

**CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA**  
**PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACION**  
**ESCUELA DE POSGRADUADOS**

**FIJACION Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN SISTEMAS  
DE CAFE BAJO SOMBRA, CAFE A PLENO SOL, SISTEMAS SILVOPASTORILES Y  
PASTURAS A PLENO SOL**

**POR**

**GABRIELA AVILA VARGAS**

**CATIE**

Turrialba, Costa Rica  
2000

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA  
PROGRAMA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN  
ESCUELA DE POSGRADO**

RECIBIDO  
2000

**FIJACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN SISTEMAS DE CAFÉ BAJO  
SOMBRA, CAFÉ A PLENO SOL, SISTEMAS SILVOPASTORILES Y PASTURAS A  
PLENO SOL**

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado, Programa Educación para el  
Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y  
Enseñanza como requisito parcial para optar por el grado de:

*Magister Scientiae*

por

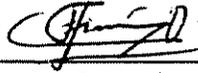
✓  
Gabriela Avila Vargas

Turrialba, Costa Rica  
2000

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

**MAGISTER SCIENTIAE**

**FIRMANTES:**



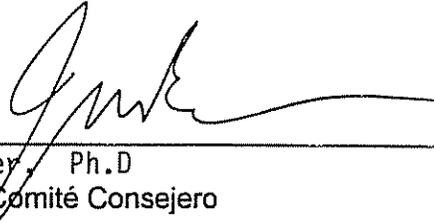
---

Francisco Jiménez O., Ph.D  
Consejero Principal



---

Muhammad Ibrahim, Ph.D  
Miembro Comité Consejero



---

John Beer, Ph.D  
Miembro Comité Consejero

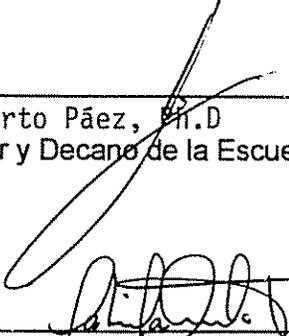


---

Manuel Gómez, MSc.  
Miembro Comité Consejero

---

Gilberto Páez, Ph.D  
Director y Decano de la Escuela de Posgraduados



---

Gabriela Avila Vargas  
Candidato

## DEDICATORIA

A mi madre Zoila Vargas Hernández, por ser siempre mi más directa y respetable amiga, porque tomada de sus manos inicie mi aprendizaje en la vida y me enseñó con su ejemplo y valor a luchar y vivir.

A mi padre Ramón Ávila Bolaños, quien ocupa un lugar especial en mi corazón, gracias por darme todo el apoyo y amor suficiente para no perder nunca la esperanza.

Siempre estuvieron a mi lado las personas más queridas, mis hermanas y mi hermano que se preocuparon y creyeron en mí.

Thais

Elkier

Margoth

Froylán

Silvia

Creo que al fin termine mi tesis para regresar a casa, aunque uno nunca acaba; sólo se cambia de situación y se sube al siguiente escalón de la vida; pero sé que ustedes estarán allí para ayudarme a subir el próximo, gracias por ello. Que la vida nos mantenga unidos.

A mis amados sobrinos Julián, Verónica, Priscilla, Isacc y Alison que cada vez que los visitaba solían decirme : Y esta vez te quedarar con nosotros a jugar tía?. Luego de dos años les diré, sí me quedaré con ustedes y esta vez podremos jugar.

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la fuerza y fortaleza para concluir mis estudios, enseñarme el valor del tiempo, el amor y la familia.

A Francisco Jiménez, por más que ser mi profesor consejero ser un amigo, por darme siempre palabras de aliento, tranquilidad, comprensión y fortaleza.

A Max, por con su cariño y respeto, darme alegría en mi vida.

A Giniva Guiracocha mi amiga, por llorar mis sufrimientos, reír mis alegrías y compartir mis esperanzas, gracias de todo corazón por apoyarme por encima de todas las dificultades, cansancios y noches interminables durante estos dos años, te llevaré siempre en un lugar especial en mi corazón.

A Eduardo Ramírez, quién me ayudó a recolectar los datos de campo, gracias por tú ayuda, por darme tú fuerza y compartir mi cansancio.

A Jonhy Pérez, quién colaboró en forma altamente significativamente en los análisis estadísticos realizados.

A Milena Segura y Hernán Andrade, amigos y compañeros, por sus consejos, cariño, apoyo y aportes importantes no sólo en mi tesis sino en mi vida.

A Heilin Rodríguez Lizano, por ser mi amiga durante once años, por tener siempre una sonrisa para mí y compartir mis fracasos al igual que mis alegrías a pesar de la distancia y el tiempo que no compartimos.

A Claudia Upeguí, Glen Galloway y Jessica por sus sonrisas, amistad, respeto y cariño.

A Guillermo Thiele, por brindarme su amistad y preocuparse siempre por mi estabilidad emocional y espiritual.

Al personal de la Biblioteca Conmemorativa Orton, especialmente a Rigoberto, Juan, Addy, Javier, Gilbert y Liz por su ayuda, compañerismo y amistad durante estos dos años.

Al personal del gimnasio, administración, posgrado, transportes y seguridad, por velar por mi bienestar y seguridad durante todo éste tiempo

Al personal de ICAFE en el Valle Central Occidental, por su colaboración; en especial a Máximo Segura y Eduardo Arias quienes me ayudaron extraordinariamente a ubicar las zonas de estudio, y a obtener información adicional.

A los productores que me permitieron trabajar en sus fincas para desarrollar mi trabajo; sin su colaboración no hubiese sido posible este estudio.

## BIOGRAFIA

La autora nació en el verano del año 1972 en Grecia, provincia de Alajuela, Costa Rica; hija de Ramón Avila Bolaños y Zoila Vargas Hernández. Su niñez la vivió y compartió con sus cinco hermanos en los campos del Valle Central, disfrutando las actividades al aire libre, entre el sol, el olor a café maduro, el viento y los hermosos paisajes blancos de los cañales florecidos en Grecia

Disfruto sus estudios primarios en la escuela Ramón Herrero Vitoria, sus estudios secundarios los realizó en el Liceo León Cortés Castro, obteniendo el grado de Bachiller en Ciencias y Letras en 1989. Durante las vacaciones de sus estudios solía trabajar en el campo en la recolección de café con sus abuelos y hermanos.

Sus inclinaciones agrícolas e interés en la economía fueron las principales razones que le impulsaron a ingresar a la Universidad de Costa Rica, en el Recinto Universitario de Grecia, donde obtuvo el título de Ingeniera Agrónoma con el grado de Licenciatura en Economía Agrícola en la Facultad de Agronomía en octubre de 1996. Su interés en la diversificación agrícola y el área de comercialización forestal la inclinaron a realizar su tesis de grado en un estudio de mercado para *Eucalyptus saligna* en el Valle Central Occidental de Costa Rica.

Siendo aún estudiante inició su trabajo en 1996 como Coordinadora de Capacitación y Extensión Forestal, en la Junta Nacional Forestal Campesina, hasta diciembre de 1998.

En enero de 1999 ingresó como estudiante regular del Programa de Estudios de Posgrado del CATIE en el área de Sistemas Agroforestales Tropicales, obteniendo el grado de Magister Scientiae en diciembre del año 2000.

## CONTENIDO

<b>DEDICATORIA</b>	iii
<b>AGRADECIMIENTO</b>	iv
<b>BIOGRAFÍA</b>	vi
<b>CONTENIDO</b>	vii
<b>RESUMEN</b>	ix
<b>SUMMARY</b>	xi
<b>LISTA DE CUADROS</b>	xiii
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	xv
<b>LISTA DE ANEXOS</b>	xvi
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	1
1.2. Objetivo general	3
1.2.1. Objetivos específicos	3
1.3. Hipótesis	3
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA</b>	5
2.1. El dióxido de carbono y el efecto invernadero	5
2.2. El papel de las coberturas forestales y agroforestales en el almacenamiento y fijación de CO <sub>2</sub>	6
2.2.1. Los bosques como fijadores de dióxido de carbono	7
2.2.2. Las plantaciones forestales como fijadoras de CO <sub>2</sub> y reductoras de su contenido en la atmósfera	9
2.2.3. Importancia de los sistemas agroforestales en la fijación de carbono	10
2.3. Definición del servicio ambiental de almacenamiento y fijación de carbono	14
2.4. Antecedentes históricos del pago de servicios ambientales	16
2.4.1. Mecanismos de desarrollo en limpio	17
2.4.2. Desarrollo de políticas	18
2.5. Valoración económica del servicio ambiental de fijación y almacenamiento	20
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	23
3.1. Sistemas evaluados	23
3.2. Localización de los sitios experimentales	25
3.3. Variables a evaluar en los sistemas de producción	26
3.4. Selección y descripción de las unidades experimentales	26
3.4.1. Sistemas de producción con café	26
3.4.2. Sistemas de producción con pastos	33
3.5. Valoración económica del servicio ambiental de almacenamiento y/o fijación de carbono	38
3.6. Análisis estadístico	39
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	41
4.1. Sistemas de producción con café	41

4.2. Sistemas de producción con pasturas	44
4.3. Comparación de todos los sistemas de producción estudiados	47
4.4. Fijación de carbono en los sistemas agroforestales con café y pastos	52
4.5. Valoración económica del servicio ambiental de almacenamiento de carbono	53
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>64</b>
5.1. Conclusiones	64
5.2. Recomendaciones	65
<b>5. LITERATURA CITADA</b>	<b>67</b>
<b>6. ANEXOS</b>	<b>82</b>

AVILA VARGAS, 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.

**Palabras claves:** sistemas agroforestales, sistemas silvopastoriles, café con sombra, café a pleno sol, pasturas a pleno sol, almacenamiento y fijación de carbono, biomasa servicios ambientales, valoración de servicios ambientales.

## RESUMEN

Existe interés de identificar los beneficios ambientales de los sistemas agroforestales con café y los sistemas silvopastoriles dado que los mismos ofrecen alternativas sostenibles de producción, a la vez que pueden ser aprovechados al generar servicios ambientales, tal es el caso del almacenamiento y la fijación de carbono.

El objetivo de la investigación consistió en cuantificar el carbono fijado y almacenado en sistemas agroforestales con café y pastos en Costa Rica.

Los sistemas evaluados fueron: *Coffea arabica* con *Eucaliptus deglupta* de cuatro años de edad; *Coffea arabica* con *Eucaliptus deglupta* de seis años de edad; *Coffea arabica* con *E. deglupta* de ocho años de edad; *Coffea arabica* con *E. poeppigiana* > 10 años de edad; *Coffea arabica* a plena exposición solar, en el Valle Central; los sistemas con pasturas fueron: *Brachiaria brizantha* con *Acacia mangium* de tres años de edad; *Brachiaria brizantha* con *E. deglupta* de tres años de edad; *Brachiaria brizantha* e *Ischaemun indicum* a plena exposición solar en la Región Atlántica.

En los sistemas de producción con café se evaluaron los componentes árbol, cafeto, hojarasca y suelo, mientras que en los sistemas de producción con pastos se evaluó la pastura, el árbol y el suelo.

Los resultados obtenidos mostraron que en promedio los sistemas agroforestales café-eucalipto almacenaron 40% más carbono que los sistemas silvopastoriles brizanta-eucalipto y brizanta-mangium.

En promedio los sistemas agroforestales almacenan más carbono que los sistemas correspondientes a los cultivos a pleno sol, éste comportamiento fue más evidente en los sistemas silvopastoriles.

Más del 89% del carbono almacenado en los sistemas de producción estudiados, corresponden al carbono del suelo; éste varió entre el 89.8% (120.92 t C ha<sup>-1</sup>) en sistemas agroforestales café-eucalipto de 8 años a 99.9% (84.31 t C ha<sup>-1</sup>) en la pastura natural ratana (*I. indicum*).

En los sistemas de producción con café, el asocio café-poró fue el de mayor almacenamiento de carbono (195 t ha<sup>-1</sup>), mientras que el café-eucalipto de 8 años tuvo el más bajo (120.92 t ha<sup>-1</sup>); el café en monocultivo almacenó más carbono que el café de cuatro y ocho años.

Considerando el carbono almacenado por los árboles maderables en los sistemas agroforestales con café y los sistemas silvopastoriles, la cantidad de carbono almacenada se encuentra muy cercana y superior a la presentada en plantaciones puras (5.74 t C ha<sup>-1</sup>), reportadas para el País.

Los sistemas agroforestales con café y los sistemas silvopastoriles almacenan el componente arbóreo cantidades elevadas de carbono, por lo que deberían de ser incluidos en la modalidad por pago de servicios ambientales que regula la Ley Forestal de Costa Rica.

El monto pagado por el servicio ambiental de almacenamiento de carbono para proyectos nacionales e internacionales son superiores a los pagados actualmente a los productores como pago de servicio ambiental.

**AVILA VARGAS, G. 2000.** Carbon fixation and storage in shaded coffee systems, completely unshaded coffee, silvopastoral systems and unshaded pastures. M.Sc. Thesis. Turrialba, Costa Rica. 99 p.

**Key words:** agroforestry systems, silvopastoral systems, shaded coffee, unshaded coffee, unshaded pastures, carbon storage and fixing, biomass, environmental services, valuation of environmental services.

## SUMMARY

There is a need to identify the environmental benefits of agroforestry systems with coffee and silvopastoral systems, given that they offer sustainable production alternatives, and at the same time, can be used to generate environmental services, such as is the case of carbon storage and fixing.

The objective of the study was to quantify fixed and stored carbon in agroforestry systems with coffee and pastures in Costa Rica.

The systems evaluated were: *Coffea arabica* with four-year-old *Eucalyptus deglupta*; *Coffea arabica* with six-year-old *Eucalyptus deglupta*; *Coffea arabica* with eight-year-old *E. deglupta*; *Coffea arabica* with 10-year or older *E. poeppigiana*; completely unshaded *Coffea arabica*, in the Central Valley; the systems with pastures were: *Brachiaria brizantha* with three-year-old *Acacia mangium*; *Brachiaria brizantha* with three-year-old *E. deglupta*; completely unshaded *Brachiaria brizantha*; and completely unshaded *Ischaemun indicum* in the Atlantic Region.

Trees, coffee bushes, fallen leaves and soils in production systems with coffee were evaluated, while pastures, trees, and soils were evaluated in production systems with pastures.

Results obtained showed that on average, the coffee-eucalyptus agroforestry systems stored 40% more carbon than the brizantha-eucalyptus and brizantha-mangium silvopastoral systems.

