudinales y los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT

CABt: carbono almacenado en la biomasa total; PA: piso altitudinal; SUT: sistema de uso de la tierra BO: bosque secundario; LC: sistema agroforestal laurel-café; PC: sistema agroforestal poró-café. Barras con letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$).

El carbono almacenado en la biomasa total fue en promedio de 69,4 Mg C ha^{-1} , con una variabilidad entre 9,9 y 208,6 Mg C ha^{-1} . El PA inferior 600 m de altitud, presentó el mayor almacenamiento de carbono en la biomasa total (45%), superando en 169% al PA superior 1300 m, que reportó el menor almacenamiento. Esta diferencia puede ser, debido a que los SAF con café y el bosque secundario del Jardín Botánico están entre los sistemas de mayor edad tenidos en cuenta en el estudio.

Los bosques secundarios mostraron el mayor almacenamiento de carbono en la biomasa total (76% del total), superando en 543% a los SAF con café que reportaron menor almacenamiento.

La disminución en altitud, tiene un efecto positivo en el almacenamiento de carbono en la biomasa total de los SUT estudiados en el CBVCT, ya que a medida que disminuye la altitud aumenta el CABt.

4.1.2 Carbono orgánico en el suelo

Se presentaron diferencias significativas ($p = 0,0002$) en el carbono orgánico en el suelo entre los PA, encontrándose (136,8; 90,6 y 78,5 Mg C ha⁻¹, en el superior 1300, inferior 600 y medio 800 m de altitud, respectivamente). Asimismo, se presentaron diferencias significativas ($p = 0,0210$) entre los SUT estudiados, encontrándose (113,1; 108,1 y 84,9 Mg C ha⁻¹, en bosque secundario, SAF poró-café y laurel-café, respectivamente) (Figura 7).

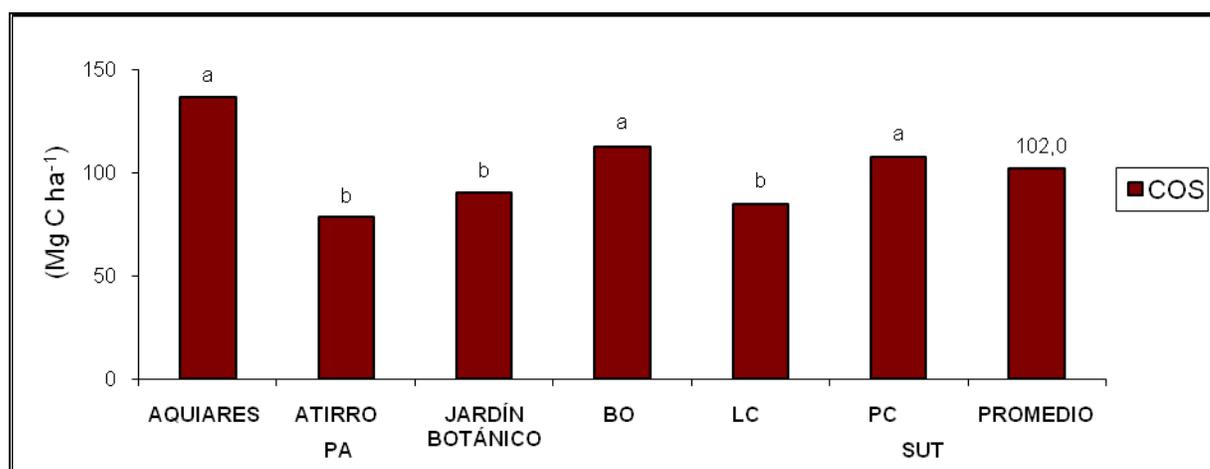


Figura 7. Carbono orgánico en el suelo en los pisos altitudinales y los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT

COS: carbono orgánico en el suelo; PA: piso altitudinal; SUT: sistema de uso de la tierra BO: bosque secundario; LC: sistema agroforestal laurel-café; PC: sistema agroforestal poró-café. Barras con letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$).

El carbono orgánico en el suelo fue en promedio de 102,0 Mg C ha⁻¹, con una variabilidad entre 70,7 y 167,2 Mg C ha⁻¹. El PA superior 1300 m, reportó el mayor almacenamiento de carbono orgánico en el suelo (44,7%), superando en 51% al PA medio, que presentó el menor almacenamiento. Esta diferencia puede ser, debido a que los suelos son diferentes y muy seguramente había diferencias en el contenido de carbono antes de establecer

las parcelas. Es decir, efecto del tipo de suelo y no solo del sistema, además, los suelos del PA superior 1300 m, se encuentran ubicados en las faldas del Volcán Turrialba, lo que los hace provenientes de cenizas volcánicas y tienen la propiedad de tener un perfil con una composición alta de materia orgánica (Mata 2003).

Ochoa et ál. (2000) identificaron una correlación positiva entre el contenido de carbono orgánico en el suelo y la altitud. El contenido de materia orgánica en los suelos aumenta a medida que disminuye la temperatura media anual (Rojas 1987). Los valores de carbono orgánico en el suelo obtenidos para los pisos altitudinales estudiados muestran esta tendencia. Ya que a mayor altitud, la temperatura disminuye lo cual provoca una baja en la actividad microbiana y por eso hay más materia orgánica en estos suelos.

Los SUT bosque secundario y el SAF poró-café presentaron el mayor almacenamiento de carbono orgánico en el suelo (37,0 y 35,3%, respectivamente), superando en 33 y 27% al SAF laurel-café. Esta diferencia puede ser debido a que en los bosques secundarios y los SAF poró-café aportan mayor necromasa al suelo y, además está se descompone e incorpora mas rápido al suelo que en los SAF laurel-café.

El incremento en altitud tiene un efecto positivo en el carbono orgánico en el suelo de los SUT estudiados en el CBVCT, ya que a medida que aumenta la altitud aumenta el carbono orgánico en los suelos.

4.1.3 Carbono total almacenado

Se presentaron diferencias significativas ($p = 0,0014$) en el carbono total almacenado entre los SUT estudiados, encontrándose (271,7; 129,1 y 113,2 Mg C ha⁻¹, en bosque secundario, SAF poró-café y laurel-café, respectivamente). En contraste, no se presentaron diferencias significativas ($p = 0,7267$) entre los PA, encontrándose (184,2; 171,7 y 158,1 Mg C ha⁻¹, en el inferior 600, superior 1300 y medio 800 m de altitud, respectivamente) (Figura 8).

La variación en altitud no tiene efecto en el carbono total almacenado de los SUT estudiados en el CBVCT.

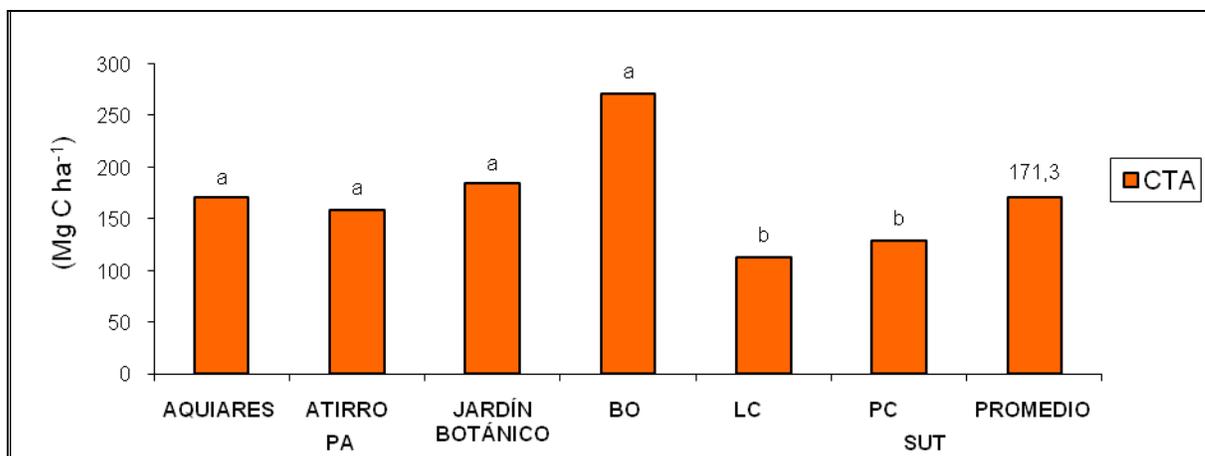


Figura 8. Carbono total almacenado en los pisos altitudinales y los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT

CTA: carbono total almacenado; PA: piso altitudinal; SUT: sistema de uso de la tierra BO: bosque secundario; LC: sistema agroforestal laurel-café; PC: sistema agroforestal poró-café. Barras con letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$).

El carbono total almacenado fue en promedio 171,3 Mg C ha⁻¹. Se encontró que el suelo a los 30 cm superficiales fue el mayor reservorio de carbono, almacenando en promedio 102,0 Mg C ha⁻¹ (59,5%), similar a los valores reportados por Brown et ál. 1982, Johnson 1992; Moraes 2001, Orrego et ál. 2003); la biomasa total almacena 69,3 Mg C ha⁻¹ (40,5%), siendo la biomasa aérea la de mayor contribución, con 53,7 Mg C ha⁻¹ (31,4%), también similar a los valores reportados por Arreaga (2002) y Orrego et ál. (2003). La biomasa de raíces y la necromasa son componentes menos importantes ya que almacenan (6,4 y 2,7 %, respectivamente). Sin embargo la inclusión de estos componentes incrementaría los potenciales créditos de carbono comercializables, siempre y cuando su medición sea rentable (Cuadro 5, Anexo 3).