On average, agroforestry systems store more carbon than systems corresponding to unshaded crops; this behavior was more evident in silvopastoral systems.

More than 89% of the carbon stored in the production systems studied corresponds to carbon in the soil; this varied between 89.8% (120.92 t C ha<sup>-1</sup>) in eight-year-old coffee-eucalyptus agroforestry systems and 99.9% (84.31 t C ha<sup>-1</sup>) in the natural rattan pasture (*I. indicum*).

In the production systems with coffee, the coffee-poro association showed the best carbon storage (195 t ha<sup>-1</sup>), while the eight-year-old coffee-eucalyptus system had the lowest figure (120.92 t ha<sup>-1</sup>); coffee in a mono-cropping system stored more carbon than four or eight-year-old coffee.

Considering that carbon stored by timber trees in agroforestry systems with coffee and in silvopastoral systems, the amount of stored carbon is very similar or higher than that found in pure plantations (5.74 t C ha<sup>-1</sup>), as reported for the country.

Agroforestry systems with coffee and the tree component of silvopastoral systems store great quantities of carbon, and for this reason, should be included in the environmental services payment regulated by Costa Rica's Forestry Law.

The amounts paid to national and international projects for the environmental service of carbon storage are greater than those presently paid to producers as a payment for this service.

## LISTA DE CUADROS

No	TÍTULO	PAGINA
1	Carbono almacenado por fustes y biomasa aérea en plantaciones forestales en dos sitios de Hojancha, Costa Rica	10
2	Componente arbóreo y densidad de siembra de plantaciones de América Central como sumideros de carbono en su biomasa	12
3	Proyectos del sector forestal en Costa Rica relacionados con CO <sub>2</sub>	20
4	Variables evaluadas en los sistemas de producción con café y pasturas	25
5	Características de las plantaciones seleccionadas para realizar las evaluaciones en café	27
6	Características de las fincas seleccionadas para realizar las evaluaciones en pasturas	34
7	Cantidad de biomasa aérea y carbono almacenado en diferentes sistemas de producción de café en el Valle Central, Costa Rica, 2000	42
8	Cantidad de biomasa aérea y carbono almacenado en diferentes sistemas de producción de pastos en el Región Atlántica, Costa Rica, 2000	45
9	Cantidad de biomasa aérea y carbono almacenado en diferentes sistemas de producción de café y pastos, Costa Rica, 2000	50
10	Fijación de carbono por sistema agroforestal con café y pastos. Costa Rica, 2000	52
11	Valoración del servicio ambiental de almacenamiento de carbono en diferentes sistemas de producción de café en el Valle Central, Costa Rica, 2000	55
12	Valoración del servicio ambiental de almacenamiento de carbono del componente arbóreo en sistemas agroforestales con café y sistemas silvopastoriles, Costa Rica, 2000	56
13	Valoración del servicio ambiental de almacenamiento de carbono en diferentes sistemas de producción de pastos en el Región Atlántica, Costa Rica, 2000	59

14	Valoración del servicio ambiental de almacenamiento de carbono para el cultivo en sistemas agroforestales con café, sistemas silvopastoriles y sistemas a pleno sol, Costa Rica, 2000	60
15	Valoración del servicio ambiental de almacenamiento de carbono del componente arbóreo y le cultivo asociado en sistema agroforestales con café y sistemas silvopastoriles, Costa Rica, 2000	61
16	Costo de oportunidad para el servicio de almacenamiento de carbono por el componente arbóreo y el cultivo en sistemas agroforestales con café y sistemas silvopastoriles, bajo el sistema actual de pago en Costa Rica. 2000	62
17	Costo de oportunidad para el servicio de almacenamiento de carbono por el componente en sistemas agroforestales con café y sistemas silvopastoriles, bajo el sistema actual de pago en Costa Rica. 2000	63

## LISTA DE FIGURAS

No	TÍTULO	PAGINA
1	Plano descriptivo de la parcela en el sistema de café con arboles	28
2	Plano descriptivo de la parcela en el sistema de café a pleno sol	28
3	Plano descriptivo de la parcela en el sistema de pasturas a pleno sol	35
4	Plano descriptivo de la parcela en el sistema de pasturas con arboles	37
5	Toneladas de carbono almacenadas por plantaciones forestales durante un periodo de 20 años, Costa Rica, 2000	96
6	Carbono almacenado por hectárea en sistemas de producción con <sup>café</sup> pasturas, Región Atlántica, Costa Rica, 2000	41
7	Carbono almacenado por hectárea en sistemas de producción con <u>café</u> y pasturas, Costa Rica, 2000	44
8	Aporte de los árboles al total de carbono almacenado en sistemas agroforestales con café y sistemas silvopastoriles, Costa Rica, 2000	49

## LISTA DE ANEXOS

No	TÍTULO	PAGINA
1	Breve descripción de las especies en estudio	82
2	Ubicación de las unidades de muestreo en los sistemas de producción con café y pasturas	87
3	Procedimiento en el campo para coleccionar la muestra de hojarasca y demás material muerto	88
4	Densidad aparente del suelo toma de muestras en el campo	90
5	Gráficos de dispersión de los datos de las plantas de café para generar el modelo de biomasa	91
6	Procedimiento en el campo para obtener materia seca	93
7	Determinación de la gravedad específica de la madera	94
8	Procedimiento para tomar la muestra de pastura	95
9	Valoración del servicio ambiental de almacenamiento y/o fijación de carbono según el pago vigente por servicios ambientales en Costa Rica	96
10	Reportes de laboratorio	98

## I. INTRODUCCIÓN

Existe una preocupación creciente por los cambios climáticos y su impacto en la actividad humana y en los recursos naturales. Los gases provenientes de procesos industriales, la actividad agrícola, el uso de combustibles fósiles y la deforestación, son responsables de la mayor parte de las alteraciones climáticas. Dentro de ellos, el dióxido de carbono es de interés especial por ser el gas más abundante y por lo tanto que más contribuye al calentamiento global (Cielsa, 1996).

El mantenimiento de reservas de carbono mediante los bosques se ha convertido en un servicio ambiental reconocido a escala global, que puede tener un valor económico considerable para países en vías de desarrollo (Ramírez *et al.*, 1999). En Costa Rica, la búsqueda de alternativas para reducir la presión sobre los bosques y prolongar la vida útil de los ecosistemas, resultó en un interés nacional para promover las plantaciones forestales mediante incentivos económicos. Este programa inició en 1978 con el establecimiento de las primeras plantaciones forestales, hasta alcanzar un promedio anual de 14400 ha durante los últimos ocho años (Ramírez *et al.*, 1999). En Costa Rica se estableció el Pago de Servicios Ambientales (PSA) según la Ley Forestal N° 7575 de 1996, mediante la cual se le reconoce a los propietarios de bosques y plantaciones, los servicios que éstos brindan a la sociedad, en términos de conservación y protección del agua, el suelo y la biodiversidad, fijación, reducción, captura y almacenamiento de gases que causan el efecto invernadero.

Una forma de mitigar los efectos del dióxido de carbono, además de reducir las emisiones, es almacenarlo, el mayor tiempo posible, en la biomasa y el suelo. Lo primero se puede lograr mediante la fotosíntesis y lo segundo por medio de la acumulación de materia orgánica. Los bosques son el principal sumidero de CO<sub>2</sub>, sin embargo, los Sistema Agroforestales (SAF) pueden contribuir de manera importante; 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 ha (López, 1998).

La captura de carbono en cafetales tiene su base en la agenda ambiental, su estrategia de comercialización de servicios puede potencialmente ser un instrumento articulado a la

estrategia de combate de la pobreza rural, e impulsar con ello, una reconversión productiva hacia esquemas agroecológicos, en donde se combinen la producción y la venta de servicios en el ámbito nacional y global (Cuéllar *et al.*,1999).

Existe interés de identificar los beneficios ambientales de los sistemas agroforestales de café con y sin árboles, dada la importancia económica que posee el cultivo de café en Costa Rica, y que las actividades de estos sistemas agroforestales, por su propia naturaleza, modifican los ecosistemas naturales para ser convertidos en agroecosistemas, cuya productividad se orienta hacia el suministro de uno o varios servicios de importancia económica (Fournier, 1996).

La relevancia de investigar los sistemas agroforestales con café también se debe a que en Costa Rica, cerca del 75% del área cafetalera se maneja con sombra, con intensidad que va desde muy poca hasta sombrero excesivo (ICAFFE, 1998). Actualmente es común observar la siembra de *Eucalyptus* spp y otros maderables para aprovechar créditos blandos para reforestación con estas especies (Beer *et al.*,1997).

Por otra parte, el cambio de uso de la tierra más importante que se ha observado durante los últimos 40 años ha sido la fuerte reducción de la superficie dedicada a bosques (FAO, 1994), siendo la mayor parte del área deforestada dedicada a pasturas, ya sea directamente, o luego de haber sido usada por un tiempo en cultivos anuales (Pezo e Ibrahim, 1999). En Costa Rica, éstas representan alrededor del 18% del territorio nacional, las cuales tienen la posibilidad de pasar a manejos silvopastoriles (Montenegro y Abarca, 1999).

Los sistemas silvopastoriles ofrecen una alternativa sostenible al aprovechar las ventajas de varios estratos de la vegetación; además al aumentar la biomasa no sólo se crean sumideros de carbono en forma de árboles y productos maderables, sino que aumenta la biodiversidad animal y vegetal, ayudando a evitar el agotamiento de los recursos naturales ya existentes (Sánchez, 1999; López, 1998).

Pese a todos los esfuerzos realizados para valorar el aporte que brindan los sistemas de producción con árboles a la fijación y almacenamiento de carbono, no existe un sistema adecuado de financiamiento y pago de servicios ambientales reglamentado por ley, dirigido a los sistemas agroforestales (SAF).

Diferentes autores (Brown, 1994a; Dixon, 1995; Márquez, 1997; Budowski, 1999; Stella, 1999; Fischer y Trujillo, 1999; Andrade, 1999; Alvarado *et al.*, 1999; Segura, 1999) señalan la importancia de realizar estudios que logren obtener la cantidad de biomasa en los diferentes sistemas forestales, agroforestales o ecosistemas, con la finalidad de obtener datos de la cantidad de carbono fijada o almacenada en los mismos; cuantificar económicamente su valor y otorgar un pago por el servicio ambiental brindado.

El presente estudio aporta información sobre la contribución y potencial de SAF en la fijación y almacenamiento de carbono, información que puede servir para la ampliación del PSA por éste uso de la tierra a los productores en Costa Rica.

## **1.2 Objetivo general**

Cuantificar el carbono fijado y almacenado en sistemas agroforestales con café y pastos en Costa Rica.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

- Cuantificar el carbono fijado y almacenado en los sistemas silvopastoriles *Brachiaria brizantha* - *Acacia mangium*, *B. brizantha* - *Eucalyptus deglupta* así como en los sistemas agroforestales *Coffea arabica* - *E. deglupta* y *C. arabica Erythrina poeppigiana*.
- Cuantificar el carbono almacenado en un sistema de café a pleno sol (*C. arabica*), en un sistema de pasto mejorado (*B. brizantha*) y pasto natural *Ischaemun indicum*) y comparar los valores con respecto a los sistemas agroforestales respectivos.
- Cuantificar el valor económico del servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales y en los sistemas de monocultivo.

## **1.3 Hipótesis**

- Los sistemas agroforestales tienen alta capacidad de fijación y almacenamiento de carbono por lo que deberían ser incluidos en el pago de servicios ambientales.

- Los sistemas agroforestales almacenan más carbono que los sistemas de producción en monocultivo.
  
- El valor económico del servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono por parte de los sistemas agroforestales representa un potencial económico equivalente al de plantaciones forestales para los productores y el país.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 El dióxido de carbono y el efecto invernadero

La tierra está cubierta por capas de gases que permiten la entrada de la energía solar, la cual calienta la superficie de la tierra. Algunos de los gases en la atmósfera (llamados Gases de Efecto Invernadero - GEI-), impiden el escape de este calor hacia el espacio. Este es un efecto natural que mantiene la tierra a una temperatura promedio arriba del punto de congelación y permite la vida tal como la conocemos, pero las actividades humanas producen un exceso de GEI (principalmente dióxido de carbono, metano y óxido nitroso) que están potencialmente calentando la tierra. Por ejemplo, las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono ha aumentado en un 30% desde los tiempos pre-industriales, mientras que la temperatura global promedios ha aumentado entre 0,3 y 0,6 °C (Begon *et al.*, 1996; Alexander *et al.*; 1998; Beaumont, 1999; Tattenbach y Pedroni, 1999).

El estudio del ciclo del carbono es importante para el entendimiento de su papel en el crecimiento de una planta, lo cual conlleva la incorporación dentro de sus tejidos de moléculas de carbono (proceso que se conoce como fijación de carbono). Las moléculas de carbono se encuentra en la atmósfera en forma de dióxido de carbono y es removido de ésta mediante la fotosíntesis para formación principalmente de carbohidratos (a este proceso se le conoce como captura, almacenamiento o secuestro). La tasa potencial de producción de biomasa de una planta depende principalmente de su tasa de formación de carbohidratos, la velocidad de crecimiento (Bazzaz y Fajer, 1992).

Todas las plantas y animales realizan el proceso de respiración, proceso que causa disminución del O<sub>2</sub> e incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico (Hall y Rao, 1994). Cuando una planta o una parte de ella muere, el carbono fijado en los tejidos es liberado a la atmósfera en forma de dióxido de carbono por medio del proceso de descomposición (Begon *et al.*, 1996; Finegan y Delgado, 1997).

La deforestación y otros cambios en el uso de la tierra en el trópico constituyen una fuente significativa de dióxido de carbono atmosférico. La magnitud de esta fuente adicional es comúnmente estimada entre 8% y 47% de la que se produce de los combustibles fósiles

(Alexander *et al.*, 1998; Brown, 1997b; Begon *et al.*, 1996). La deforestación contribuye al aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera de dos formas: disminuyendo la cobertura vegetal capaz de fijar carbono atmosférico, y promoviendo la liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera a través de la quema y descomposición de biomasa, incluida la materia orgánica en el suelo (Hall y Rao, 1994).

La captura de carbono está asociada con la restauración de la vegetación después del abandono de las tierras deforestadas, el crecimiento de los bosques jóvenes, ya sean plantaciones o bosques secundarios, y el crecimiento neto de bosques primarios. Desde el punto de vista del cambio del uso de la tierra, la liberación de carbono a la atmósfera está asociada con la tala del bosque para la agricultura, la explotación comercial de los bosques y el incremento de la oxidación de la materia orgánica en los suelos (Erickson, 1992).

## **2.2 El papel de las coberturas forestales y agroforestales en el almacenamiento y fijación de CO<sub>2</sub>**

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, de formas que sean ecológicamente racionales y aceptables, económicamente viables y socialmente responsables; que conduzcan el potencial de estos recursos para producir múltiples beneficios en el presente y en el futuro (Ducan *et al.*, 1999).

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

La alternativa más viable de ampliación de sumideros de GEI es la forestación de nuevas áreas de tierra que presentan 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 del

sitio a forestar, los períodos de rotación y la duración y uso de los productos forestales a extraer. La forestación y la reforestación son las actividades forestales mencionadas explícitamente en el Protocolo de Kioto como aquellas que permiten mejorar y ampliar los sumideros de GEI (Beaumont, 1999).

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

- 1- Reducir la emisión de gases invernadero (reducir y disminuir la tala de bosque y la quema).
- 2- Mantener los actuales depósitos de los gases invernadero, 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 gases invernadero 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).

### **2.2.1 Los bosques como fijadores de dióxido 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 dióxido de carbono, aumentando su contenido en la atmósfera. Únicamente los bosques que tienen un crecimiento neto, son capaces de una absorción neta de dióxido de carbono (Begon *et al.*, 1996; Finegan y Delgado 1997), y por lo tanto, de contribuir a la reducción de dióxido de carbono atmosférico.

La cantidad de biomasa acumulada por el crecimiento de los árboles en los bosques disminuye gradualmente conforme aumenta la edad del bosque (Finegan, 1997; Kyrklund, 1990) y por lo tanto, su potencial de secuestro de carbono también disminuye. Sin embargo, esto no quiere decir que los bosques en los diferentes periodos de crecimiento no fijen carbono. Esta variabilidad que muestran los bosques naturales con respecto a las características de captura y almacenamiento de dióxido de carbono sirve de base para

diseñar diferentes alternativas de manejo de bosque natural y de ecosistemas forestales para que contribuyan al almacenamiento o no a la emisión de CO<sub>2</sub>.

Una característica sobresaliente de los bosques primarios en la fijación de carbono es la gran cantidad de biomasa acumulada por unidad de área, comparados con otros ecosistemas (Finegan y Delgado, 1997). Al evaluar datos de 21 ecosistemas, Brown y Lugo (1984 b) encontraron que la madera total de los tallos contribuyen con un 63% de la biomasa total vegetal de los ecosistemas forestales tropicales. Un estudio citado por Fassbender (1993) reporta datos de biomasa forestal que oscilan entre 40 y 518 t ha<sup>-1</sup>.

En Costa Rica, estudios de fijación de carbono realizados en bosques han dado los siguientes resultados: en bosque tropical húmedo hasta 16,7 t C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Tosi, 1995, citado por Carranza *et al.*, 1996) y en bosque húmedo premontano 5,1 t C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. En bosques de altura, Segura (1997) encontró que la cantidad de carbono almacenada para el *Quercus costaricensis* con manejo silvicultural fue de 56 t C ha<sup>-1</sup> y la tasa de fijación anual para todo el bosque considerando todas las especies fue de 1,87 t C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Segura (1999) estudió algunas especies<sup>1</sup> en la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica y obtuvo que la tasa de fijación anual de carbono varió entre 1,9 y 2,6 t C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, dependiendo de la gravedad específica y de la fracción de carbono de las especies, que osciló entre 0,43 y 0,47.

Los bosques secundarios también contribuyen a la fijación de CO<sub>2</sub>; su potencial para fijar carbono dependerá del potencial de la vegetación para desarrollarse y su tasa de producción de biomasa. En general, los bosques secundarios que se desarrollan en tierras utilizadas anteriormente para la actividad ganadera crecen más lentamente, quizás por la compactación del suelo, que los bosques secundarios establecidos en tierras agrícolas con pocos años de uso, lo que repercute en la cantidad de biomasa y la capacidad para fijar carbono (Finegan y Delgado, 1997).

---

<sup>1</sup> El estudio se basó en las siguientes especies: *Pentaclethra maculosa* (Gavilán), *Tapirira guianensis* (Cedro Manteco), *Vochysia ferruginea* (Botarrama), *Laetia procera* (Manga Larga), *Stryphnodendron microstachyum* (Vainillo), *Minuartia guianensis* (Manú), *Inga alba* (Guabo) y *Microphilis crotonoides* (Caimito).

### **2.2.2 Las plantaciones forestales como fijadoras de CO<sub>2</sub> y reductoras de su contenido en la atmósfera**

Se tiene la idea generalizada de establecer grandes cantidades de bosques nuevos con el fin de tener impacto sobre la mitigación de los gases invernadero 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 ya un uso legítimo de la tierra que puede ayudar a los países productores de madera tropical a manejar sus recursos forestales en forma sostenible, reduciendo la presión sobre los bosques naturales (Asamadu, 1999).

Para la opción de la utilización de plantaciones forestales debe considerarse la selección de especies de rápido crecimiento, preferiblemente nativas, que en cortos periodos fijen grandes cantidades de carbono en su biomasa (Asamadu, 1998, Brown, 1997a).

La importancia de las plantaciones forestales de rápido crecimiento para almacenar carbono (más que en los bosques primarios y secundarios maduros) se basan en una mayor tasa de fijación. Por ejemplo, se estima que una hectárea de plantación arbórea sana absorbe alrededor de  $10 \text{ t C ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  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 (Beaumont, 1999; Finegan y Delgado, 1997).

En un estudio sobre almacenamiento de carbono realizado en Hojancha, Costa Rica Cubero y Rojas (1999) reportan para plantaciones forestales en dos sitios de alta productividad "A" y dos de regular productividad "B", los resultados que se muestran en el cuadro 1:

Cuadro 1. Carbono almacenado por fustes y biomasa aérea en plantaciones forestales en dos sitios de Hojancha, Costa Rica.

Especie	Edad (años)	SITIO A	SITIO A	SITIO B	SITIO B
		Carbono almacenado en fustes en t C ha <sup>-1</sup>	Carbono almacenado en la biomasa en t C ha <sup>-1</sup>	Carbono almacenado en fustes t C ha <sup>-1</sup>	Carbono almacenado en la biomasa t C ha <sup>-1</sup>
<i>Gmelina arborea</i>	4	11,95	13,14	3,30	3,63
<i>Gmelina arborea</i>	8	36,53	40,18	16,18	17,80
<i>Gmelina arborea</i>	10 -12	—	—	18,92	20,81
<i>Tectona grandis</i>	5	16,41	18,11	7,17	7,88
<i>Tectona grandis</i>	8	22,56	24,81	25,61	28,17
<i>Bombacopsis quinata</i>	5	13,15	—	—	—
<i>Bombacopsis quinata</i>	8	19,04	—	—	—

Fuente: Cubero Rojas, 1999.

Las plantaciones de madera para aserrío contribuyen en mayor medida a la mitigación de gases de efecto invernadero 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 dióxido de carbono en poco tiempo (Alfaro 1997).

La manera más eficaz de aprovechar las plantaciones y los bosques para fijar CO<sub>2</sub> es fomentar la producción industrial de artículos de madera obtenida de manera sostenible en los 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, casas, encofrados, juguetes y tornería; así el carbono fijado queda almacenado en las estructuras por largo tiempo (Kyrklund, 1990; Alfaro, 1997; Stella, 1999).

### 2.2.3 Importancia de los sistemas agroforestales en la fijación de carbono

Los sistemas agrosilviculturales, silvopastoriles y agrosilvopastoriles pueden, en diversos grados, mantener y hasta aumentar las reservas de carbono en la vegetación y los suelos; de hecho, la agroforestería tiende a prácticas sostenibles de bajos insumos que minimicen

la alteración de los suelos y plantas, enfatizando la vegetación perenne y el ciclaje de nutrientes, lo cual contribuye a almacenar bancos de carbono que son estables por décadas o siglos (Kurstel y Burschel, 1993).

La reforestación no incluye exclusivamente a las plantaciones forestales en bloque, sino las diferentes formas de cultivo según el fin primordial del establecimiento; así por ejemplo, existen las plantaciones en bloque y las utilizadas por medio de la agroforestería, como cultivo en linderos, sistemas rompevientos, sistemas taungya, cercas vivas, entre otros. Además en áreas exclusivamente de vocación forestal o de protección, los sistemas agroforestales son la mejor opción para capturar dióxido de carbono en suelos de altitud intermedia (Montenegro y Abarca, 1999).

Los SAF incluyen prácticas sostenibles de bajos insumos que minimizan la alteración de los suelos y plantas y pueden aumentar los rendimientos de la madera lo cual contribuye a crear sumideros para el carbono en forma de árboles y productos maderables perdurables en el tiempo. También ayudan a evitar el agotamiento de las reservas o almacenamientos naturales ya existentes, reduciendo la presión sobre los bosques en áreas donde la leña es escasa. Las masas forestales ubicadas en los sistemas agroforestales pueden llegar a evitar la explotación de los bosques al suplir suficiente energía a bajos precios, y si la madera de los árboles es procesada, un 50% de ella actúa como almacén de carbono hasta su descomposición (Dixon, 1995; Stella, 1999).

La cantidad de carbono secuestrado directamente por los árboles dentro de los diferentes SAF oscila normalmente de 3 a 25 t C ha<sup>-1</sup>; en el caso de huertos caseros y taungya se logra superar las 50 t C ha<sup>-1</sup> (Kurstel y Burschel, 1993). El potencial para el almacenamiento de carbono en SAF, incluyendo el carbono del suelo, oscilan entre 12 y 228 t C ha<sup>-1</sup> (Dixon, 1995), siendo el potencial para el almacenamiento de carbono mayor en el trópico húmedo.

En algunos sistemas agroforestales se han estimado tasas de fijación de carbono desde 0,1 a 3,6 t C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Cuadro 2). El almacenamiento de CO<sub>2</sub> depende de la especie arbórea y densidad de siembra, la materia orgánica presente en el suelo, edad de los componentes, tipos de suelos, características del sitio, factores climáticos y del manejo silvicultural al que se vea sometido (Segura, 1999; Cubero y Rojas, 1999).

Cuadro 2. Potencial de diferentes especies arbóreas en diferentes densidades de siembra en plantaciones en América Central como sumideros de carbono en su biomasa aérea

Sistema Agroforestal/Especie	Densidad (árboles ha <sup>-1</sup> )	Tumos (años)	Madera para leña (t ha <sup>-1</sup> )	Tasa de fijación (t C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Almacenamiento carbono (t C ha <sup>-1</sup> )
<b>Arboles de sombra</b>					
<i>Gliricidia sepium</i>	330	30	101,4	0,7	51,6
<i>Inga desinflora</i>	400	20	42,8	0,5	24,3
<i>Mimosa scabrella</i>	650	2	18,3	2,0	24,9
<b>Plantaciones para leña</b>					
<i>Leucaena leucocephala</i>	3800	5	46,2	2,0	28,9
<i>Eucalyptus saligna</i>	1378	2,5	41,3	3,6	27,0
<b>Bosque secundario</b>					
<i>Miconia lonchophylla</i>	3400	8	54,0	1,4	31,0
<i>Lonchocarpus spp</i>	7300	3	27,8	2,0	17,9
<i>Lonchocarpus spp</i>	3400	3	10,6	0,8	7,6
<i>Cassia grandis</i>	1700	3	21,2	1,6	12,3
<b>Arboles en potreros</b>					
<i>Alnus acuminata</i>	35	30	18,3	0,1	25,0

Fuente: Kursten y Burschel, 1993.

#### a) Sistemas agroforestales con café

La forma tradicional de cultivar café requiere estar sembrado bajo un dosel forestal (Cuéllar *et al.*, 1999; Rice, 1991); en Costa Rica cerca del 75% del área cafetalera, se maneja con sombra, con intensidad que va desde muy poca hasta sombrío excesivo (ICAFFE, 1998).

Los sistemas agroforestales de café con sombra de árboles, contribuyen a los esfuerzos por reducir el efecto negativo del exceso de CO<sub>2</sub> en la atmósfera; a la vez que se conservan la biodiversidad (Brown *et al.*, 1984b; Cairns y Meganck, 1994; Radipel y Bertrand, 1999; Cuéllar *et al.*, 1999; Shand, 1997; Medina *et al.*, 1998, Harner, 1998, ANACAFE, 1995; Perfecto *et al.*, 1996).

En una investigación llevada a cabo en Ciudad Colón, Costa Rica, se obtuvo que un sistema agroforestal de café compuesto por 90 árboles de sombra de *Erythrina spp*, en crecimiento libre, y una densidad de cafetos de 5000 plantas por hectárea, se almacenó

198 t C ha<sup>-1</sup>, tomando en cuenta la parte aérea y de raíces, la vegetación herbácea, hojarasca y la materia orgánica del suelo (Fournier, 1996).

En Guatemala, Márquez (1997) realizó un estudio en parcelas permanentes de muestreo para cuantificar carbono en un sistema agroforestal de café con sombra de *Inga* y *Musa* sp, resultando un almacenamiento de 115,5 t C ha<sup>-1</sup> para todo el sistema (árboles, café, musáceas, vegetación herbácea y suelo).

En Guatemala, Alvarado *et al.* (1999) estimaron la fijación de carbono por sistemas agroforestales con café con árboles de sombra y musáceas, obteniendo, para todo el sistema (árboles, café, suelo y hojarasca), un promedio de 91,64 t C ha<sup>-1</sup>.

### **b) Sistemas silvopastoriles**

Los sistemas silvopastoriles ofrecen una alternativa sostenible al aprovechar las ventajas de varios estratos de la vegetación. Además al aumentar la biomasa no sólo se crean sumideros de carbono en forma de árboles y productos maderables, sino que se aumenta la biodiversidad animal y vegetal, ayudando a evitar el agotamiento de los recursos naturales ya existentes (Sánchez, 1999; López, 1998).

Recientemente se ha reconocido el papel de las pasturas en el ciclo del carbono; en este sentido, las gramíneas seleccionadas con altos rendimientos de biomasa y bien adaptadas tienen un rol importante en la reducción y retención de la emisión de carbono en la atmósfera mediante la producción de biomasa aérea y como de raíces, y por la deposición de materia orgánica en el suelo (Montenegro y Abarca, 1999). Por lo tanto, la combinación de pasturas y árboles es un sistema efectivo para incrementar el potencial de los recursos (ciclaje de nutrientes e interacciones) y contribuir al almacenamiento de carbono (Pomareda, 1999; Montenegro y Abarca, 1999).