Cuadro 5. Carbono total almacenado en los pisos altitudinales y los SAF con Café y Bosques secundarios estudiados en el CBVCT

SITIO/PA	SUT	Reservorios de carbono (%)				COS	Carbono total (Mg C ha ⁻¹)
		Biomasa aérea	Biomasa raíces	Necromasa	Biomasa total		
AQUIARES 1300 m	BO	23,7	5,0	2,8	31,5	68,5	244,8
	LC	11,6	2,9	2,0	16,4	83,6	107,0
	PC	3,8	1,0	1,3	6,1	93,9	163,1
ATIRRO 800 m	BO	57,9	11,5	5,5	74,8	25,2	278,7
	LC	13,7	3,3	1,4	18,5	81,5	103,3
	PC	7,6	2,1	2,5	12,1	87,9	92,5
JARDÍN BOTÁNICO CATIE 600 m	BO	53,1	9,8	2,3	65,3	34,7	291,7
	LC	29,1	6,3	2,2	37,5	62,5	129,3
	PC	24,4	5,5	2,1	31,9	68,1	131,7

PA: piso altitudinal; SUT: sistema de uso de la tierra; COS: carbono orgánico en el suelo; BO: bosque secundario; LC: sistema agroforestal laurel-café; PC: sistema agroforestal poró-café; %: porcentaje; Mg C ha⁻¹: toneladas de carbono por hectárea; (*) Incluye palmas para los bosques secundarios

El carbono almacenado en los bosques secundarios fue en promedio de 271,7 Mg C ha⁻¹ (69,2%), distribuidos en 124,8 Mg C ha⁻¹ (45,9%) de carbono en la biomasa aérea total, 113,1 Mg C ha⁻¹ (42,0%) de carbono orgánico en el suelo, 24,3 Mg C ha⁻¹ (8,9%) de carbono en biomasa de las raíces, 9,6 Mg C ha⁻¹ (3,5%) de carbono en la necromasa. Estos resultados fueron similares a lo encontrado en bosques primarios (ANACAFE 1998). Asimismo, los SAF con café almacenaron un promedio de carbono total de 121,1 Mg C ha⁻¹ (30,8%), distribuidos en 96,5 Mg C ha⁻¹ (79,7%) de carbono orgánico en el suelo, 18,2 Mg C ha⁻¹ (15,0%) de carbono en la biomasa aérea total, 4,2 Mg C ha⁻¹ (3,5%) de carbono en la biomasa de las raíces y 2,2 Mg C ha⁻¹ (1,8%) de carbono en la necromasa. Igualmente, los valores fueron concordantes con los reportados por ANACAFE (1998) y Winrock Internacional (1998).

En general, se encontraron diferencias en el carbono almacenado en la biomasa total y el carbono orgánico del suelo entre pisos altitudinales, pero estas diferencias no se mantuvieron en el carbono total almacenado, lo cual puede ser debido a que los sitios presentan diferencias biofísicas como topografía, orden de suelo, temperatura, precipitación etc. Sin embargo, se presentaron diferencias en el carbono almacenado en la biomasa total y el carbono orgánico del suelo entre los sistemas de uso de la tierra y dichas diferencias se mantuvieron en el carbono total almacenado, lo cual se debe a la presencia de árboles remanentes y diferencia en edad de los bosques secundarios con respecto a los SAF.

4.2 Composición fisionómica de la vegetación entre los pisos altitudinales y entre los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT

Las formulas obtenidas en los bosques secundarios y los SAF con café, presentaron diferencias en su composición y estructura (Cuadro 6).

Cuadro 6. Formulas fisionómicas de la vegetación de los SAF con Café y bosques secundarios estudiados en el CBVCT

SITIO/PA	SUT	PARCELA	FORMULA FISIONÓMICA DE LA VEGETACIÓN
AQUIARES 1300 m	BO	AQBO1	V7rdp, V6hdg, V5hdm, V4hsg, V3isp, V2rsm, V1hsp; L1-5c; T1-5r; E1-4i; P1-3r.
		AQBO2	V7rdp, V6cdp, V5cdm, V4hsm, V3csg, V2rsm, V1hsp; L1-5c; T1-5r; E1-4i; P1-3r.
		AQLC2	V6idm, V3cdm, V1hdm; G1r; L1-3h; T1-3h.
	PC	AQPC1	V4isg, V3cdm, V1hdm; G1r; L1-3h; T1-3h.
AQPC2		V4isg, V3cdm, V1hdm; G1r; L1-3h; T1-3h.	
ATIRRO 800 m	BO	ATBO1	V8edp, V7hdp, V6idg, V5hdm, V4hdg, V3hdm, V2hdm, V1rdp; H1-7e; L1-7e; T1-4e; E1-7e; P1-3e.
		ATBO2	V8edm, V7hdp, V6hdg, V5idm, V4idm, V3rsg, V2rsp, V1rsp; H1-7h; L1-7i; T1-4r; E1-7h; P1-4h.
	LC	ATLC1	V6hdm, V5hdm, V3cdm, V1hdm; G1r; L1. 3h; T1-3h.
		ATLC2	V6idm, V4cdm, V1hsm; G1r; L1-3h; T1-3h.
	PC	ATPC1	V4isg, V3cdm, V1hdm; G1r; L1-3h; T1-3h.
		ATPC2	V4isg, V3cdm, V1hdm; G1r; L1-3h; T1-3h.
JARDÍN BOTÁNICO 600 m	BO	JBBO1	V7rsp, V6cdm, V5idg, V4idm, V3rdm, V1rdp; G1r; H1-7r; L1-3r; T1-4r; E2-5h; P1-3e.
		JBBO2	V7rsm, V6cdp, V5cdm, V4idm, V3hdg, V1hdp; G1r; H1-7r; L1-3r; T1-4r; E2-5h; P1-3e.
	LC	JBLC1	V7hdm, V6hdm, V4idm, V3rdm, V1hsm; G1i; H2r; L1-6c; T1-3h; E2-3e.
		JBLC2	V6idm, V4rdm, V3idm, V1hsm; G1i; H2r; L1-6c; T1-3h; E2-3e.
	PC	JBPC1	V5isg, V4idm, V3hdm, V1hdm; G1r; H3e; L1-3i; T3r; E2-3r.
		JBPC2	V5isg, V4idm, V3rdm; V1hdm; G1r; H3e; L1-3i; T1-4e; E2-3r.

BO: bosque secundario; LC: sistema agroforestal laurel-café; PC: sistema agroforestal poró-café

Se encontró que el bosque secundario del PA medio 800 m y los SAF con café del PA inferior 600 m, presentaron mayor composición y estructura que sus similares en los otros sitios, los cuales tienen más estratos.

De acuerdo con el análisis de correlación de Pearson, las variables fisionómicas que presentaron mayor correlación con el carbono almacenado en la biomasa total fueron: número de estratos, altura del dosel, porcentaje% de cobertura y área basal (0,76; 0,74; 0,73 y 0,71, respectivamente). La distribución porcentual que presentó la composición fisionómica de la vegetación (CFV) de mayor correlación con carbono almacenado en la biomasa total fue: (20-30-30-20 %) (Cuadros 7).

Cuadro 7. Coeficiente de correlación de Pearson, carbono almacenado en la biomasa total, variables fisionómicas de la vegetación y distribuciones porcentuales de la composición fisionómica de la vegetación en los SAF con Café y los bosques secundarios estudiados en el CBVCT, (n = 18).

Coeficiente de correlación de Pearson						
Variables fisionómicas de la vegetación						
CABt	Área basal	% de Cobertura	Número de Estratos	Altura del dosel	Consistencia de Hojas	Tamaño de Hojas
	0.71*	0.73*	0.76*	0.74*	0.26NS	0.52NS
CFV / Distribución porcentual (%)						
CABt	10-30-30-30	20-30-30-20	10-40-40-10	20-20-30-30		
	0.82*	0.86*	0.82*	0.85*		

CABt: carbono almacenado en la biomasa total; CFV: composición fisionómica de la vegetación; * Significativo $P < 0.05$; NS: no significativo

La distribución porcentual de las variables fisionómicas seleccionadas para la estimación de la CFV en las PTM fue: área basal, porcentaje de cobertura, número de estratos y altura del dosel (20-30-30-20%, respectivamente) por ser la de mayor correlación con el CABt, éstas mostraron un área basal promedio de 18,6 m² (3,42 - 51,8 m²); porcentaje de cobertura promedio de 36,8 % (30,0 - 55,8 %); número de estratos 5 (3 - 8); altura del dosel 17,3 m (3,5 - 35 m); en la CFV se encontró un promedio de 46% (24 - 79%) (Anexo 4).

Se encontraron diferencias significativas ($p = 0,0300$) entre la composición fisionómica de la vegetación (CFV) de los PA estudiados inferior 600, medio 800 y superior 1300 m (52; 45 y 40 %, respectivamente). Asimismo, se detectaron diferencias estadísticas ($p < 0,0001$) entre los SUT estudiados, bosques secundarios y SAF laurel-café y poró-café (69; 36 y 32, respectivamente) (Figura 9).

La CFV de las PTM fue en promedio de 46 % con una variabilidad entre 23 y 72 %. El PA inferior 600 m y el SUT bosque secundario presentaron los más altos porcentaje de CFV (52 y 69 %, respectivamente). La CFV de las PTM del PA inferior 600 m, presenta diferencias estadísticas con relación a las PTM del PA superior 1300 m. En cambio, no presenta diferencias con relación a las PTM del PA medio 800 m.