Se ha estimado, que los sistemas silvopastoriles en los trópicos de América Central pueden fijar entre 0,4 a 4,3 G t C año<sup>-1</sup> (Pomareda, 1999). En un análisis presentado por Fischer *et al.* (1994) en las sabanas del neotrópico, se encontró que las pasturas mejoradas almacenan la mayor parte de carbono en las capas más profundas del perfil del suelo (más allá de la capa arable; es decir, entre 30 - 80 cm de profundidad) y que las gramíneas introducidas podrían estar fijando en el suelo de 100 a 500 M t C año<sup>-1</sup>. Según

este análisis, las pasturas *Brachiaria humidicola* y *Andropum gayanus* contribuyeron con mucho más carbono al contenido del suelo que los pastos nativos, especialmente al asociarse con alguna leguminosa.

En un estudio realizado en la Zona Norte de Costa Rica, López (1998) obtuvo que en el suelo de un potrero con pasto guinea (*Panicum máximum*), almacenaron 233 t C ha<sup>-1</sup>; mientras que en el suelo de un sistema silvopastoril con laurel (*Cordia alliodora*) se almacenó de 180-200 t C ha<sup>-1</sup>.

En Guápiles, Costa Rica, se estimó el almacenamiento de carbono sobre el suelo en un sistemas silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en combinación con pasturas *B. brizantha*, *B. decumbens*, y *P. maximum*, obteniéndose valores que oscilan de 3,7 t C ha<sup>-1</sup> a 4,7 t C ha<sup>-1</sup>, donde el componente arbóreo aporta un promedio de 76 a 94% del carbono total (Andrade, 1999).

### **2.3 Definición del servicio ambiental de almacenamiento y fijación de carbono**

El almacenamiento y la fijación de carbono, es uno de los servicios ambientales de los ecosistemas forestales y agrícolas (Brow *et al*, 1984b; Segura, 1997). La fijación de carbono se genera en el proceso de fotosíntesis realizado por las hojas de las plantas, que capturan el CO<sub>2</sub> de la atmósfera y lo desdoblan para liberar el oxígeno y dejar carbono que se utiliza para formar la biomasa de la planta, o madera en los árboles. En ese sentido, los bosques tropicales, las plantaciones forestales y las prácticas agroforestales, y en general, aquellas actividades que lleven a la ampliación de una cobertura vegetal permanente pueden cumplir la función de "sumideros de carbono" (Cuéllar *et al.*, 1999). Por otro lado, la liberación de carbono en la atmósfera se da por la respiración de las plantas y animales y por los procesos de descomposición de la materia orgánica causado por bacterias y hongos (Solomon *et al.*, 1987).

El servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono beneficia a la comunidad local y nacional, pero es generalmente aceptado que los países desarrollados son los que más se benefician de ese servicio, al compensar la concentración de carbono en la atmósfera, producto de las emisiones de gases de efecto invernadero. Actualmente, la política y la legislación en Costa Rica, en particular la Ley Forestal 7575, enfoca la

protección del recurso forestal y reconoce la importancia de la comercialización y diversificación de productos a través de la venta de servicios ambientales, entre ellos, el almacenamiento y fijación de carbono.

En la Ley Forestal (Costa Rica, 1999), en el artículo 3 inciso k, define los servicios ambientales como:

*"...los que brinda el bosque y las plantaciones forestales y que inciden directamente en la protección y mejoramiento del medio ambiente. Son los siguientes: mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (fijación, reducción, secuestro, almacenamiento y absorción), protección de agua para uso urbano, rural o hidroeléctrico, protección de biodiversidad para conservarla y uso sostenible, científico y farmacéutico, investigación y mejoramiento genético, protección de ecosistemas, formas de vida y belleza escénica natural para fines turísticos y científicos..."*

Referente a mitigación de gases de efecto invernadero por parte del recurso forestal, se utilizan varios términos como fijación, reducción, secuestro, almacenamiento y absorción; para efectos de este trabajo se usan los siguientes conceptos:

- Carbono almacenado: se refiere al carbono que está acumulado en determinado ecosistema vegetal. Toma en cuenta criterios de tipo de bosque o vegetación, densidad de la madera, factores de ajuste que son datos de biomasa basados en volúmenes por hectárea de inventarios forestales (Segura, 1997). Dicha cantidad promedio de carbono por hectárea nunca será liberada a la atmósfera, en este caso, un pago por el servicio ambiental de almacenamiento se refiere a un solo pago por la conservación del bosque, evitando un cambio de uso de la tierra en forma permanente, como lo son los parques nacionales o zonas de reserva absoluta (Ramírez *et al.*, 1994). El carbono almacenado se expresa en  $t C ha^{-1}$ .
- Carbono fijado: se refiere al carbono que una unidad de área cubierta por vegetación tiene la capacidad de fijar en un período determinado (Segura, 1997). El carbono fijado es una forma temporal de almacenamiento; por ejemplo el convenio entre el Gobierno de Noruega y Costa Rica y los Bonos de Carbono (conocidos como Certificados de Conservación del Bosque (CCB), permite el pago a los propietarios de bosque que eviten cambios en el uso de la tierra durante un período de 20 años (Ramírez *et al.*, 1994). El carbono fijado se expresa en  $t C ha^{-1} año^{-1}$ .

## 2.4 Antecedentes históricos del pago de servicios ambientales

En 1972 se realizó la Conferencia en Estocolmo sobre Ambiente Humano, la cual puede ser considerado el inicio oficial de la conciencia internacional sobre el ambiente. La cumbre de la Tierra en 1992 marcó un despertar parcial de movimiento ambiental internacional, y desde entonces, cada vez más se reconoce que los temas ambientales son fundamentales para el bienestar social y del ecosistema, así como también para el desarrollo económico sostenible (Dixon *et al.*, 1994).

En la cumbre de la Tierra en Río de Janeiro se aprobó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC), en la cual se acordó que los países industrializados deben tomar fuertes y serias medidas para estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera (Brow y Adger, 1993) ésta convención fue ratificada por 100 países asignatarios en diciembre de 1994 (Cielsa, 1996). Casi la totalidad de estos países estuvieron de acuerdo en reducir sus emisiones en el año 2000 a los niveles que tenían en 1990 (Beaumont, 1999). También durante las negociaciones de la convención se reconoció y acordó que dada la diferencia notable entre países en las emisiones históricas, en la solución del problema había "responsabilidades comunes, pero diferenciadas", por cuanto los países industrializados habían contribuido al problema en mayor medida que los países en desarrollo y, por lo tanto, correspondía a ellos en primer lugar adoptar medidas de mitigación (Ramírez, 1998).

La CMCC estableció las pautas por medio de las cuales las partes se comprometían a adoptar las medidas de mitigación a nivel nacional. También contempló la posibilidad de establecer mecanismos de mitigación de carácter internacional, dejando abierta la posibilidad de que los países industrializados, denominados países inversionistas, realicen Actividades de Implementación Conjunta (AIC) con los países en desarrollo (denominados países anfitriones porque brindan la oferta), que permitan reducir emisiones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, en cumplimiento de sus obligaciones (OCIC, 1998; Beaumont, 1999).

La base teórica de los proyectos de Implementación Conjunta es que las acciones dirigidas a disminuir las acciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), tienen el mismo

impacto sobre la capacidad de la atmósfera para atrapar calor, independientemente de donde esté la fuente y el sumidero de los gases, adaptándose desde entonces fuertemente el concepto de implementación conjunta, que es el marco mediante el cual se puede vender internacionalmente el servicio ambiental de la fijación y almacenamiento de carbono. Dado que se generó un debate sobre el alcance de la mención de las partes participantes, se decidió temporalmente desarrollar una Fase Piloto hasta el año 2000, abierta a todas las partes, por lo cual al ser esta Fase Piloto de carácter experimental, en lugar de Implementación Conjunta (IC), se decidió utilizar la denominación de Actividades de Implementación Conjunta (AIC) (Mora, 1998; Beaumont, 1999).

Con la aprobación en 1997 del Protocolo de Kyoto (Japón) se establecieron las bases para desarrollar el mercado de carbono a escala internacional. Los países industrializados se comprometieron a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 5% con respecto al nivel de emisiones de 1990 y evaluar los resultados en el período de cumplimiento, durante el quinquenio del 2008 al 2012 (OCIC, 1998).

Desde la firma del acuerdo intergubernamental de Kyoto, existe un mayor interés en el uso potencial de los bosques como mitigadores del cambio climático por medio de las IC y AIC.

#### **2.4.1 Mecanismos de desarrollo en limpio**

Como sucesor de la IC y AIC, se creó el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) basado en castigar con multas el incumplimiento por parte de los países industrializados de financiar proyectos en países en vías de desarrollo. El objetivo del MDL es "aportar el desarrollo sostenible primordial de la CMCC", así como ayudar a lograr que los países industrializados alcancen el cumplimiento de los compromisos acordados en Kyoto (INFOR, 1999; Pedroni, 1999). Las principales funciones del MDL (Beaumont, 1999):

- Velar por que los proyectos de reducción de emisiones que se propongan contribuyan al desarrollo sostenible de los países en desarrollo, bajo criterios definidos soberanamente por cada país.

- Organizar, supervisar y aprobar la certificación de las reducciones acreditables y emitir los respectivos certificados de aquellas reducciones efectivamente logradas.
- Garantizar que los certificados de reducciones de carbono provenientes de las actividades desarrolladas en países no inscritos en el anexo I, se manejen en forma transparente y equitativa.

El Mecanismo de Desarrollo Limpio fue establecido en el artículo 12 del Protocolo de Kyoto y se refiere a proyectos para la mitigación de cambio climático llevados a cabo entre los países industrializados (Países del anexo B) y los países en desarrollo (países no incluidos en el anexo B). Los propósitos principales del MDL consisten en asistir a los países del no incluidos en el anexo B a alcanzar el desarrollo sostenible, contribuir al objetivo de la CMCC de estabilizar las concentraciones atmosféricas del GEI, y asistir a los países del anexo B para alcanzar las metas de mitigación (Márquez, 2000).

La diferencia fundamental entre el MDL y la IC - AIC es que el MDL, estará sujeto a un control multilateral y será vigilado por una mesa directiva electa por las partes, lo cual difiere del concepto original de la IC - AIC, mientras que la IC - AIC permite la aplicación de proyectos directamente entre los países en desarrollo, obteniendo créditos certificados a través de los proyectos emprendidos relacionados con el establecimiento de nuevas áreas forestales (Ramírez, 1998; Beaumont, 1999; Herz, 1999).

#### **2.4.2 Desarrollo de políticas**

En 1992, el Informe sobre el Desarrollo del Mundo del Banco Mundial enfocó las relaciones entre desarrollo y ambiente y destacó oportunidades de políticas de "ganar - ganar" que son buenas tanto para el ambiente, como para el desarrollo económico. El Fondo Ambiental Mundial (conocido como GEF, su sigla en inglés), fue establecido para apoyar, con fondos de donaciones, el costo de las actividades incrementales que tienen beneficios globales y que no podrían ser justificadas económicamente en un marco de contabilidad nacional<sup>2</sup>(Dixon *et al.*, 1994).

---

<sup>2</sup> La fase inicial del GEF (más de 10 millones de dólares para el período 1991-1994) se enfocó en cuatro áreas de proyectos específicos: protección de la biodiversidad, reducción de las emisiones de gases de invernadero, reducción de los CFC para proteger la capa de ozono (Protocolo de Montreal), y el control de la contaminación de las aguas internacionales. El GEF

Debido a una serie de desventajas potenciales que puede generar el uso del término contrapartida de emisiones de carbono, surge la necesidad de establecer una política y un marco regulador para los proyectos en el ámbito internacional (Beaumont, 1999), debido a que gran parte de las iniciativas de apoyo han tenido origen en Estados Unidos (OCIC, 1998).

Costa Rica ha sido uno de los primeros países reconocido a escala mundial en desarrollar políticas orientadas a favorecer el manejo y conservación de los recursos forestales, en desarrollar un marco legal e institucional y crear una valoración de los costos de los servicios ambientales. En especial, el costo de mitigación GEI, y la internalización de estos costos por medio del Pago de Servicios Ambientales (PSA) a la actividad forestal privada, así como la comercialización internacional de las reducciones de las emisiones certificadas de GEI, generadas en la ejecución de proyectos de AIC (Asamadu, 1998; Mora, 1998; Segura, 1999).

En la Ley Forestal N° 7575, de Costa Rica aprobada en 1997, se establece el sistema de Pago de Servicios Ambientales (PSA), y el mecanismo de pago con un esquema novedoso de financiamiento a través del impuesto a los combustibles. Esta Ley constituye un cambio fundamental en el concepto de incentivos forestales que se venía desarrollando debido a que se reconocen los servicios ambientales (fijación y almacenamiento de carbono, protección de la biodiversidad, protección del recurso hídrico, protección a la belleza escénica) que genera el bosque. Se brinda, por lo tanto, un eficaz instrumento para enfrentar los retos de un mercado globalizado y con mayor grado de concientización ambiental (Manso, 1998).

Costa Rica ha sido un de los primeros países en desarrollar AIC y además es considerado mundialmente como un modelo de replicar en países en desarrollo (Manso, 1998). La Oficina de Implementación Conjunta (OCIC), se crea en Costa Rica como una alianza estratégica entre el Ministerio del Ambiente y la Energía (MINAE), la Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central (FUNDECOR), el Consejo de Iniciativas para el Desarrollo (CINDE) y la Asociación de Productores de Energía (ACOPE).

---

es apoyado por países de todo el mundo y es implementado por el Banco Mundial, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente.

Varias funciones desempeña la OCIC, sin embargo, la más relevante es el asesoramiento que brinda al MINAE en todo lo referente al cambio climático jugando el papel de contralor de la calidad de los diversos proyectos de fijación y almacenamiento de carbono (Mora, 1998).

En Costa Rica, hasta 1998 existían once proyectos de AIC aprobados por la Secretaría de la CMCC; cinco proyectos de generación de energía con fuentes renovables, cinco forestales (Cuadro 3) y uno del sector agrícola (OCIC, 1998).

Cuadro 3. Proyectos del sector forestal en Costa Rica relacionados con CO<sub>2</sub>

Nombre del proyecto	Tipo de proyecto	Área (ha)	Costo total (US\$mill)	Duración (años)	Reducción Emisiones/Secuestro	
					(t C)	(t CO <sub>2</sub> )
ECOLAND*	Conservación	2340	1,0	15	345548	1267124
CNFL	Consr/Rege/Refo	4000	3,3	25	313646	1150139
P.A.P*	Conservación	530000	150	25	180000000	66000000
EARTH	Reforestación	78	0,164	20	2068	7582
KLINK*	Reforestación	6000	3,3	40	1968000	7216656
Total		542418	158264	125	20629262	75641501

(\*)Proyectos aprobados por medio de la OCIC de los Estados Unidos (USJI). Fuente: OCIC (1998).

Los proyectos de energía y dos proyectos forestales ya obtuvieron financiamiento (Tattenbach y Pedroni, 1999), lo que significa que por medio de la OCIC y las AIC a la fecha se ha logrado una inversión del orden de los US\$140 millones en Costa Rica (OCIC, 1998).

## 2.5 Valoración económica del servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono

A nivel internacional se han generado mucha discusión sobre la valoración de los servicios ambientales y la concientización de la sociedad para retribuir económicamente y compensar a los propietarios de los ecosistemas que aportan servicios ambientales (Gregerson *et al.*, 1999).

La valoración de los servicios ambientales en Costa Rica ha sido un tema de importancia relevante en los últimos años debido no sólo a la gama de servicios que genera un ecosistema, sino a la forma de valorar cada servicio o bien ambiental dentro del sistema. Las interacciones dentro de un ecosistema no hacen posible que se pueda pagar cada bien por separado, como la conservación de la biodiversidad, producción y protección del recurso hídrico, belleza escénica natural para fines científicos y turísticos, dada la difícil cuantificación física por unidad de área que podría resultar del bien (Montenegro y Abarca, 1999; Otárola y Venegas, 1999).

Sin embargo, el servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono por un determinado ecosistema puede ser cuantificado en forma física y por componente dentro del mismo (árbol, planta, materia orgánica depositada arriba del suelo, suelo, etc). Servicio ambiental que, por consiguiente, resulta de sumo interés dado que es posible realizar negociaciones al conocer la cantidad de carbono retenido o almacenado por diferentes ecosistemas.

Actualmente en el País se otorgan a la sociedad civil, por medio del pago de servicios ambientales, diferentes montos los cuales reflejan una valoración total por servicios ambientales brindados conjuntamente y no por servicio ambiental en forma individual, lo que hace difícil la identificación de por cual servicio y expresión monetaria se le debe de compensar al propietario del bien (Otárola y Venegas, 1999).

El almacenamiento de carbono, fue uno de los primeros servicios ambientales en ser negociado internacionalmente entre Costa Rica y Noruega, obteniendo en dicha negociación un precio de \$ 10 t C, mientras que a nivel nacional se han negociado y desarrollado proyectos por medio de la Oficina de Implementación Conjunta ECOLAND;CNFL; P.A.P; EARTH; KLINK, (OCIC, 1998) utilizando el precio de por tonelada de carbono de \$5.

### **Valoración y retribución por el servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono brindado por los sistemas agroforestales**

El servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono debe de ser reconocido para los diferentes usos de la tierra que contribuyan, no sólo los bosques (Gregerson *et*

*al.*, 1999). Según el IPCC (2000), se establecen criterios de pago para negociaciones futuras, contabilizando en el momento de la negociación el carbono fijado y/o almacenado de acuerdo a la función de las tierras y/o en función de la actividad, con lo que se da cabida a cuantificar y valorar nuevos y diversos ecosistemas que brinden el servicio ambiental de fijación y/o almacenamiento de carbono. Se otorga, consecuentemente, la opción de cuantificar el carbono almacenado y/o fijado por sistemas agroforestales y otros usos de la tierra, justificando la retribución monetaria por el servicio ambiental brindado a la sociedad.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Sistemas evaluados

En el estudio se evaluaron los siguientes sistemas de producción:

1. *Coffea arabica* (café), de 9 a 10 años, asociado con *Eucalyptus deglupta* (eucalipto) de cuatro años.
2. *C. arabica*, de 9 a 10 años, asociado con *E. deglupta* de seis años.
3. *C. arabica*, de 9 a 10 años, asociado con *E. deglupta* de ocho años.
4. *C. arabica* (de 9 a 10 años) asociado con *Erythrina poeppigiana* (poró) de > 10 años.
5. *C. arabica* (de 9 a 10 años) en monocultivo.
6. *Brachiaria brizantha* (pasto brachiaria), de dos años, asociada a *E. deglupta* de tres años.
7. *B. brizantha*, de dos años, asociada a *Acacia mangium* (acacia), de tres años.
8. *B. brizantha* de dos años en monocultivo.
9. *Ischaemun indicum* (pasto ratana), de más de cinco años, en monocultivo.

Para efectos del presente estudio, se utiliza el término sistema agroforestal con café para hacer referencia a los sistemas de café - eucalipto y café - poró, y sistemas silvopastoriles para referirse a las asociaciones brachiaria - eucalipto y brachiaria - acacia. Los sistemas en monocultivo corresponden a café, pasto brachiaria y pasto ratana a pleno sol. En el anexo 1 aparece una descripción breve de todas las especies vegetales utilizadas en el estudio.

#### 3.2 Localización de los sitios experimentales

La evaluación de los sistemas de producción con café se realizó en los cantones de Grecia y Naranjo, provincia de Alajuela, en el Valle Central de Costa Rica, que corresponde a la zona cafetalera predominante del País. Para el caso de los sistemas con pastos, la zona de estudio se localizó en los cantones de Guácimo y Pococí, en la zona Atlántica de Costa Rica, en la cual uno de los usos de la tierra predominantes es la ganadería, tanto en sistemas silvopastoriles como en pasturas a pleno sol.

El cantón de Naranjo se ubica en la provincia de Alajuela, Costa Rica. Las coordenadas geográficas medias del cantón corresponden a 10° 06' Latitud Norte y 84° 23' Longitud Oeste. Se ubica en una altitud entre 1000 y 1100 msnm. La precipitación promedio anual es de 2000 mm y la temperatura promedio de 21 °C. En este cantón se pueden identificar las siguientes zonas de vida de acuerdo a Holdridge (1978): Bosque Húmedo, Bosque Muy Húmedo Montano Bajo y Bosque Muy Húmedo Premontano, Entre las principales actividades agropecuarias de la región está el cultivo de café y de la caña (Chinchilla 1987). Los suelos predominantes son litosoles y andosoles (IFAM, 1981).

El cantón de Grecia pertenece a la provincia de Alajuela. Las coordenadas geográficas medias del cantón corresponden 10° 24' Latitud Norte y 84°12' Longitud Oeste. Se encuentra entre 1000 y 1290 msnm. La precipitación promedio anual es de 2275 mm y la temperatura media de 23.8 °C. En esta zona existen las siguientes zonas de vida (Holdridge, 1978): Bosque Húmedo, Bosque Muy Húmedo Montano Bajo y Bosque Muy Húmedo Premontano. Los suelos predominantes son latisoles, andosoles y latosoles (IFAM, 1981).

El cantón de Pococí pertenece a la provincia de Limón, Zona Atlántica de Costa Rica. Las coordenadas geográficas medias corresponden a 10° 13' Latitud Norte y 83° 46' Longitud Oeste. La altitud del cantón está entre 200 y 230 msnm. La precipitación promedio anual es de 4380 mm y la temperatura media de 24.6 °C. La zona corresponde predominantemente a la zona de vida Bosque Muy Húmedo Tropical. Entre las principales actividades agropecuarias de la zona están la producción de banano, tubérculos, frutas y ganadería (Chinchilla 1987). Los tipos de suelo predominantes son regosoles, latosoles y andosoles (IFAM, 1981).

El cantón de Guácimo también pertenece a la provincia de Limón. Se encuentra ubicado a 10° 12' Latitud Norte y 83° 37' Longitud Oeste. La altitud oscila entre 96 y 114 msnm. La precipitación promedio anual es de 3125 mm y la temperatura media de 25 °C. Según Holdridge (1978) la zona corresponde predominantemente a la zona de vida Bosque Húmedo Tropical. Entre las principales actividades agropecuarias son similares a las de Pococí: producción de banano, tubérculos, frutas y ganadería (Chinchilla 1987). Los tipos de suelo también son similares a los de Pococí.

### 3.3 Variables evaluadas en los sistemas de producción

En el cuadro 4 se resumen las variables evaluadas en los diferentes sistemas de producción:

Cuadro 4: Variables evaluadas en los sistemas de producción con café y pasturas.

Sistema	Variable
Agroforestal <i>C. arabica</i> con <i>E. deglupta</i> de cuatro años de edad	Biomasa y carbono almacenado en el árbol Biomasa y carbono almacenado en la planta de café Biomasa y carbono almacenado en la hojarasca Materia orgánica y carbono almacenado del suelo
Agroforestal <i>C. arabica</i> con <i>E. deglupta</i> de seis años de edad	Biomasa y carbono almacenado en el árbol Biomasa y carbono almacenado en la planta de café Biomasa y carbono almacenado en la hojarasca Materia orgánica y carbono almacenado del suelo
Agroforestal <i>C. arabica</i> con <i>E. deglupta</i> de ocho años de edad	Biomasa y carbono almacenado en el árbol Biomasa y carbono almacenado en la planta de café Biomasa y carbono almacenado en la hojarasca Materia orgánica y carbono almacenado del suelo
Agroforestal <i>C. arabica</i> con <i>E. poeppigiana</i>	Biomasa y carbono almacenado en el árbol Biomasa y carbono almacenado en la planta de café Biomasa y carbono almacenado en la hojarasca Materia orgánica y carbono almacenado del suelo
<i>C. arabica</i> a plena exposición solar	Biomasa y carbono almacenado en la planta de café Biomasa y carbono almacenado en la hojarasca Materia orgánica y carbono almacenado del suelo
Silvopastoril <i>B. brizantha</i> con <i>A. mangium</i> de tres años de edad	Biomasa y carbono almacenado en el árbol Biomasa y carbono almacenado en la pastura Materia orgánica y carbono almacenado del suelo
Silvopastoril <i>B. brizantha</i> con <i>E. deglupta</i> de tres años de edad	Biomasa y carbono almacenado en el árbol Biomasa y carbono almacenado en la pastura Materia orgánica y carbono almacenado del suelo
<i>B. brizantha</i> a plena exposición solar	Carbono almacenado en la pastura Materia orgánica y carbono almacenado del suelo
<i>I. indicum</i> a plena exposición solar	Biomasa y carbono almacenado en la pastura Materia orgánica y carbono almacenado del suelo

### **3.4 Selección y descripción de las unidades experimentales**

#### **3.4.1 Sistemas de producción con café**

Para la selección de los sitios donde se realizaron los estudios, se efectuó primeramente un recorrido y sondeo para ubicar e identificar los sistemas de producción de café a pleno sol y café asociado con árboles. Así mismo, se tomó información sobre la edad y tipo de manejo general (variedades, densidades de siembra, tipo de poda, etc.) de las plantaciones, especies arbóreas asociadas, área de siembra aproximada, propietario y su disposición a colaborar en el estudio, etc. Con base en esa información se definió el marco de lista, a partir del cual se seleccionó las plantaciones donde se establecieron las parcelas de muestreo.

Para el marco de lista los requisitos de las plantaciones fueron los siguientes: café de la variedad Catuaí, de 9 a 10 años, densidad de siembra homogénea; árboles de eucalipto plantados a distanciamientos homogéneos, y edades de 4, 6 y 8 años; árboles de poró bajo manejo (poda), con distancia de siembra homogénea y más de 9 años de establecidos como sombra del café; topografía plana o con poca pendiente (menos de 10%).

#### **Unidades de muestreo en sistemas de producción con café**

Con base en el marco de lista, se seleccionaron cuatro fincas, donde se establecieron las unidades de muestreo. Estas fincas correspondieron a los siguientes usos de la tierra: café variedad Catuaí asociado a eucalipto de cuatro años, café Catuaí asociado a eucalipto de seis, café Catuaí asociado a eucalipto de ocho años, café Catuaí asociado a poró y café Catuaí a pleno sol.

En cada plantación seleccionada al azar, cuyas características se detallan en el cuadro 5 y el anexo 2, se ubicaron nueve unidades de muestreo para cada sistema evaluado, para un total de 45 parcelas de muestreo.

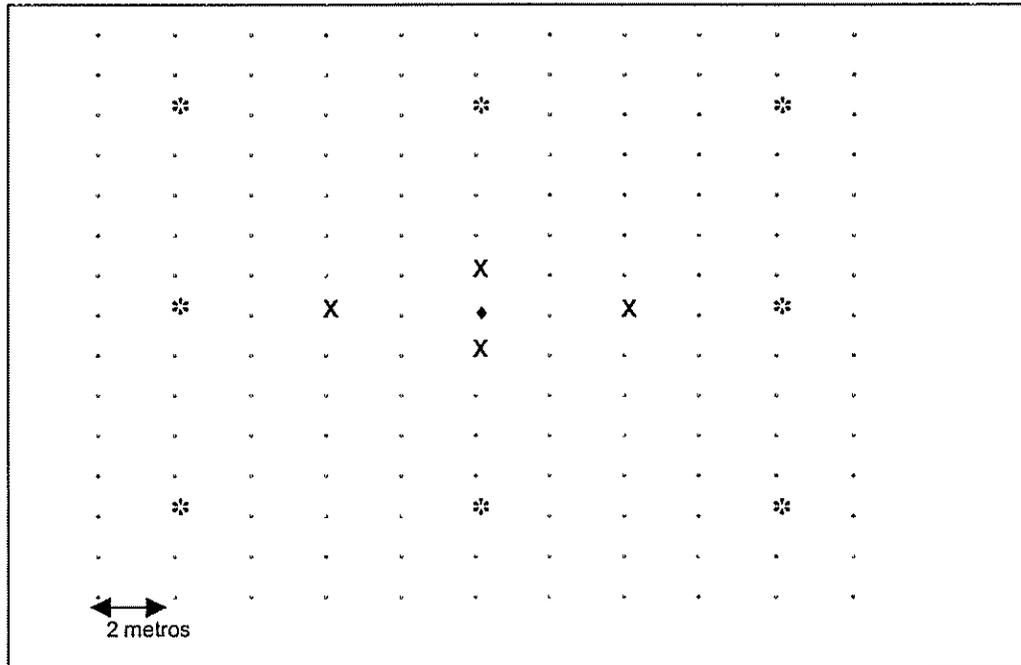
Cuadro 5. Características de las plantaciones seleccionadas para realizar las evaluaciones de café.