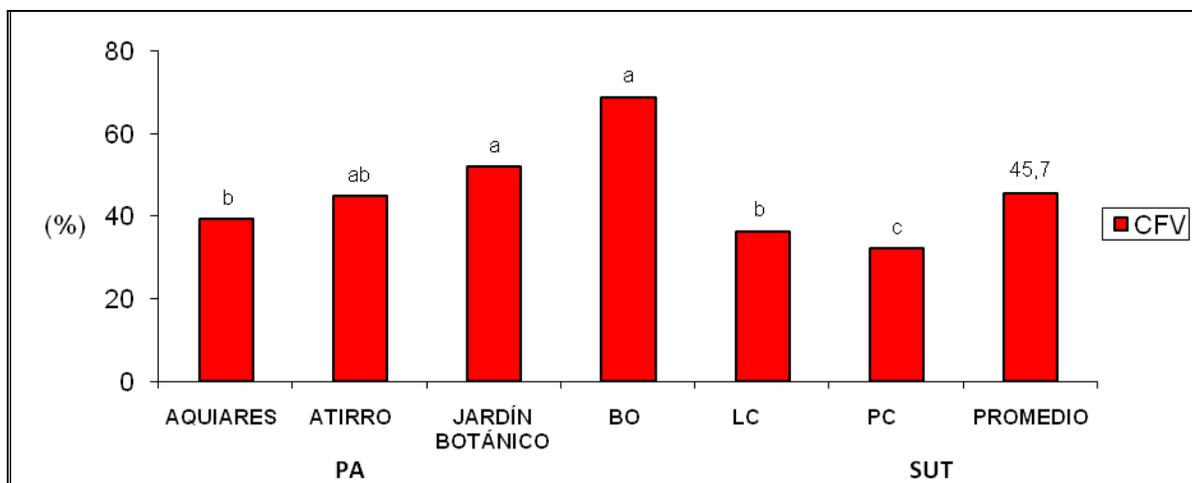


Figura 9. Composición fisionómica de la vegetación en los pisos altitudinales y los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT

CFV: composición fisionómica de la vegetación PA: piso altitudinal; SUT: sistema de uso de la tierra BO: bosque secundario; LC: sistema agroforestal laurel-café; PC: sistema agroforestal poró-café. Barras con letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$).

En la literatura consultada no se consiguieron estudios en donde se describa cuantitativamente la composición fisionómica de la vegetación. Se espera que esta técnica de estimar la composición fisionómica de la vegetación sea de utilidad para describir la estructura de sistemas de uso de la tierra y en especial para los ecosistemas forestales complejos.

4.3 Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación los sistemas de uso de la tierra estudiados en el CBVCT

Se encontró una alta correlación de las CFV estimadas de cuatro distribuciones porcentuales de variables fisionómicas con el CABt ($r = 0,91$) ($P < 0,05$). La composición fisionómica de la vegetación con distribución porcentual (20-30-30-20%), presentó la mayor correlación ($r = 0,92$) con el carbono almacenado en la biomasa total (Cuadro 8).

Cuadro 8. Coeficiente de correlación de Pearson, carbono almacenado en la biomasa total y las distribuciones porcentuales de la composición fisionómica de la vegetación de los SAF con Café y los bosques secundarios estudiados en el CBVCT ($n = 9$)

Variable	Coeficiente de correlación de Pearson			
	Distribuciones porcentuales de la CFV (%)			
	10-30-30-30	20-30-30-20	10-40-40-10	20-20-30-30
CABt	0.90*	0.92*	0.90*	0.91*

CABt: carbono almacenado en la biomasa total; CFV: composición fisionómica de la vegetación * significativo $P < 0.05$

La composición fisionómica de la vegetación de los SUT estudiados, presentó un promedio de 46% (24 - 79%). El carbono almacenado en la biomasa total presentó un promedio de 69,4 Mg C ha⁻¹ (10 - 208,6 Mg Cha⁻¹) (Figura 10).

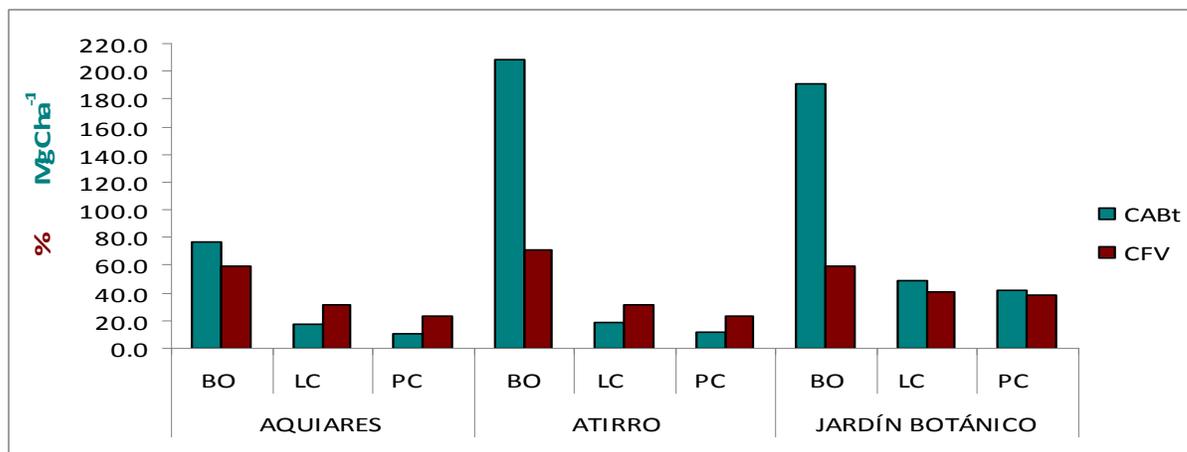
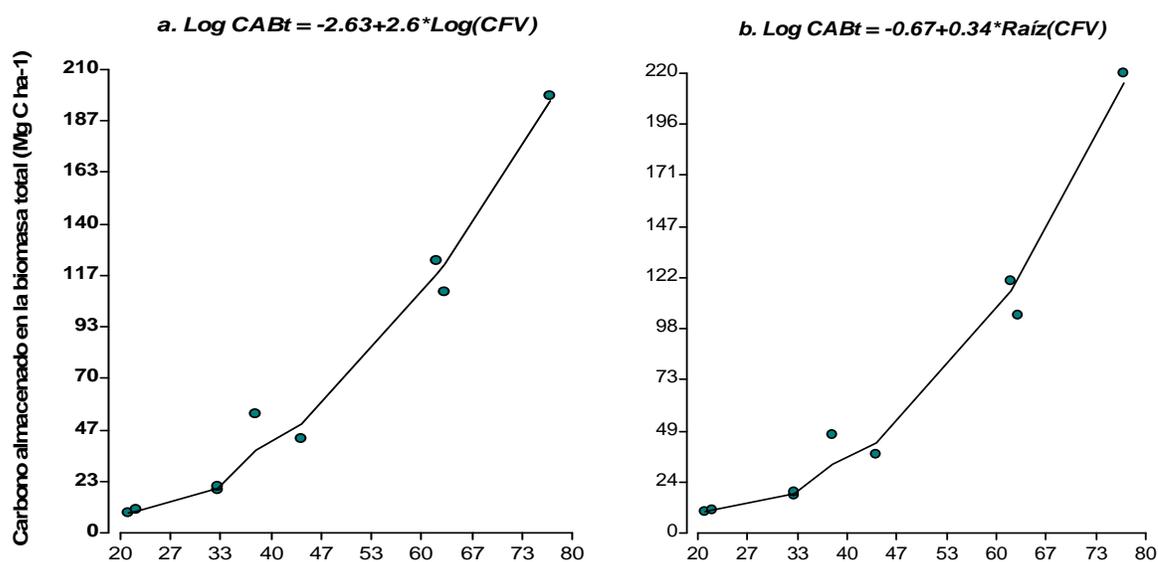


Figura 10. Carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómicos de la vegetación en los SAF con café y bosques secundarios estudiados en el CBVCT

CABt: carbono almacenado en la biomasa total; CFV: composición fisionómica de la vegetación; PA: piso altitudinal; SUT: sistema de uso de la tierra BO: bosque secundario; LC: sistema agroforestal laurel-café; PC: sistema agroforestal poró-café

Se encontró una relación significativa entre carbono total almacenado en la biomasa y la composición fisionómica de la vegetación de los SAF con Café y los bosques secundarios estudiados en el CBVCT. Esto indica que se podría emplear la composición fisionómica de la vegetación para estimar carbono total almacenado en la biomasa (Figura 11a, 11b, 11c y 11d).



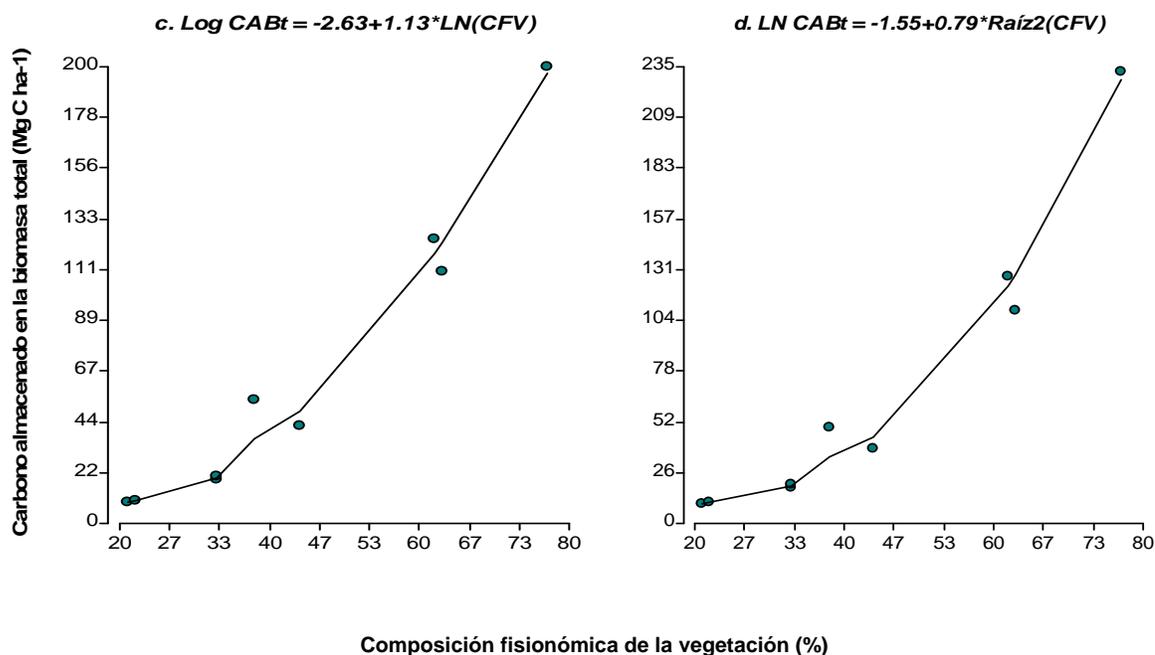


Figura 11. Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total estimado con los modelos de mejor ajuste y la composición fisionómica de la vegetación de los SAF con Café y los bosques secundarios estudiados en el CBVCT

Los modelos de regresión probados para estimar el carbono almacenado en la biomasa total a partir de la variable independiente CFV, presentaron valores de R^2 -ajustados mayores a 0,72. Los modelos de mejor ajuste son de una entrada y de tipos Log-Log, Log-Raíz², Log-LN y LN-Raíz², los cuales presentaron bajos PRESS y RCME y el más alto R^2 -ajust (Modelos a, b, c y d), tanto los parámetros como los modelos fueron significativos ($P < 0,05$) (Cuadro 9, Anexo 5).