Sistema	Variedad de café	Distancia de siembra entre hileras y entre plantas (m)	Especie de árbol	Edad del árbol (años)	Distancia de siembra entre hileras y entre árboles (m)
Café a pleno sol	Catuái	1,2 x 2	-	-	-
Café + árbol	Catuái	1,2 x 2	<i>E. deglupta</i>	4	6 x 6
Café + árbol	Catuái	1,2 x 2	<i>E. deglupta</i>	6	8 x 8
Café + árbol	Catuái	1,2 x 2	<i>E. deglupta</i>	8	8 x 8
Café + árbol	Catuái	1,2 x 2	<i>E. poeppigiana</i>	>10	8 x 8

Las parcelas experimentales de café asociado con árboles fueron de forma rectangular y su área varió en función de la distancia de siembra de los árboles. Para el eucalipto de cuatro años, que estaba sembrado a 6 x 6 m, el área fue de 432 m<sup>2</sup> (24 m de largo por 18 m de ancho); para el eucalipto de seis y ocho años y el poró, la distancia de siembra fue de 8 x 8 m, para un área de muestreo de 768 m<sup>2</sup> (32 m de largo por 24 m de ancho). Para el café a pleno sol, el área de la parcela de muestreo fue de 200 m<sup>2</sup>.

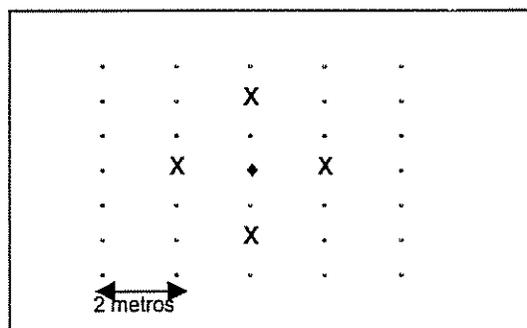
En todos los casos, la distancia de siembra del café fue de 2 m entre hileras y 1.20 m entre plantas. Así mismo en las nueve parcelas de muestreo en cada sistema, la muestra consistió de cuatro plantas de café y cuatro árboles (Figura 1) para extraer las muestras para determinar la fracción de carbono contenida en la biomasa del fuste, pero para estimar los modelos de biomasa se hicieron mediciones de altura y diámetro a la altura de pecho a todos los árboles de la parcela. En las parcelas a pleno sol también se muestrearon cuatro plantas (Figura 2).

Para la ubicación de cada unidad de muestreo de las parcelas café-árboles se siguió el siguiente procedimiento: partir de un borde de la parcela se caminaron diez pasos hacia el centro de la plantación y se seleccionó la primera hilera de cuatro árboles, la cual constituyó la primera de las tres filas a considerar. Seleccionadas las filas se ubicaron las cuatro hileras de árboles. La ubicación de las plantas de café se realizó tomando dos plantas a 1,20 metros entre plantas y dos a 3 metros entre hileras de café (para el distanciamiento de 6 x 6, en distanciamiento de 8 x 8 se tomaba la planta a los 4 metros). Se realizó en forma rotativa entre los árboles hasta completar las cuatro plantas.



·: Planta de café; \*: Arbol; ♦:Arbol seleccionado para extraer la muestra para determinar la fracción de carbono.  
 X: Planta de café seleccionada para determinar la fracción de carbono , la biomasa, la muestra de suelo y hojarasca.

Figura 1: Plano descriptivo de la parcela en el sistema de café con árboles.



·: Planta de café; ♦: Planta de café seleccionada como eje central de la parcela  
 X: Planta de café seleccionada a partir del eje central de la parcela; para determinar la fracción de carbono, la biomasa, la muestra de suelo y hojarasca.

Figura 2: Plano descriptivo de la parcela en el sistema de café a pleno sol.

En el caso de las parcelas a pleno sol, a partir de un borde se caminaron diez pasos hacia el centro de la plantación y se tomó al azar una planta de café, la planta seleccionada constituyó el eje central de la parcela a establecerse. A partir de la planta seleccionada se ubicaron cuatro plantas: dos a 1,0 m (entre plantas) y dos a 2 m (entre hileras) a partir de la planta escogida como eje central. Las nueve parcelas dentro de la plantación se escogieron aleatoriamente.

En cada una de las unidades o parcelas de muestreo se evaluaron los siguientes componentes para la determinación de carbono: el árbol, el cafeto, la hojarasca y del suelo pero sin incluir, en este último caso, la biomasa radicular de diámetro mayor a 0,25 mm.

La muestra para la determinación de carbono en el tallo del árbol se tomó a una altura de 40 cm sobre el suelo, mediante un taladro manual (Segura, 1997). Para el café el sistema de muestreo fue similar, pero se realizó a una altura de 15 cm sobre el suelo. Para la hojarasca se utilizó un marco de 50 x 50 cm, obteniéndose cuatro muestras; dos a 15 cm y dos a 100 cm, a partir del eje de cada una de las plantas de café (Figuras 1 y 2) que fue cortadas para evaluar su biomasa. Luego se mezcló todas las muestras juntas y se obtuvo su peso, y se extrajo una submuestra compuesta por parcela de 250 g, para análisis en el laboratorio y posterior determinación de su biomasa y contenido de carbono (anexo 3). Para el suelo, se tomaron muestras con un barreno, hasta 30 cm de profundidad, en los mismos sitios donde se tomaron las muestras de hojarasca; de manera similar, se homogenizaron las submuestras y se obtuvo una muestra compuesta de 250 g para análisis de porcentaje de carbono en el laboratorio. Adicionalmente se tomaron muestras para determinar la densidad aparente del suelo (anexo 4), dato necesario para estimar finalmente el contenido de carbono.

A cada una de las cuatro plantas de café se les midió su altura y diámetro a 15 cm del suelo para estimar, por medio de un modelo, la biomasa del café. El modelo de mejor ajuste fue de la forma :

$$e^B = a + b \times e^{(H/c)}$$

[1]

donde:

B es la biomasa en kilogramos por cafeto, a, b y c son constante, H es la altura del cafeto (m). En este caso los valores de a, b y c fueron -46,46, 6,52 y 0,81 respectivamente. Para efectos de cálculo se utilizó la fórmula tal cual en el programa excel, luego se obtuvo el logaritmo natural para obtener la biomasa ( $\ln e^B = B$ ).

Aunque el ajuste del modelo fue muy bajo ( $r^2 = 0,28$ ), debido a la gran variabilidad de los datos (anexo 5), el modelo se utilizó ya que se logró una buena determinación de la biomasa de los cafetos, tomando como referencia su aplicación a los datos de biomasa de 88 plantas de café que se destruyeron en el campo.

La determinación de la materia seca de la hojarasca se obtuvo utilizando la siguiente fórmula:

$$MS\% = (PSM/PFM)/100 \quad [3]$$

donde:

MS es el porcentaje de materia seca, PSM es el peso seco de la muestra en gramos y PFM es el fresco en el campo en gramos. En el anexo 6 se describe el procedimiento utilizado para extraer las muestras para determinación de materia seca. La biomasa obtenida en gramos se transformó en toneladas por hectárea.

La estimación de la biomasa de la hojarasca se realizó por medio de la siguiente ecuación:

$$B = PFC \times (MS/100) \quad [2]$$

donde:

B es la biomasa de la hojarasca en gramos, PFC es el peso fresco tomado en el campo en gramos, y MS es la materia seca de la hojarasca en gramos.

A todos los árboles de eucalipto de la parcela se les midió la altura y el diámetro a la altura de pecho. Con esa información se utilizó el modelo propuesto por Andrade (1999) ( $R^2=0,99$ ;  $p>0,001$ ) en la zona Atlántica; dado que no fue posible realizar una ecuación para estimar la biomasa por árbol en el Valle Central

$$B = 4,24 + 0,052 \times dap^2 + 1,05H \quad [4]$$

donde:

B es la biomasa aérea (kg MS árbol<sup>-1</sup>), dap es el diámetro a la altura de pecho (cm), H es la altura del árbol (m).

En el caso de los árboles de poró, se midió la altura del fuste o poste, el diámetro a la altura del pecho, la altura y tres diámetros de cada protuberancia (lugar donde salen la mayoría de las ramas que son manejadas mediante poda). Con esa información se estimó el volumen y biomasa de cada árbol con base en las siguientes fórmulas:

$$V = V_p + V_{c_1} + V_{c_2} + \dots + V_{c_n} \quad [5]$$

donde:

V es el volumen<sup>3</sup> (m<sup>3</sup> árbol<sup>-1</sup>), vp es el volumen del fuste o poste (m<sup>3</sup>) y Vc es el volumen de cada cabeza o protuberancia (m<sup>3</sup>).

El volumen del fuste corresponde a:

$$V_p = [dap^2 \times (\pi/4)] \times (H_p) \quad [6]$$

donde:

Vp es el volumen del fuste (m<sup>3</sup>) y (dap<sup>2</sup> x (π/4)), corresponde al área basal del fuste en m<sup>2</sup>, donde dap es el diámetro a la altura del pecho (m), Hp es la altura total del fuste o poste (m).

El volumen de la cabeza o protuberancia se estimó mediante la siguiente fórmula:

$$V_c = [(d_1 + d_2 + d_3) \div 3]^2 \times \pi/4 \times H_c \quad [7]$$

donde:

Vc es el volumen de la cabeza o protuberancia (m<sup>3</sup>), donde [(d<sub>1</sub>+d<sub>2</sub>+d<sub>3</sub>)÷3]<sup>2</sup> x π/4) corresponde al área basal de la cabeza en m<sup>2</sup> y d<sub>1</sub>+d<sub>2</sub>+d<sub>3</sub>, son los diámetros en la parte baja, media y alta de la cabeza o protuberancia (m) y Hc es la altura (m) independiente de la misma por encima del fuste o poste.

---

<sup>3</sup> No se utilizó un factor de forma o corrección debido a que el DAP refleja el diámetro promedio del largo del fuste; el cual es muy corto y de forma cilíndrica.

Con el volumen estimado se cálculo la biomasa del árbol con la siguiente fórmula:

$$B = V \times GE \quad [8]$$

donde:

B es la biomasa aérea<sup>3</sup> (t árbol<sup>-1</sup>), V es el volumen (m<sup>3</sup> árbol<sup>-1</sup>), y donde GE es la gravedad específica de la madera (0,25 t m<sup>3</sup>), cuyo procedimiento de determinación se presenta en el anexo 7.

### Cálculo del carbono almacenado o fijado

#### Carbono almacenado

Para la estimación de carbono almacenado en el café, la hojarasca y los árboles se utilizó la siguiente fórmula que basa en la biomasa y la fracción de carbono:

$$CA = B \times fc \quad [9]$$

donde:

CA es el carbono almacenado (t C ha<sup>-1</sup>), B es la biomasa total (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) y fc es la fracción del carbono en la biomasa.

Para la estimación del carbono almacenado en el suelo se utiliza la fórmula que relaciona el porcentaje de carbono en el suelo con la densidad aparente del mismo y la profundidad del mismo:

$$CA = \%CS \times DA \times P \quad [10]$$

donde:

CA es el carbono almacenado, %CS es el porcentaje de carbono en el suelo, DA es la densidad aparente del suelo y P la profundidad. El porcentaje de carbono en el suelo se estima a partir de la materia orgánica en el suelo mediante la siguiente fórmula:

$$\%CS = \frac{\%MOS}{1,724}$$

---

<sup>3</sup> No incluye la biomasa del follaje debido a que en el momento del muestreo los árboles habían sido podados, se estimó su follaje aplicando el factor de expansión a la biomasa de 1,24 (Beer *et al.*, 1990).

donde:

%CS, es el porcentaje de carbono en el suelo, %MOS es el porcentaje de materia orgánica en el suelo y 1,724 es el factor de ajuste del método Walkley y Black.

### **Tasa de fijación de carbono de los árboles**

Se estimó utilizando el carbono almacenado por el árbol y dividiendo su valor en la edad del mismo:

$$CF = CA / \text{Edad del árbol}$$

[12]

donde:

CF es la tasa de fijación de carbono ( $t\ C\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ), CA es el carbono almacenado ( $t\ ha^{-1}$ ), Edad del árbol, corresponde a la edad del árbol en años.

### **3.4.2 Sistemas de producción con pastos**

En los sitios de estudio se realizó un sondeo para identificar los sistemas de pasturas a pleno sol y pasturas asociadas con árboles. Se obtuvo información sobre el manejo general realizado a los árboles, área aproximada de pastura, así como la disponibilidad de colaboración por parte del propietario de la finca en donde se ubicaban los sistemas de pastura con árboles. Para las pasturas a pleno sol, se visitaron varias fincas en los sitios de estudio y se obtuvo información sobre edad aproximada de la pastura, manejo de la misma y rotación del ganado en la finca; con la información recopilada se definió el marco de lista a partir del cual se establecieron de manera aleatoria las parcelas.

La inclusión de las fincas dentro del marco de lista dependió de los siguientes requisitos: pasto ratana a pleno sol con más de cinco años de establecido (asegurando que por lo menos esos años no se haya dado cambio de uso de la tierra, tomando en consideración que el pasto ratana crece libremente en la región), pasto brizanta a pleno sol con dos años de establecido (para lograr comparaciones con el pasto de los sistemas silvopastoriles); los sistemas silvopastoriles debían de contar con pasto brizantha bajo sombra de eucaliptos y pasto brizantha bajo sombra de acacia; el pasto debía contar con dos años de establecido y los árboles con tres años de edad.

## Unidades de muestreo en sistemas de producción con pasto

Con base en el marco de lista obtenido, se seleccionaron tres fincas diferentes (una para el pasto ratana a pleno sol, una para pasto brizanta a pleno sol; una para los sistemas silvopastoriles) en las cuales se establecieron las unidades de muestreo. Los usos de la tierra de acuerdo a cada finca correspondió a pasto *I. indicum* a pleno sol, pasto *B. brizantha* a pleno sol, pasto *B. brizantha* asociado con *A. mangium* de tres años y pasto *B. brizantha* asociado con *E. deglupta* de tres años, tal como se detalla en el cuadro 5. Se ubicaron 20 unidades de muestreo para los sistemas silvopastoriles (8 para el sistema brizanta - mangium y 12 para el sistema brizanta - deglupta) y 9 unidades de muestreo para cada uno los sistemas a pleno sol, para un total de 38 parcelas de muestreo.