Cuadro 9. Modelos de mejor ajuste para estimar carbono almacenado en la biomasa total en los SAF con Café y bosques secundarios estudiados en el CBVCT

Modelo	Ecuación	RCME	R^2 -ajust	PRESS
a	$Log(CABt) = -2,63 + 2,6 * Log(CFV)$	0,01	0,95	0,02
b	$Log(CABt) = -0,67 + 0,34 * Raíz^2(CFV)$	0,01	0,96	0,02
c	$Log(CABt) = -2,63 + 1,13 * LN(CFV)$	0,01	0,95	0,02
d	$LN(CABt) = -1,55 + 0,79 * Raíz^2(CFV)$	0,05	0,96	0,09

CABt: carbono almacenado en la biomasa total ($Mg\ C\ ha^{-1}$); CFV: composición fisionómica de la vegetación (%); R^2 -ajust.: coeficiente de determinación ajustado; RCME: raíz del cuadrado medio del error; PRESS: suma de los cuadrados de los residuos; Log: logaritmo base 10; LN: logaritmo natural; Raíz²: raíz cuadrada; a y b: parámetros del modelo

Al comparar el CABt estimado en función de la CFV (Modelos a, b, c y d) y el CABt estimado en función de la biomasa (Ec. 16), la nube de puntos conformada por los valores estimados en función de la CFV, se alinea a lo largo de la recta conformada por los valores estimados en función de la biomasa, lo cual indica que los dos estimados son similares (Figuras 12a, 12b, 12c y 12d).

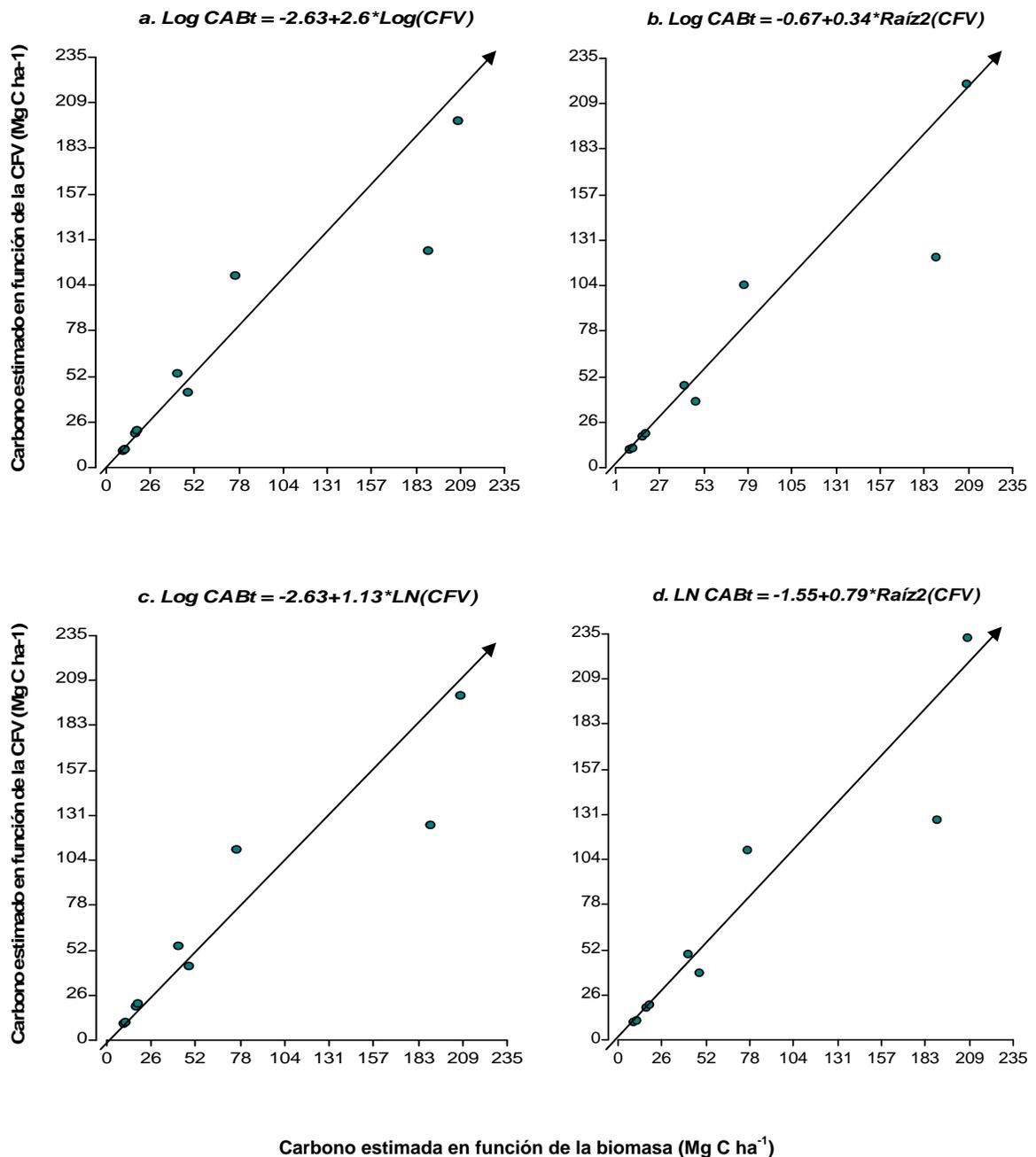


Figura 12. Comparación de los modelos de mejor ajuste en la estimación del carbono almacenado en la biomasa total en los SAF con Café y los bosques secundarios estudiados en el CBVCT

Los modelos seleccionados pueden estimar el carbono almacenado en la biomasa total de los SAF con Café y los bosques secundarios en función de la CFV, debido a que mostraron muy buena tendencia y similitud con respecto al CABt estimado en función de la biomasa total. Además, tiene como ventajas que es un método de bajo costo, las variables fisionómicas son fáciles obtener en el campo y su cálculo es simple y, estos tipos de ecuaciones son de una entrada; por lo tanto, se considera que estos modelos tienen un alto poder explicativo de los datos ($R^2 = 0,96$). Una debilidad de estos modelos es que subestiman y/o sobrestiman el CABt en ecosistemas que presentan árboles remanentes, los cuales normalmente presentan grandes diferencias en área basal con relación al resto de individuos.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se encontraron diferencias significativas en el carbono almacenado en la biomasa total entre los pisos altitudinales y entre los sistemas de uso de la tierra estudiados.

El PA inferior 600 m y el SUT bosque secundario, reportaron el mayor almacenamiento de carbono en la biomasa total (93,7 y 158,7 Mg C ha⁻¹, respectivamente).

La disminución en altitud, tuvo un efecto positivo en el almacenamiento de carbono en la biomasa total de los SUT estudiados en el CBVCT.

Se presentaron diferencias significativas en el carbono almacenado en el suelo entre los pisos altitudinales y entre los sistemas de uso de la tierra estudiados.

El PA superior 1300 m y el SUT bosque secundario, reportaron el mayor almacenamiento de carbono orgánico en el suelo (136,7 y 113,1 Mg C ha⁻¹, respectivamente).

El incremento en altitud tuvo un efecto positivo en el carbono orgánico en el suelo de los SUT estudiados en el CBVCT.

Se encontraron diferencias significativas en el carbono total almacenado entre los SUT estudiados. En contraste, no se presentaron diferencias significativas entre los PA tenidos en cuenta en el estudio.

El bosque secundario fue el SUT que presentó el mayor almacenamiento de carbono total (271,7 Mg C ha⁻¹).

El suelo a los 30 cm superficiales fue el mayor reservorio de carbono en los SUT estudiados (102,0 Mg C ha⁻¹).

La variación en altitud no tuvo efecto en el almacenamiento de carbono total en los SUT estudiados en el CBVCT.

Se presentaron diferencias en la composición fisionómica de la vegetación entre los PA y entre los SUT estudiados.

El PA inferior 600 m y el SUT bosque secundario, reportaron los mas altos porcentajes de composición fisionómica de la vegetación (52 y 69 %, respectivamente).

La disminución en altitud, tuvo un efecto positivo en la composición fisionómica de la vegetación de los SUT estudiados en el CBVCT.

La disminución de la altitud presento el mismo efecto en el CABt y la CFV

Se encontró una relación significativa entre carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación de los SUT estudiados en el CBVCT.

Los modelos propuestos pueden estimar el carbono almacenado en la biomasa total de los SAF con Café y los bosques secundarios estudiados en función del CFV.

Los modelos desarrollados en esta investigación, deben ser utilizados solamente para los SUT estudiados con una CFV entre 23 y 72, ya que si se sale de este rango se podría incurrir en estimaciones erróneas.

En futuras estimaciones de carbono almacenado en la biomasa total, para sistemas de usos de la tierra estudiados y en estos pisos altitudinales del CBVCT, se recomienda utilizar los modelos desarrollados en esta investigación, los cuales están en función de la composición fisionómica de la vegetación, pues contiene variables que son de fácil medición, de bajo costo y permiten la estimación rápida de existencias de carbono en ecosistemas estructuralmente complejos. Adicionalmente, los inventarios forestales cuentan con parte de esta información.