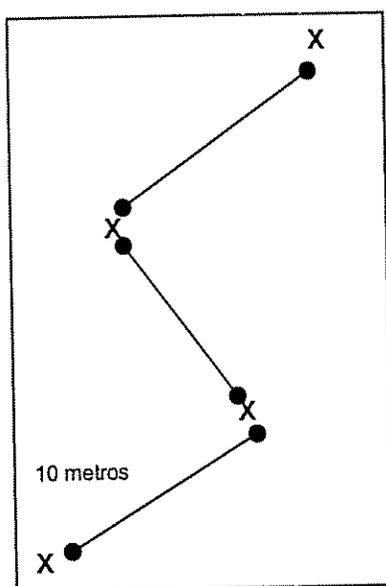
Cuadro 6. Características de las fincas seleccionadas para realizar las evaluaciones en pasturas.

Sistema	Pastura	Especie de árbol	Edad del árbol (años)	Distancia de siembra entre hileras y entre árboles (m)
Pasto a pleno sol	<i>I. indicum</i>	-	-	-
Pasto a pleno sol	<i>B. brizantha</i>	-	-	-
Brizantha + árbol	<i>B. brizantha</i>	<i>E. deglupta</i>	3	9 x 3
Brizantha + árbol	<i>B. brizantha</i>	<i>A. mangium</i>	3	9 x 3

Dentro de cada una de las fincas correspondientes a sistemas a pleno sol se ubicaron nueve sitios libres de pendientes, o que presentaran alguna característica poco representativa del sistema de producción y de las condiciones presentes (pendientes, sitios ondulados con acumulación de agua por efectos de la lluvia, puntos de crecimiento de vegetación diferente a la estudiada). En cada uno de ellos, se realizaron transectos lineales. En el recorrido de cada transecto se utilizó un marco de 50 x 50 cm (0,25 m<sup>2</sup>), obteniendo cuatro submuestras del material vegetal cortado al ras del suelo y dentro del área del marco. Luego las submuestras se mezclaron y se obtuvo una muestra compuesta de 250 g por transecto para determinar la biomasa y contenido de carbono (Figura 3).

Para las parcelas con árboles se utilizaron parcelas de forma rectangular que consistieron en seis hileras de árboles (distancia 9 x 3 m), con una longitud de 33 metros (1782 m<sup>2</sup>); alrededor de cada parcela se dejó un borde de tres metros hasta el próximo árbol, para un área efectiva de 594 m<sup>2</sup>.

La ubicación de cada uno de los nueve transectos se realizó en sitios representativos del sistema. Dentro de cada uno de los transectos se ubicó el marco de 50 x 50 cm cada 10 metros hacia el frente y caminando en forma de zigzag se colectó una submuestra de pastura, cada cuatro submuestras conformaban la muestra compuesta del transecto.



**X** : Sitio de muestreo

Figura 3: Plano descriptivo de la parcela en el sistema de pasturas a pleno sol.

Para determinar el carbono en los árboles se midió a cada árbol el diámetro a la altura de pecho y la altura total, utilizando posteriormente los modelo de estimación de biomasa para cada una de las especies propuesto por Andrade (1999).

$$A. mangium: B = 3.44 + 0,064 \cdot dap^2 + 1,03 H$$

[13]

$$E. deglupta: B = 4,24 + 0,052 \cdot x \cdot dap^2 + 1,05 H$$

donde:

B es la biomasa aérea (kg MS árbol<sup>-1</sup>), dap, es el diámetro a la altura de pecho (cm), H es la altura total (m).

La cantidad de carbono almacenado en los árboles se obtuvo aplicando la formula [9], mientras que el carbono fijado se utilizó la formula [12] con una fracción de carbono de 0,46, obtenida por Andrade (1999).

Las muestras para la determinación de la biomasa y el carbono para la pastura se obtuvo con ayuda de un marco de 50 x 50 cm. Para tomar la muestra de pasto en sistemas silvopastoriles se seleccionaron cuatro árboles intercalados dentro de las hileras (Figura 4), y a partir de cada uno de ellos, se colectaron cuatro muestras de pasto: dos a 4,5 metros (entre hileras) y dos a 1,5 metros (entre árboles). Obtenidas las submuestras se mezcló el material vegetal y se extrajo una submuestra de 250 g para los respectivos análisis (anexo 9).

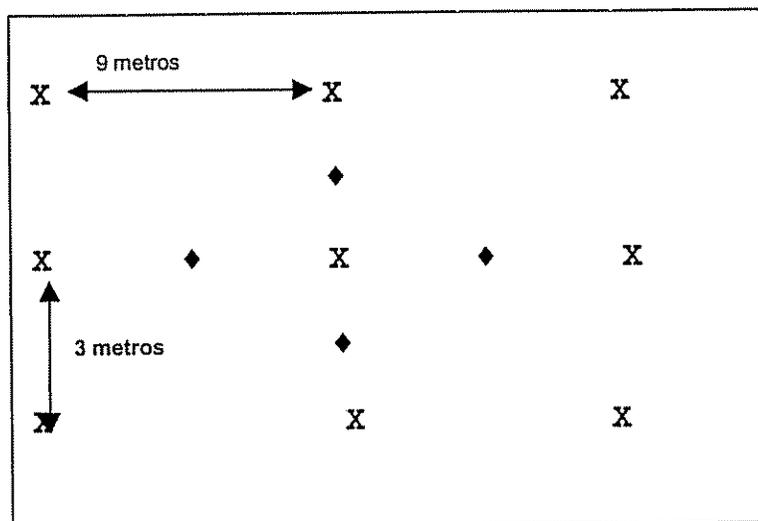
La biomasa de la pastura fue evaluada mediante muestreos después de cada pastoreo durante los meses de mayo, junio y julio. Tanto los sistemas silvopastoriles, como los sistemas de pasturas a pleno sol, fueron sometidos a pastoreos con una carga animal de 3 U A ha<sup>-1</sup> y 1 U A ha<sup>-1</sup> respectivamente. El periodo de pastoreo fue de 10 días con un descanso de 22 días.

El cálculo de la biomasa del pasto se realizó en base de la biomasa residual en el campo, con la siguiente fórmula:

$$B = B_f \times (\%MS) \quad [15]$$

donde:

B es la biomasa seca de la pastura (kg MS ha<sup>-1</sup>), B<sub>f</sub> es la biomasa fresca residual en el campo después del pastoreo (kg MS ha<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup>), MS% es la materia seca en porcentaje, obtenida mediante la fórmula [3].



◆ : Sitio de muestreo ; X : Árbol seleccionado como referencia

Figura 4: Plano descriptivo de la parcela en sistemas silvopastoriles *B. brizantha* - *A. mangium*; *B. brizantha* - *E. deglupta*.

Las áreas de muestreo se establecieron dejando libre los primeros 3 metros alrededor formando parcelas rectangulares de 594 m<sup>2</sup> (33 m de largo por 18 m de ancho). Alrededor de cada uno de los árboles seleccionados se ubico a dos distancias diferentes (1,5 m entre árboles y 4,5 m entre hileras), el marco de 50 x 50 cm, obteniendo con ello las cuatro muestras de pastura por parcela.

El carbono almacenado de pasturas se obtuvo al multiplicar la biomasa de la pastura por la fracción de carbono (0,50) sugerida por Brown y Lugo (1994b) y utilizando la fórmula [10].

Para el suelo, se tomaron las muestras con un barreno hasta 30 cm de profundidad, en los mismos sitios donde se tomaron las muestras de pasturas, de igual forma que la pastura, se homogeneizó y se obtuvo una submuestra compuesta de 250 g para análisis de porcentaje de carbono en el laboratorio. En forma adicional se tomaron muestras para

determinar la densidad aparente del suelo, dato necesario para calcular el contenido de carbono en el suelo.

### 3.4<sup>5</sup> Valoración económica del servicio ambiental de almacenamiento y/o fijación de carbono

Se utilizó para el análisis de valoración del servicio ambiental el criterio de contabilización de carbono en función de la tierra, el cual toma como punto de partida el carbono total existente actualmente, sin considerar las alteraciones que podrían implicar los cambios de uso de tierra en el flujo de carbono, ya que con los medios científicos actuales disponibles es muy difícil, por no decir imposible, distinguir la parte del cambio inducida (IPCC, 2000). Se consideró también la importancia de la Ley Forestal 7575 (Costa Rica, 1999) en la cual, como condición de otorgar el pago del servicio ambiental, se prohíbe el cambio de uso de la tierra durante un periodo de responsabilidad de 20 años.

La valoración del servicio ambiental de fijación de carbono se realizó tomando como referencia tres tipos de valoraciones existentes y bajo tres escenarios diferentes que consisten en:

#### **Valoraciones del servicio:**

Valor por tonelada de carbono utilizado en los proyectos internacionales (US\$10).

Valor por tonelada de carbono utilizado en los proyectos negociados por Implementación Conjunta dentro de País (US\$5).

Valor real actual pagado a los productores nacionales por tonelada de carbono en plantaciones forestales según el pago de servicios ambientales vigente (US\$1,53), cuyo cálculo se presenta en el anexo 10.

#### **Escenarios para valorar el servicio reconociendo:**

El valor del servicio total brindado por todos los componentes de los sistemas agroforestales.

El valor del servicio únicamente para el componente arbóreo.

El valor del servicio únicamente para el cultivo agrícola.

El valor del servicio para el componente arbóreo y el cultivo agrícola.

### 3.5 <sup>6</sup> Análisis estadístico

Para estimar la biomasa del café se utilizó el modelo  $e^B = a + b \times e^{(H/c)}$  (Winrock, 1998), por ser un modelo no lineal, se ajustó con procedimientos no lineales utilizando el procedimiento NLIN SAS (Método secante multivariado o de posición falsa -DUD-), como resultado los parámetros estimados fueron: a: -46,46, b: 6,52; c: 0,81 con un ajuste  $r^2$ : 0,28 como resultado de la variabilidad de los datos; tomando como referencia la aplicación de la ecuación a los datos de biomasa de 88 plantas destruidas en campo, se lograba una buena determinación de la biomasa, razón por la cual se utilizó el modelo. El modelo se aplicó a 180 plantas de café.

La estimación de biomasa de las pasturas se realizó utilizando el dato correspondiente al promedio de las diferentes mediciones obtenidas por mes, eliminando así el efecto por el tiempo en éste periodo en los análisis.

Los análisis generados mostraron que el mayor aporte de carbono en los sistemas era generado por el suelo; razón por la cual se procedió a dividir los análisis en dos grandes fuentes: arriba del suelo (árbol, café, hojarasca) y del suelo (materia orgánica) para determinar la cantidad de biomasa y carbono almacenado entre todos los sistemas.

Las comparaciones de biomasa y carbono almacenado arriba del suelo y del suelo entre todos los sistemas, se realizaron por medio de un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 2x9 (2 corresponde a las dos partes analizadas: arriba y abajo, 9 corresponde a los sistemas estudiados: sistema agroforestal café con eucalipto de cuatro años, sistema agroforestal café con eucalipto de seis años, sistema agroforestal café con eucalipto de ocho años, sistema agroforestal café con poró; café a plenos sol; sistema silvopastoril brizanta-mangium, sistema silvopastoril brizanta-eucalipto; sistema pasto ratana a pleno sol, sistema brizanta a pleno sol) y el número de repetición variable (diseño desbalanceado), cuyo modelo corresponde a:  $Y_{ijk} = U + S_i + P_j + SP_{ij} + E_{ijk}$ , se aplicaron pruebas Tukey para los análisis de los efectos principales y medias ajustadas para las interacciones.

Los análisis correspondientes a la biomasa del árbol, café y hojarasca, el porcentaje de materia orgánica del suelo y el carbono almacenado de cada uno de los componentes, se realizaron por medio de comparaciones entre todos los sistemas (agroforestales con café, silvopastoriles y sistemas en monocultivo de café y pasto) utilizando un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 4x9 (4 corresponde a cada componente de los sistemas: árbol, cultivo, suelo hojarasca y 9 corresponde a los sistemas estudiados: sistema agroforestal café con eucalipto de cuatro años, sistema agroforestal café con eucalipto de seis años, sistema agroforestal café con eucalipto de ocho años, sistema agroforestal café con poró; café a plenos sol; sistema silvopastoril brizanta-mangium, sistema silvopastoril brizanta-eucalipto; sistema pasto ratana a pleno sol, sistema brizanta a pleno sol) y el número de repeticiones variable (diseño desbalanceado), cuyo modelo corresponde a:  $Y_{ijk} = U + S_i + P_j + SP_{ij} + E_{ijk}$ , realizando pruebas de Tukey para los análisis de efectos principales y medias ajustadas LSMeans para las interacciones.

La fracción de carbono se analizó utilizando diseños completamente al azar utilizando pruebas Tukey para las comparaciones de medias.

El análisis de los datos provenientes de la determinación de la gravedad específica se realizó con estadísticas descriptivas como promedio y desviación estándar.

El nivel de significancia utilizado en todas las pruebas estadísticas se realizadas fue del 95% ( $\alpha = 0,05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Sistemas de producción con café

La figura 6 y el cuadro 7 presentan los resultados para los sistemas de producción de café asociado con eucalipto de diferentes edades, con poró y a pleno sol, correspondientes al contenido de biomasa aérea así como de carbono almacenado en la biomasa aérea (árbol, cafeto y hojarasca) y en el suelo (materia orgánica), en este último caso hasta 30 cm de profundidad y sin incluir biomasa radicular mayor de 0.25 mm de diámetro.

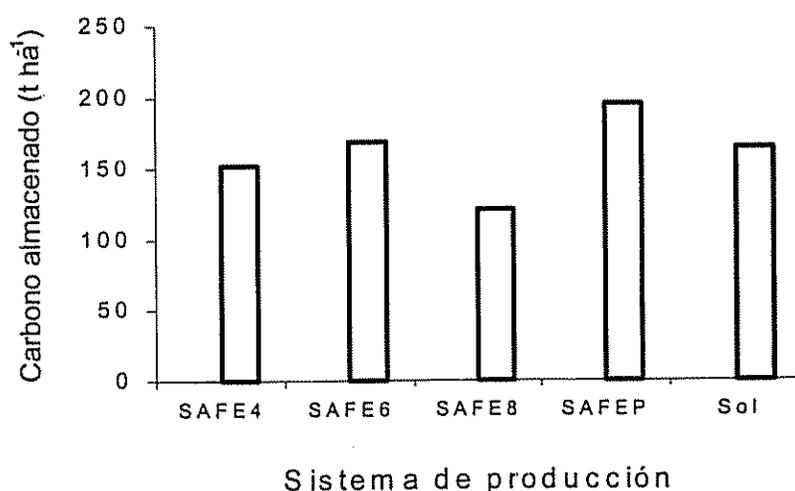


Figura 6: Carbono almacenado por hectárea en sistemas de producción con café. Valle Central, Costa Rica, 2000 (SAFE4: sistema agroforestal café-eucalipto de 4 años; SAFE6: sistema agroforestal café-eucalipto de 6 años; SAFE8: sistema agroforestal café-eucalipto de 8 años; SAFEP: sistema agroforestal café-poró; Sol: Sistema de café a pleno sol)

El mayor contenido de biomasa aérea se encontró en los sistemas café asociado con eucalipto de 4 años y asociado con eucalipto de 8 años, mientras que el menor contenido se encontró en el sistema café-eucalipto de 6 años, aunque solamente en este último caso, las diferencias fueron estadísticamente significativas ( $\alpha=0.05$ ) con respecto a los otros sistemas. El mayor contenido de biomasa en el sistema café-eucalipto de 4 años

Cuadro 7: Cantidad de biomasa y carbono almacenado en diferentes sistemas de producción de café en el Valle Central, Costa Rica, 2000.