Es importante enfatizar que cada tipo de SUT tiene su producción de CABt y su CFV que lo diferencia de los demás; por lo que, se debe tener precaución al utilizar ecuaciones para estimar CABt que son construidas en otro tipo de ecosistemas.

Utilizar la composición fisionómica de la vegetación como una herramienta útil para estimar el carbono almacenado en la biomasa total, en sistemas de usos de la tierra semejantes y/o diferentes a los considerados en este estudio, con la finalidad de determinar su efectividad y precisión en los mismos.

Realizar estudios con la aplicación de esta metodología en sistemas de usos de la tierra de la misma edad, ubicados en un rango altitudinal más amplio y que presenten más órdenes de suelo que los considerados en este estudio.

Teniendo en cuenta que en este estudio, los SAF con café fueron los sistemas que reportaron el menor almacenamiento de carbono, se recomienda hacer uso de la Forestería Análoga como una estrategia para incrementar su captura.

6. LITERATURA CITADA

- Albrecht, A; Kandji, S.T. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99 (1-3): 15-27.
- Alfaro, M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en ecosistemas forestales. CATIE. Serie Técnica. Informe técnico No. 19. Turrialba, Costa Rica. p 9-12.
- ANACAFE. 1998. Cuantificación estimada del dióxido de carbono fijado por el agrosistema café en Guatemala. 9º. Congreso de Caficultura Nacional. 24 y 25 de agosto 1998. 16 p.
- Andrade, HJ. 2007. Growth and inter-specific interactions in young silvopastoral systems with native timber trees in the dry tropics of Costa Rica. Tesis PhD. Turrialba, Costa Rica. CATIE-University. 250 p.
- Andrade, H.J; Ibrahim, M. 2003. Como monitorear el secuestro de carbono en sistemas silvopastoriles. *Agroforestería en las Américas* 10(39-40): 109-116.
- Andrade, H.J; Segura, M; Somarriba, E; Villalobos, M. En preparación. Biomass equations to estimate aboveground biomass of woody components in indigenous agroforestry systems with cacao.
- Andrasko, K. 1990. El recalentamiento del globo terráqueo y los bosques: estado actual de los conocimientos. *UNASYLVA* 41 (163): 3-9.
- Arreaga, W. 2002. Almacenamiento del carbono en bosques con manejo forestal sostenible en la Reserva de Biosfera Maya, Petén, Guatemala. Escuela de postgrado, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Asumadu, K. 1998. Boletín de la Organización Internacional de las Maderas Tropicales. Canberra, Australia 6 (4): 28-32.
- Asumadu, K. 1999. El comercio del derecho de emisión: una nueva oportunidad para países productores de maderas tropicales. *Actualidad Forestal Tropical* 6 (4): 1-4.
- Ávila, G. 2000. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. 99 p.
- Balesdent, J. 1996. Un point sur l'évolution des reserves organiques des sols de France. *Etude et Gestion des Sols* 3 (4): 245-260.
- Balesdent, J; Arrouays, D.; Gaillard, J. 2000. MORGANE : un modèle de simulation des reserves organiques des sols et de la dynamique du carbone des sols. Submitted to *Agronomie*.
- Batjes, N.H; Sombroek, W.G. 1997: Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. *Global Change Biology* 3 (2): 161-173.
- Battle, M. 2000. Global carbon sinks and their variability inferred from atmospheric O₂ and ¹³C, *Science* 287: 2467-2470.
- Beard, J.B. 1973. *Turfgrass: Science and Culture*. Regents/Prentice Hall, New Jersey. 658 p.
- Beaumont, R.E. 1999. El Protocolo de Kyoto y el mecanismo para un desarrollo limpio: nuevas posibilidades para el sector forestal de América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. Oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe. 99 p.
- Beer, J; Muschler, R; Kass, D; Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38:139-164.
- Begon, M; Harper, J; Townsend, C.R. 1996. *Ecology: individuals, populations and communities*. Oxford, Blackwell scientific publications. 876 p.

- Brenes, G; Wesselman, S; Solano F; McHugh A; Segura, S; y Retana. G. 1999. "Diagnóstico del Sistema Socio-ambiental que caracteriza a las Regiones de Turrialba y Jiménez Provincia de Cartago, Costa Rica".
- Brown, K. 1994. Economic and political feasibility of international carbon offsets. *Forest Ecology and Management* 68: 217-229.
- Brown, S. 1986. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. FAO Forestry Paper 134. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Croat, T.R., 1978. Flora of Barro Colorado Island. Stanford University Press, Stanford, CA.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. Department of Natural Resources and Environmental Sciences. University of Illinois, Urbana, Illinois, USA.
- Brown, S; Gillespie, A.J.R.; Lugo, A.E. 1989. Biomass Estimation Methods for Tropical Forests with Applications to Forest Inventory Data. *Forest Science* 4 (35): 881-902.
- Brown, S.; Lugo, A. E. 1982. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica*. 14 (3).
- Brown, S; Lugo, A.E; Iverson, L.R. 1992. Processes and lands for sequestering carbon in the tropical forest landscapes. In Wisniewski J. y Lugo A.E. (eds.), 1992. Natural sinks of CO₂. *Water, air and soil pollution* 64: 139-155.
- Budowski, B. 1999. Secuestro de carbono y gestión forestal en América Tropical. *Bosque y desarrollo* 20 (21) 17-20.
- Cambardella, C.A; Elliot, E.T. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal* 56: 777-783.
- Canadell, J.G; Money. H.A; Baldocchi. D.D. Berry. J.A; Ehleringer. J.R; Field. C.B; Gower. S. T; Hollinger. D.Y; Hunt. J.E; Jackson. R.B; Running. S.W; Shaver. G.R; Steffen. W; Trombore. S.E; Valentini.R; Bound. B.Y. 2000. Carbon metabolism of the terrestrial biophere: a multi-technique approach for improved understanding. *Ecosystems* 3: 115-130.
- Canet, L. 2003. Ficha técnica del Corredor Biológico Turrialba – Jiménez. San José, Costa Rica. 75 p.
- Canfield, R. 1941. Application of the line interception method in sampling range vegetation. *J. Forest. (Washington)* 39: 388-394.
- Cavazos, T; Rodríguez, O. 1992. Manual de prácticas de física de suelos. Trillas, México.
- Centeno, J. 1992. El Efecto Invernadero. *PLANIUC* 18 (19): 75-96.
- Cerri, C; Volkoff, B; Andreaux, F. 1991. Nature and behavior of organic matter in soils under natural forest, and after deforestation, burning and cultivation, near Manaus. *Forest Ecology and Management* 38: 247-257.
- Ciesla, W. M. 1995. Climate change, Forest and Forest management. An overview. FAO (Italia). *Forestry papers* no. 126. 128 p.
- Ciesla, W. M; 1996. Cambio Climático, Bosques y Ordenación Forestal: Una visión de conjunto. *Estudios*. FAO. Roma, Italia 147 p.
- Cubero, J; Rojas, S. 1999. Fijación en plantaciones de Melina (*Gmelina arborea Roxb*), teca (*Teutona grandis L.f*) y pachote (*Bombacopsis quinata Jacq*) en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Tesis Lc. Cs. For. Concentración de Manejo Forestal. Heredia, Costa Rica. Universidad Nacional. 95 p.
- DeClerck, FAJ; Vaast, P; Soto-Pinto, L; Sinclair, FL. 2007. Multistrata coffee agroforests, biodiversity conservation and coffee productivity: what do we know? *In: International symposium: Multistrata agroforestry systems with perennial crops.* (2,

- 2007, Turrialba, CR). Making ecosystem services count for farmers, consumers and the environment. IUFRO, CIRAD, WAC, BANGOR UNIVERSITY, CATIE. 1 disco compacto, 8 mm.
- Dixon, K. 1995. Sistemas agroforestales y gases de invernadero. *Agroforestería en las Américas* 2 (7): 22-26.
- Donald, P.F. 2004. Biodiversity impacts of some agricultural commodity production systems. *Conservation Biology* 18(1):17-37.
- Duncan, P; Jurgen, B; Bruening, F; Burguess, P; Cabarde, B; Cassells, D; Douglas, J; Gilmour, D; Hardcastle, P; Hartshorn, G; Kaimowitz, D; Kishor, N; Leslie, A; Palmer, J; Puutz, F; Salleh, N; Sizer, N; Synott, T; Wadsworth, F; Whitmore, T. 1999. No habrá bosques sin manejo: sustentación de ecosistemas forestales bajo condiciones inciertas. *Actualidad Forestal Tropical* 6 (4): 10-12.
- Elleberg, H; Mueller-Dombois, D. 1967. A key to Raunkiaer plant life forms with revised subdivisions. *Veroff. Geobot. Inst. Rübel Zürich* 37: 56-73.
- Ellert, B. 1999. Measuring and Comparing Soil Carbon.
- FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2000. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂. *Informes sobre recursos mundiales de suelos Roma*. no. 88: 98 p.
- FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2006. La evaluación del almacenamiento del carbono en el suelo y los principales cambios. UN Food and Agriculture Organization [www.fao.org/docrep/005/Y2779S/ y2779s06.htm](http://www.fao.org/docrep/005/Y2779S/y2779s06.htm) (15/02/2008).
- Fernández, W. 1991. Cambios Climáticos: El calentamiento global. *Tecnología en Marcha* 11(2): 11-22.
- Finegan, B. 1997. Bases ecológicas: los ambientes tropicales y el ajuste de los organismos. Turrialba, Costa Rica. CATIE.
- Finegan, B; Delgado, D. 1997. Ciclos y flujos de materia y energía: Ecosistema, océano y atmósfera. *Bases Ecológicas*. Turrialba, Costa Rica. CATIE. p. 11-15.
- Fischer, M.J; Rao, I.M; Ayarza, C.E; Saenz, J.I; Thomas, R.J; Vera, R.R. 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 31: 236-238.
- Fischer, M.J; Trujillo, W. 1999. Fijación de carbono en pastos tropicales en sabanas de suelos ácidos neotropicales. In *Seminario Internacional Intensificación de la Ganadería Centroamericana: Beneficios Económicos y Ambientales*. (1999) Turrialba, Costa Rica; FAO –CATIE, SIDE. p. 115-135.
- Foley, J. 2005. Global consequences of land use, *Science* 309: 570-573
- FURARE, (Fundación Rainforest Rescue). 2006. *Forestería Análoga: principios e implementación en taller de la red internacional de forestería análoga*. CATIE- Costa Rica, 9-17 Febrero, 2007. 48 p.
- Fosberg, F.R. 1961. A classification of vegetation for general purposes. *Tropical Ecology* (2): 1-28.
- Fournier, L. 1996. Fijación de carbono y diversidad biológica en el agroecosistema cafetero. *Boletín PROMECAFE*. (IICA) 71: 7-13.
- ICAFE (Instituto del Café de Costa Rica). 2008. *Siete regiones de café* (En línea). Consultado el 7 de ene de 2008. Disponible en <http://www.icafe.go.cr>
- InfoStat. 2007. InfoStat versión 2007/p1. Grupo InfoStat. FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

- IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry (en línea). Disponible en <http://www.ipcc-nggip-iges.or.jp>
- IPCC. 2005. Panel Intergubernamental sobre cambio climático: La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Resumen para responsables de políticas. Informe del Grupo de trabajo III del IPCC. [Metz, B; Davidson, A; de Coninck, H; Loos, M; Meyer, L. (eds.)]. 66 p.
- IPCC. 2007. Panel Intergubernamental sobre cambio climático. Climate Change 2007: The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Alley, R; Berntsen, T; Bindoff, N; Chen, Z; Chidthaisong, A; Friedlingstein, P; Gregory, J. This Summary for Policymakers was formally approved at the 10th Session of Working Group I of the IPCC, Paris, February 2007. 18 p.
- Janssens, L. 2003. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO₂ emissions, *Science Express* 72: 124-128.
- Janzen, D. H. 1991. Historia natural de Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San Pedro.
- Jenkinson, D.S; Hart, PSB; Rayner, J.H; Pany, L.C. 1987. Modelling the turnover of organic matter in long-term experiments of Rothamsted. *Intecol. New York. Bulletin* 15: 18 p.
- Johnson, D.W. 1992. Effects of forest management on soil carbon storage. *Water Air Soil Pollut.* 64: 83-120.
- Joos, F. 1999. The variability in the carbon sink as reconstructed for the last 1000 years, *Geophysical Research Letters* 26: 1437-1440.
- Joos, F. 2003. Trends in marine dissolved oxygen: implications for ocean circulation changes and the carbon budget, *EOS*. 197 p.
- Kanninen, M. 2001. Sistemas silvopastoriles y almacenamiento de carbono: Potencial para América Latina. En conferencia electrónica en potencialidades de los sistemas silvopastoriles para la generación de servicios ambientales. LEAD-CATIE.
- Kaufmann, R. 2004. The effect of growing season and summer greenness on northern forests, *Geophysical Research Letters* 31: 346-351.
- Keeling, R.F. 1996. Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmosphere O₂ concentration, *Nature* 381: 218-221.
- Kraenzel, M; Castillo, A; Moore, T; Potvin, C. 2003. Carbon storage of harvest-age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panama. *For. Ecol. Manage* 173: 213-225.
- Kursten, E; Bursshel, P. 1993. CO₂-mitigation by agroforestry. *Water, Air and Soil. Pollution* 70: 533-544.
- Kyrkund, B. 1990. Como pueden contribuir los bosques y las industrias forestales a reducir el exceso de anhídrido carbónico en la atmósfera. *Unasyuva* 41 (163): 2-15.
- Likens, G.E; Bormann, F.H. 1970. Chemical analyses of plant tissues from the Hubbard Brook ecosystem in New Hampshire. *Yale University School of Forestry Bulletin* 79: 25 p.
- López, A.; Schlönvoigt, A; Ibrahim, M; Kleinn, C; Kanninen, M. 1999. Cuantificación del carbono almacenado en el suelo de un sistema silvopastoril en la zona Atlántica de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 6 (23) 51-53.
- MacDicken, K. 1997. A guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects. Arlington, VA: Winrock International Institute for Agricultural Development. 43 p.

- MARENA, (Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales). 1995. Technical summary, The Science of Climate Change, Climate Change 43 p.
- Márquez, L. 2000. Elementos Técnicos Para Inventarios de Carbono en Uso del Suelo. PROARCA – CAPAS. Guatemala, Mayo de 2000.
- Mata Chinchilla, R. 2003. Principios generales sobre la pedología y taxonomía de suelos. Curso de certificadores de uso conforme LEY 7776. Puntarenas, Costa Rica. 108 p.
- Mena y Andrade. Desarrollada en este estudio. Ecuaciones alométricas para ramas de Poró *Erythrina poeppigiana*, en el Jardín Botánico Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza, CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Moguel, P; Toledo, VM. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. Conservation Biology 13(1):11-21.
- Montagnini, F; Porras, C. 1998. Evaluating the role of plantations as carbon sinks: an example of an integrative approach from the humid tropics. Environ. Manage. 22 (3): 459-470.
- Moraes, C. 2001. Almacenamiento de carbono en bosques secundarios en el municipio de San Carlos, Nicaragua. Escuela de postgrado, Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza, CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Mueller-Dombois, D.; Ellemer, H. 1974. Aims and methods of Ecology. Wiley & Sons. (Eds.): U.S.A. 547 p.
- Nekrásov, B. 1981. Química general cuarta edición , editorial Limusa "MIR" Moscú, URSS. 378 p.
- Nelson, B.W; Mesquita, R; Periera, J.L.G; Aquino de Souza, S.G; Batista, G.T; Couto, L.B. 1999. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. For. Ecol. Manage. 117: 149-167.
- Nepstad, D.C; Uhl, C; Serrao, E.A.S. 1991. Recuperation of a degraded Amazonian landscape: Forest recovery and agricultural restoration. Ambio 20: 248-255.
- Oades, J.M. 1988. The retention of organic matter in soils. Biogeochemistry 5: 35-70.
- Ochoa, G; Oballos. J; Sanchez. J; Sosa. J; Manrique. J; Velasquez. J. 2000. Variación del carbono orgánico en función de la altitud. Cuenca del Río Santo Domingo, Merida-Barinas, Venezuela. Rev. Geog. Venez. 41 (1). 71-87. of Wales. 224 p.
- Ordóñez, A. 1998. “Estimación de la Captura de Carbono en un Estudio de Caso para Bosque Templado: San Juan Nuevo, Michoacán”. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, Ciudad de México.
- Orrego, S.A; Del Valle, J.I; Moreno, F.H. 2003. Medición de la captura de carbono en ecosistemas tropicales de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 326 p.
- Pandey, D.N. 2002. Carbon sequestration in agroforestry systems. Climate Policy 2: 367-377.
- Parton, W.J.; Schimel D.S.; Cole C.V.; Ojima D.S. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. Soil Sci. Soc. Am. J. 51: 1173-1179.
- Perfecto, I; Rice, RA; Greenberg, R; Voort, ME Van der. 1996. Shade Coffee: a disappearing refuge for biodiversity. BioScience 46(8): 598-608.
- PNUD. 1997. Protocolo de Kyoto para la conservación Marco de las Naciones Unidas. Cambio Climático. p 2-4.
- Puget, P; Chenu, C; Balesdent, J; 1995. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. European Journal of Soil Science 46: 449-459.
- Raitsos, D. 2005. Extending the SeaWifs chlorophyll data set back 50 years in the northeast Atlantic, Geophysical Research Letters, L06603.

- Ramírez, P. 1997. Efecto invernadero guerra declarada. *Revista Forestal Centro Americana*. CATIE, Costa Rica 19: 41-42 p.
- Ramírez, O; Rodríguez, L, Finegan, B; Gómez, M. 1999. Implicaciones económicas del secuestro del CO₂ en los bosques naturales. *Revista Forestal Centroamericana* 2 (27): 10-16.
- Robert, M. 1996. *Le Sol: Interface Dans L'environnement, Ressource pour le Développement*. Dunod/Masson, Paris. 240 p.
- Robert, M. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos. FAO. Roma, IT. no. 96. 61 p.
- Rojas, O. 1987. Zonificación agroecológica para el cultivo del café (*Coffea arabica*) en Costa Rica. IICA, San Jose. 66 p.
- Sabine, C. 2004. The Oceanic sink for anthropogenic CO₂, *Science* 305: 367-371.
- Schimel. D.S; House. J.I; Bousquet. K.A; Ciais. P; Peylin. P; Braswell. B.H; Apps.B.J; Beker. D; Bondeau. A; Canadell. J; Churquina.G; Cramer. W; Denning. A.S; Field. C.B. 2001. Recent patterns and mechanisms of carbón of sxhange by terrestrial ecosystems. *Nature* 414: 169-172.
- Segura, M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costaricensis*, en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Tesis. Lic. For. Heredia, CR, UNA. 127 p.
- Segura, M. 1999. Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados en el área de conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. Tesis Mag Sc. CTIE, Turrialba. Costa Rica. 120 p.
- Segura, M. 2005. Estimación del carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Informe final de consultoría. 129 p.
- Segura, M; Andrade H. 2008. Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes. *Agroforestería en las Américas* 46: 89-96.
- Segura, M; Kanninen, M. 2005. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica* 37(1): 2-8.
- Segura, M; Kanninen, M; Suárez, D. 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems* 68:143-150.
- Senanayake, R. y J. Jack, 1998. Analog forestry: an introduction. Monash University Publications, Monash University, Clayton, Victoria, Australia. p 30-32.
- Smith, T.M; Cramer, W.P; Dixon, R.K; Leemans, R; Neilson R.P; Solomon, A.M. 1993. The Global Terrestrial Carbon Cycle. *Water, Air and Soil Pollution* 70, p. 3-15.
- Somarriba, E; Harvey, C.A; Samper, M; Anthony, F; González, J; Staver, C; Rice, R.A. 2004. Biodiversity conservation in neotropical coffee (*Coffea arabica*) plantations. *In: Schroth, G; da Fonseca, GAB; Harvey CA; Gascon, C; Vasconcelos, HL; Izac, AMN. eds. Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes*. Washington, DC. Island Press. p. 198-226.
- Stella, R. 1999. La agrosilvicultura en Argentina: alternativa de manejo forestal. *Bosques y Desarrollo* 20-21: 91-94.
- Theng, B.K.G; Tate, K.R; Sollins, P. 1989. Constituents of organic matter in temperate and tropical soils. *In: Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems*. Coleman, DC.; Oades JM. And Uehara, G. (eds.). Niftal Project. Manoa, Hawai. p 5-31.

- Tiessen, H; Stewart, J.W.B; Cole, C.V. 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Science Society of America Journal* 48: 853-858.
- Tirado, C. 1997. Estudio florístico de una comunidad andina escandente. Trabajo especial de Grado de Licenciatura, Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. 175 p.
- Vitousek, P.M. 1994. Beyond global warming ecology and global change. *Ecology* 75 (7): 1861-1876.
- Whittaker, R.H; Likens, G.E. 1973. Carbon in the biota In: Woodwell, G.M., Pecan, E.V. (Eds.), *Carbon in the Biosphere, Proceedings of the 24th Brookhaven Symposium in Biology*. United States Atomic Energy Commission, Upton, New York, p. 281-302.
- Winrock Internacional. 1998. Carbon secuestration and sustainable *coffea* in Guatemala. Arlington. 18 p.
- Yépez, C. 2001. Selección de árboles para sombra en cafetales diversificados de Chiapas. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 88 p.

7. ANEXOS

ANEXO 1. FORMULARIO PARA LA SELECCION DE PISOS ALTITUDINALES Y SISTEMAS DE USO DE LA TIERRA EN EL CBVCT

DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE EVALUACIÓN	
Nombre de la finca o lote:	
Propietario:	
Fecha:	
1. DESCRIPCIÓN DEL SITIO	
Nombre del sitio:	
Coordenadas geográficas:	
Datos climáticos (temperatura, precipitación, otros):	
Altitud (m):	
Topografía:	
2. INFORMACIÓN DEL SUELO	
Orden de suelo:	Andisol <input type="checkbox"/> Inseptisol <input type="checkbox"/> Ultisol <input type="checkbox"/> Otros <input type="checkbox"/>
Pendiente (%):	
Textura del suelo:	
Presencia de erosión:	Severa <input type="checkbox"/> Mediana <input type="checkbox"/> Ligera <input type="checkbox"/>
3. INFORMACION DEL SISTEMA	
Sistema de cultivos:	Rotaciones <input type="checkbox"/> Cultivos de cobertura <input type="checkbox"/> otro <input type="checkbox"/>
Sistemas forestales y agroforestales:	
Bosques Nativos:	Primario <input type="checkbox"/> Secundario <input type="checkbox"/>
Plantaciones:	Monocultivo <input type="checkbox"/> Policultivo <input type="checkbox"/>
Agroforestería:	Silvoagropecuaria <input type="checkbox"/> Silvopastoril <input type="checkbox"/> Agrosilvopastoril <input type="checkbox"/>
Fertilización:	Orgánica <input type="checkbox"/> Inorgánica <input type="checkbox"/>
Especies de sombra:	Poró <input type="checkbox"/> Laurel <input type="checkbox"/> Cedro <input type="checkbox"/> Musáceas <input type="checkbox"/> Otra <input type="checkbox"/>
Cultivo	Café <input type="checkbox"/> Otro <input type="checkbox"/>
Variedad	Caturra <input type="checkbox"/>
Distancia de siembra (m)	1 * 0,50 <input type="checkbox"/> 1 * 0,80 <input type="checkbox"/> 1 * 1 <input type="checkbox"/> 1 * 1,20 <input type="checkbox"/> Otro <input type="checkbox"/>
Área de la parcela (ha)	
Edad del sistema (años)	
4. HISTORIA DE MANEJO EN EL PASADO	
Sistema de cultivos	Rotaciones <input type="checkbox"/> Cultivos de cobertura <input type="checkbox"/> otro <input type="checkbox"/>
Sistemas forestales y agroforestales	
Bosques Nativos	Primario <input type="checkbox"/> Secundario <input type="checkbox"/>
Plantaciones	Monocultivo <input type="checkbox"/> Policultivo <input type="checkbox"/>
Agroforestería	Silvoagropecuaria <input type="checkbox"/> Silvopastoril <input type="checkbox"/> Agrosilvopastoril <input type="checkbox"/>
Fertilización	Orgánica <input type="checkbox"/> Inorgánica <input type="checkbox"/>
Labranzas	Mecánica <input type="checkbox"/> Manual <input type="checkbox"/>
5. EVENTOS INUSUALES	
Inundaciones <input type="checkbox"/> derrumbes <input type="checkbox"/> fuego <input type="checkbox"/> nivelaciones de terrenos <input type="checkbox"/>	

USDA (modificado por Fundación Rainforest Rescue, 2006)

ANEXO 2

LABORATORIO DE SUELOS CATIE

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS Y MATERIAL BEGETAL

DENSIDAD APARENTE Y % DE CARBONO CONTENIDO EN EL SUELO, VEGETACIÓN HERBACEA Y HOJARASCA

VEGETACIÓN HERBACEA						HOJARASCA						SUELO					
No.	No.	Cod	C	P seco	P fresco	No.	No.	Cod	C	P seco	P fresco	No.	Cod	No.	Prof.	D.A	C.O.
Lab.	Ident.		%	g	g	Lab.	Ident.		%	gramos	gramos	Lab.		Ident.	(cm)	g/cc	%
LS08-88	AQBO1	V1	41,71	139,27	519,87	LS08-294	AQ BO 1	H1	45,52	174,24	268,00	LS08-58	S1	AQBO1	30	0,79	6,93
LS08-89	AQBO2	V2	42,76	107,94	477,23	LS08-295	AQ BO 2	H2	45,43	163,31	259,73	LS08-59	S2	AQBO2	30	0,77	7,42
LS08-90	AQLC1	V3	41,51	70,90	298,00	LS08-296	AQ LC 1	H3	48,59	192,44	204,99	LS08-50	S3	AQLC1	30	0,64	6,15
LS08-91	AQLC2	V4	37,69	76,20	390,70	LS08-297	AQ LC 2	H4	48,44	255,97	278,81	LS08-51	S4	AQLC2	30	0,62	4,04
LS08-92	AQPC1	V5	43,19	68,03	173,25	LS08-298	AQ PC 1	H5	48,67	241,90	260,37	LS08-44	S5	AQPC1	30	0,43	11,31
LS08-93	AQPC2	V6	40,78	69,38	171,56	LS08-299	AQ PC 2	H6	48,41	324,87	350,35	LS08-45	S6	AQPC2	30	0,42	12,74
LS08-94	ATBO1	V7	41,23	128,33	315,43	LS08-300	AT BO 1	H7	46,01	313,41	486,92	LS08-56	S7	ATBO1	30	0,75	3,26
LS08-95	ATBO2	V8	40,66	131,26	226,40	LS08-301	AT BO 2	H8	48,08	215,53	282,17	LS08-57	S8	ATBO2	30	0,69	3,23
LS08-96	ATLC1	V9	41,51	70,90	298,00	LS08-302	AT LC 1	H9	45,82	387,76	478,46	LS08-54	S9	ATLC1	30	0,93	2,59
LS08-97	ATLC2	V10	37,69	76,20	390,70	LS08-303	AT LC 2	H10	46,36	404,84	457,29	LS08-55	S10	ATLC2	30	0,99	3,24
LS08-98	ATPC1	V11	43,19	68,03	173,25	LS08-304	AT PC 1	H11	45,87	321,71	396,92	LS08-52	S11	ATPC1	30	0,88	3,72
LS08-99	ATPC2	V12	40,78	69,38	171,56	LS08-305	AT PC 2	H12	45,17	321,14	375,77	LS08-53	S12	ATPC2	30	0,94	2,28
LS08-100	JBBO1	V13	39,99	71,93	200,90	LS08-306	JB BO 1	H13	44,84	416,78	482,41	LS08-60	S13	JBBO1	30	0,88	3,88
LS08-101	JBBO2	V14	37,80	103,78	373,69	LS08-307	JB BO 2	H14	45,80	328,92	444,78	LS08-61	S14	JBBO2	30	0,86	3,88
LS08-102	JBLC1	V15	41,51	70,90	298,00	LS08-308	JB LC 1	H15	45,48	255,35	288,78	LS08-48	S15	JBLC1	30	0,95	3,03
LS08-103	JBLC2	V16	37,69	76,20	390,70	LS08-309	JB LC 2	H16	45,62	331,09	375,80	LS08-49	S16	JBLC2	30	0,90	2,79
LS08-104	ATPC1	V17	43,19	68,03	173,25	LS08-310	JB PC 1	H17	45,36	214,79	256,40	LS08-46	S17	JBPC1	30	0,97	2,80
LS08-105	ATPC2	V18	40,78	69,38	171,56	LS08-311	JB PC 2	H18	44,78	182,33	216,64	LS08-47	S18	JBPC2	30	1,01	3,23

ANEXO 3

CARBONO ALMACENADO EN LOS RESERVORIOS DE LOS SISTEMAS DE USO DE LA TIERRA ESTUDIADOS

<u>Carbono en (t C ha⁻¹)</u>																		
SITIO	SISTEMA	Parcelas	Fustales	Latízales	Brínzales	Herbáceas	Café	Laurel	Poró	Aéreo	Raíces	Muertos en pie	Madera caída	Hojarasca	Necromasa	Biomasa total	Suelo	TOTAL
AQUIARES 1300 m	BOSQUE	AQBO1	52,6	0,4	2,1	0,6	0,0	0,0	0,0	55,7	11,8	1,5	6,6	1,9	10,0	77,6	164,2	241,8
		AQBO2	55,1	2,5	2,1	0,5	0,0	0,0	0,0	60,2	12,5	0,3	2,0	1,5	3,7	76,4	171,4	247,8
	LC	AQLC1	0,0	0,0	0,0	0,3	2,4	8,7	0,0	11,3	2,8	0,0	0,8	1,2	2,0	16,2	109,3	125,5
		AQLC2	0,0	0,0	0,0	0,3	2,2	10,9	0,0	13,4	3,3	0,0	0,6	1,6	2,2	18,9	69,6	88,5
	PC	SCPC1	0,0	0,0	0,0	0,3	3,9	0,0	2,9	7,1	1,9	0,0	1,2	1,0	2,2	11,2	145,9	157,1
		SCPC2	0,0	0,0	0,0	0,3	2,8	0,0	2,2	5,2	1,4	0,0	1,1	0,9	2,0	8,6	160,5	169,2
ATIRRO 800 m	BOSQUE	ATBO1	113,2	3,7	2,4	0,5	0,0	0,0	0,0	119,8	23,8	4,4	2,0	0,8	7,2	150,8	73,4	224,1
		ATBO2	198,3	2,5	1,5	0,5	0,0	0,0	0,0	202,9	40,1	20,7	1,9	0,8	23,4	266,4	66,9	333,2
	LC	ATLC1	0,0	0,0	0,0	0,3	1,3	10,0	0,0	11,6	2,8	0,0	0,3	0,9	1,2	15,6	72,3	87,9
		ATLC2	0,0	0,0	0,0	0,3	3,0	13,5	0,0	16,8	4,0	0,0	0,4	1,2	1,6	22,4	96,2	118,6
	PC	ATPC1	0,0	0,0	0,0	0,3	1,6	0,0	2,4	4,2	1,2	0,0	1,2	1,1	2,3	7,7	98,2	105,9
		ATPC2	0,0	0,0	0,0	0,3	4,7	0,0	4,9	9,9	2,6	0,0	0,7	1,5	2,2	14,7	64,3	79,0
JARDÍN BOTANICO	BOSQUE	JBBO1	55,7	6,3	3,6	0,3	0,0	0,0	0,0	65,8	15,6	6,8	1,6	1,4	9,8	91,2	102,4	193,6
		JBBO2	238,8	1,3	3,6	0,4	0,0	0,0	0,0	244,2	41,9	0,2	2,5	1,0	3,7	289,7	100,1	389,8
CATIE 600 m	LC	JBLC1	0,0	0,0	0,0	0,3	2,9	47,6	0,0	50,8	10,5	0,0	1,2	1,8	3,0	64,3	86,4	150,6
		JBLC2	0,0	0,0	0,0	0,3	3,0	21,1	0,0	24,3	5,6	0,0	0,9	1,8	2,8	32,7	75,3	108,0
	PC	JBPC1	0,0	0,0	0,0	0,3	2,7	0,0	29,7	32,7	7,2	0,0	1,0	1,5	2,4	42,3	81,5	123,8
		JBPC2	0,0	0,0	0,0	0,3	1,9	0,0	29,2	31,4	7,4	0,0	1,5	1,4	2,9	41,7	97,9	139,6

ANEXO 4

**VARIABLES FISIONÓMICAS Y COMPOSICIÓN FISIONÓMICA DE LA
VEGETACIÓN (CFV) DE LOS SAF CON CAFÉ Y LOS BOSQUES SECUNDARIOS
ESTUDIADOS EN EL CBVCT**

SITIO/PA	SUT	PARCELA	Área	Porcentaje de	Número de estratos	Altura del	CFV (%)
			basal (m ²)	Cobertura (%)		dosel (m)	
AQUIARES 1300 m	BO	AQBO1	14,8	42,5	7	27,5	58
		AQBO2	16,8	55,8	7	27,5	62
	LC	AQLC1	3,4	30,0	4	15,0	33
		AQLC2	4,3	30,0	3	15,0	30
	PC	AQPC1	5,7	30,0	3	3,5	23
		AQPC2	3,5	30,0	3	3,5	23
ATIRRO 800 m	BO	ATBO1	32,2	51,3	8	35,0	72
		ATBO2	42,0	43,3	8	35,0	71
	LC	ATLC1	3,9	32,5	4	15,0	34
		ATLC2	5,24	30,0	3	15,0	30
	PC	ARPC1	3,6	30,0	3	3,5	23
		ATPC2	9,8	30,0	3	3,50	24
JARDÍN BOTÁNICO 600 m	BO	JBBO1	17,4	41,7	6	27,5	54
		JBBO2	51,8	51,7	6	27,5	64
	LC	JBLC1	17,6	33,3	5	27,5	48
		JBLC2	8,1	30,8	4	15,0	34
	PC	JBPC1	44,5	35,0	4	7,5	39
		JBPC2	50,9	30,8	4	7,5	39

PA: piso altitudinal; SUT: sistema de uso de la tierra; CFV: composición fisionómica de la vegetación; BO: bosque secundario; LC: sistema agroforestal laurel-café; PC: sistema agroforestal poró-café

ANEXO 5

MODELOS DESARROLLADOS PARA ESTIMAR CARBONO EN LA BIOMASA TOTAL EN FUNCIÓN DE LA COMPOSICIÓN FISIONÓMICA DE LA VEGETACIÓN

MODELO	CME		R ² -ajustado		PRESS		Calificación
	Valor	Calif	Valor	Calif	Valor	Calif	Total
$LogCABt = 0.45+0.03*(IFV)$	0.01	1	0.95	3	0.02	1	5
$LogCABt = -2.63+2.6*Log(IFV)$	0.01	2	0.95	4	0.02	2	8
$LogCABt = -0.67+0.34*Raíz(IFV)$	0.01	4	0.96	1	0.02	4	9
$LogCABt = -2.63+1.13*LN(IFV)$	0.01	3	0.95	5	0.02	3	11
$LNCABt = -1.55+0.79*Raíz(IFV)$	0.05	5	0.96	2	0.09	5	12
$LNCABt = -6.06+5.99*Log(IFV)$	0.06	6	0.95	7	0.10	6	19
$LNCABt = 1.04+0.06*(IFV)$	0.07	8	0.95	6	0.12	8	22
$LNCABt = -6.06+2.60*LN(IFV)$	0.06	7	0.95	8	0.10	7	22
$RaízCABt = -2.44+0.21*(IFV)$	1.66	9	0.91	9	2.71	9	27
$RaízCABt = -1.55+0.79*Raíz(IFV)$	2.09	10	0.89	10	3.52	10	30
$RaízCABt = -27.57+21.45*Log(IFV)$	2.75	11	0.85	11	4.76	11	33
$RaízCABt = -27.57+9.31*LN(IFV)$	2.75	12	0.85	12	4.76	12	36
$CABt = -9.69+3.64*(IFV)$	1096.1	13	0.82	13	1865.3	13	39
$CABt = -511.9+357.7*Log(IFV)$	1681.9	15	0.72	14	2972.4	15	44
$CABt = -251.3+48.4*Raíz(IFV)$	1357.9	14	0.77	16	2378.6	14	44
$CABt = -511.9+155.3*LN(IFV)$	1681.9	16	0.72	15	2972.4	16	47

Los símbolos utilizados son: CABt: Carbono almacenado en la biomasa total (Mg C ha⁻¹); IFV: Composición fisionómica de la vegetación; R²-ajust.: Coeficiente de determinación ajustado; RCME: Raíz del cuadrado medio del error; PRESS: Suma de los cuadrados de los residuos; Log: Logaritmo base 10; LN: Logaritmo Natural; Raíz: Raíz Cuadrada.

ANEXO 6

FORMULARIOS DE CAMPO

Bosque

Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación en los sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios del CBVCT, Costa Rica						
Sitio:		Código:				
Finca:		Parcela No:				
Topografía:		Pendiente:				
Fecha:		Coordenadas de la parcela de muestreo:				
Anotador:		Elevación (m):				
Ecosistema: Bosque		Comentarios:				
Parcela: 1000 m ²		DAP ≥ 10 cm				
No. árbol	Especie	DAP (cm)	Altura total(m)			Observaciones
			Distancia (m)	%Base	%Arriba	

Bosque

Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación en los sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios del CBVCT, Costa Rica				
Sitio:		Código:		
Finca:		Parcela No:		
Topografía:		Pendiente:		
Fecha:		Coordenadas de la parcela de muestreo:		
Anotador:		Elevación (m):		
Ecosistema: Bosque		Comentarios:		
Parcela: 100 m ²		DAP entre 5 y 9,9 cm		
No. árbol	Especie	D ₁₅ (cm)	Altura total con bara (m)	Observaciones

FORMULARIOS DE CAMPO

Bosque

Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación en los sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios del CBVCT, Costa Rica				
Sitio:		Código:		
Finca:		Parcela No:		
Topografía:		Pendiente:		
Fecha:		Coordenadas de la parcela de muestreo:		
Anotador:		Elevación (m):		
Ecosistema: Bosque		Comentarios:		
Parcela: 25 m ²		DAP entre 1 y 4,9 cm		
No. árbol	Especie	Db (cm)	Altura total con bara (m)	Observaciones

Madera caída

Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación en los sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios del CBVCT, Costa Rica				
Sitio:		Código:		
Finca:		Parcela No:		
Topografía:		Pendiente:		
Fecha:		Coordenadas de la parcela de muestreo:		
Anotador:		Elevación (m):		
Madera caída		Comentarios:		
Madera caída: 1 líneas de 50 m				
Dct	Especie	Clase de densidad		
		Duro	Medio	Suave