Sistema / componente	Carbono (t ha <sup>-1</sup> )				
	Biomasa aérea (t ha <sup>-1</sup> )	% M. O del suelo	Arriba del suelo	Orgánico del suelo	Total
<b>Agroforestal</b>					
<i>C. arabica</i> con <i>Eucalyptus deglupta</i> (4 años)	27.88 a (9.41)	9.22 a (1.54)	12.53 a (4.17)	139.13 cd (23.31)	151.66
<i>C. arabica</i> con <i>Eucalyptus deglupta</i> (6 años)	17.85 b (5.55)	10.67 a (3.60)	7.74 b (2.52)	161.00 ab (54.40)	168.74
<i>C. arabica</i> con <i>Eucalyptus deglupta</i> (8 años)	27.52 a (13.46)	7.20 a (1.02)	12.29 a (5.96)	108.63 d (15.41)	120.92
<i>C. arabica</i> con <i>Erythrina poeppigiana</i> (>10 años)	24.15 ab (8.86)	12.23 a (0.91)	10.57 ab (3.99)	184.43 a (13.80)	195.00
<b>Monocultivo</b>					
<i>C. arabica</i> a pleno sol	23.93 ab (7.75)	12.20 a (2.94)	10.44 a (3.35)	153.88 bc (37.06)	164.32

Medias con igual letra en la misma columna no difieren significativamente ( $\alpha=0.05$ ).

se puede explicar por la mayor densidad de siembra (6x6 m) en comparación a los otros sistemas que están plantados a 8x8 m; así como por las condiciones de sitio de cada uno de los sistemas. El alto contenido de biomasa en el sistema de café a pleno sol se debe, posiblemente, al mayor contenido de hojarasca presente en el suelo en el momento del muestreo (12.89 t ha<sup>-1</sup>), debido a que la fase fenológica de la planta y las condiciones climáticas favorecieron la caída de hojas (Fassbender, 1993).

Los contenidos de materia orgánica en el suelo variaron entre 7.2% en el sistema café-eucalipto de 8 años y 12.2% para café-poró y café a pleno sol. Sin embargo, las diferencias no fueron estadísticamente significativas.

El carbono almacenado en la biomasa aérea presentó un comportamiento estadístico similar al de la biomasa, variando entre 7.74 y 12.53 t ha<sup>-1</sup>. Estos datos son inferiores a los informados por Shroeder (1994) para sistemas agroforestales en ecozonas subhúmedas y húmedas que varían de 21 a 50 t ha<sup>-1</sup> y similares a los que el mismo autor reporta para condiciones semiáridas de 9 t ha<sup>-1</sup>.

El carbono del suelo fue mayor en el sistema café-poró (184.4 t ha<sup>-1</sup>) y menor en café-eucalipto de 8 años (108.6 t ha<sup>-1</sup>), siendo las diferencias estadísticamente significativas. La diferencia puede ser debido a la diferencia de la función de los árboles; debido a la influencia en el depósito de residuos que poseen los árboles de poró, considerando también que el poró es un árbol de servicio y de mayor edad, mientras el eucalipto es un árbol maderable y de edad inferior con referencia al poró. Alpízar *et al.* (1985) en Turrialba (Región Atlántica) de Costa Rica, obtuvieron 164.4 t ha<sup>-1</sup> de carbono almacenado a una profundidad del suelo de 45 cm, en sistemas agroforestales con café. Márquez (1997) reporta datos de 93.3 a 117.5 t ha<sup>-1</sup> de carbono y ANACAFE (1998) de 55 a 60 t ha<sup>-1</sup> en sistemas agroforestales con café, de 0 a 15 cm de profundidad, en Guatemala.

El sistema de producción que almacenó más carbono fue café-poró con un total de 195 t ha<sup>-1</sup> y el de menor almacenamiento café-eucalipto de 8 años con 120.92 t ha<sup>-1</sup>. Fassbender *et al.* (1985b) en Turrialba, Costa Rica obtuvieron 104 y 121 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, para los sistemas café-poró y café-laurel. Fournier (1996) reporta 198 t ha<sup>-1</sup> para un sistema café-poró en Ciudad Colón (Valle Central) de Costa Rica. Márquez (1997) en Guatemala, en sistemas agroforestales con café, obtuvo datos de 115.5 t ha<sup>-1</sup> y

Alvarado *et al.* (1999), también en Guatemala reportan 91.6 t ha<sup>-1</sup> de carbono en sistemas agroforestales con café.

#### 4.2. Sistemas de producción con pastos

La figura 7 y el cuadro 8 muestran los resultados correspondientes a la biomasa aérea total (árbol y pastura) y contenido de materia orgánica del suelo, así como la cantidad de carbono almacenado en esa biomasa aérea y el carbono del suelo en sistemas de producción de pasturas. Para biomasa aérea no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas brizanta-eucalipto (15.62 t ha<sup>-1</sup>) o brizanta-mangium (18.95 t ha<sup>-1</sup>), pero sí se presentaron diferencias con respecto a la pastura mejorada brizanta (4.1 t ha<sup>-1</sup>) y a la pastura natural ratana (0.24 t ha<sup>-1</sup>), sin asocio a árboles (a pleno sol).

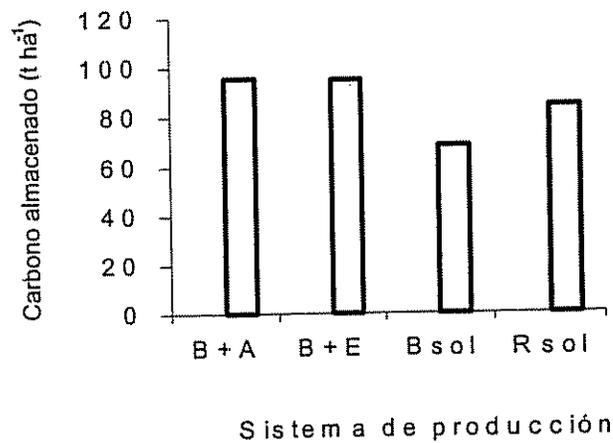


Figura 7: Carbono almacenado por hectárea en sistemas de producción con pasturas, Región Atlántica, Costa Rica, 2000. (B+A: Sistema silvopastoril *B. brizantha*-*A. mangium*; B+E: Sistema silvopastoril *B. brizantha* - *E. deglupta*; Bsol: sistema brizanta a pleno sol; Rsol: sistema ratana a pleno sol).

Cuadro 8: Cantidad de biomasa y carbono almacenado en diferentes sistemas de producción de pastos en el Región Atlántica, Costa Rica, 2000.

Sistema / componente	Carbono (t ha <sup>-1</sup> )		
	Biomasa aérea (t ha <sup>-1</sup> )	% M.O del suelo	Arriba del suelo
<b>Agroforestal</b>			
<i>B. brizantha</i> con <i>A. mangium</i> (3 años)	18.95 a (0.72)	5.50 a (0.70)	8.90 a (0.03)
<i>B. brizantha</i> con <i>E. deglupta</i> (3 años)	15.62 a (0.50)	6.00 a (0.01)	7.48 a (0.26)
<b>Monocultivo</b>			
<i>B. brizantha</i> a pleno sol	4.08 abc (0.31)	3.60 b (0.89)	2.04 abc (0.16)
<i>I. indicum</i> a pleno sol	0.24 c (0.06)	4.32 ab (0.70)	0.12 c (0.03)
			Orgánico del suelo
			86.57 ab (17.52)
			87.30 a (0.45)
			Total
			95.47
			94.78
			68.28
			84.31

Medias con igual letra en la misma columna no difieren significativamente ( $\alpha=0.05$ ).

La biomasa de la pastura bajo árboles fue de 4,90 t ha<sup>-1</sup> y de 4,29 t ha<sup>-1</sup> para los sistemas brizanta-eucalipto y brizanta-mangium, datos que difieren a los de Andrade (1999) quien obtuvo una producción de biomasa de pasturas de 0.7 y 2.1 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente para *B. brizanta* asociada a *E. deglupta* y *B. brizanta* asociada con *A. mangium*, en la Zona Atlántica de Costa Rica.

Fassbender *et al.* (1993) en Turrialba, Costa Rica, obtuvo una producción de biomasa de 0.15 t ha<sup>-1</sup>, en pasto estrella (*Cynodon plectostachyus*) a pleno sol. Brow y Adge (1994) también reportan datos de 0.15 t ha<sup>-1</sup> para pasturas a pleno sol en América Tropical, mientras que Fischer y Trujillo (1999) encontraron una producción de 2.16 t ha<sup>-1</sup> en sabanas de pasturas en los Llanos de Colombia. Rosemberg e Izaurralde (2000), en un estudio realizado en Washington en coberturas permanentes de pastos obtuvieron una producción de biomasa aérea de 1.67 t ha<sup>-1</sup>. Sención (1996) concluye que los pastos en las sabanas tropicales producen de 0.5 a 1.5 t ha<sup>-1</sup> de biomasa.

El contenido de materia orgánica en el suelo, de 0 a 30 cm de profundidad, bajo los sistemas silvopastoriles brizanta-eucalipto y brizanta-mangium fue estadísticamente superior a la encontrada en brizanta y ratana sin asocio con árboles, lo que sugiere además de las condiciones de sitio presentes, el efecto benéfico de los sistemas agroforestales sobre el mejoramiento de las características químicas y físicas del suelo.

Para la cantidad de carbono almacenada en suelo, tampoco hubo diferencias significativas entre los dos sistemas pastura-árboles (87 t ha<sup>-1</sup>), ni entre las dos pasturas (66,3 t ha<sup>-1</sup> para brizanta y 84,3 t ha<sup>-1</sup> para ratana), pero sí entre los sistemas asociados con respecto a las pasturas a pleno sol. Fischer y Trujillo (1999) reportaron datos de 64 t ha<sup>-1</sup> y 65 t ha<sup>-1</sup> de carbono en el suelo, para pastos nativos y mejorados en monocultivo, respectivamente, en los Llanos Orientales de Colombia. Cambardella y Elloit (1993) en pasturas nativas en Colorado, Estados Unidos obtuvieron de 43 a 100 t ha<sup>-1</sup> de carbono. Brow y Adger (1994) reportan datos de almacenamiento de carbono entre 41 y 75 t ha<sup>-1</sup> para pasturas diversas en América Tropical. Montenegro y Abarca (1999), reportan en el trópico húmedo de Costa Rica estudios del contenido de carbono en el suelo para pasturas asociadas de *B. brizantha* -*Arachis pintoi*, mostrando valores entre 47,9 t C ha<sup>-1</sup> y 52 t C ha<sup>-1</sup>; mientras que Takle (1996) reporta 48 t ha<sup>-1</sup> para pasturas en diferentes ecosistemas tropicales.

El carbono almacenado por la *B. brizantha* en el asocio con *E. deglupta* fue de 2,5 t C ha<sup>-1</sup> y en el asocio con *A. mangium* 2,1 t C ha<sup>-1</sup>, mientras que las pasturas a pleno sol presentaron datos de 2 t C ha<sup>-1</sup> para *B. brizantha* y 0,1 t C ha<sup>-1</sup> para *I. indicum*. Beauchamp y Voroney (1994) reportan en Ontario, Canadá, una acumulación de 0,40 t C ha<sup>-1</sup> en pasturas en sabanas, mientras que Rosenberg e Izaurre (2000), reportaron un almacenamiento de 0,80 t C ha<sup>-1</sup> en cultivos de pastos permanentes en Washington, Estados Unidos. Andrade (1999) obtuvo un almacenamiento de carbono en las pasturas de 0,35 y 1,5 t ha<sup>-1</sup>, para *B. brizantha* asociada a *E. deglupta* y *B. brizantha* asociada con *A. mangium*, respectivamente.

El total de carbono también fue mayor en los sistemas silvopastoriles (95 t ha<sup>-1</sup>) que en las pasturas solas (68.2 t ha<sup>-1</sup> para brizanta y 84.3 t ha<sup>-1</sup> para ratana). Trouve *et al.* (1994) obtuvieron un almacenamiento de carbono de 63 a 76 t ha<sup>-1</sup> en sistemas silvopastoriles con *E. deglupta* en el Congo. López (1998) en un estudio realizado en sistemas silvopastoriles con *Cordia alliodora*, en la Zona Norte de Costa Rica, tomando en cuenta la el sombramiento, el tamaño de los árboles y la densidad de los macollos, reporta un almacenamiento de carbono entre 180 y 200 t ha<sup>-1</sup>.

Veldakamp (1993) indica que las pasturas mejoradas bajo sombra, retienen 60% más carbono a pleno sol, debido a la mayor biomasa y longevidad radicular, así como al incremento de materia orgánica del suelo.

#### **4.3. Comparación de todos los sistemas de producción estudiados**

El figura 8 y cuadro 9, se muestran los resultados de biomasa aérea, contenido de materia orgánica del suelo, y carbono almacenado en la biomasa aérea y carbono del suelo comparando todos los sistemas de producción estudiados (con café, con pastos, monocultivos). En general, los sistemas con café produjeron más biomasa aérea que los sistemas silvopastoriles. Los sistemas que tuvieron mayor cantidad de biomasa aérea fue el café-eucalipto de 4 años (27.8 t ha<sup>-1</sup>) y café-eucalipto de 8 años (27.5 t ha<sup>-1</sup>) y la menor biomasa se produjo en el sistema pasto ratana a pleno sol (0.24 t ha<sup>-1</sup>), seguida del brizanta a pleno sol con solamente 4 t ha<sup>-1</sup>.

Sin tomar en cuenta el efecto del suelo, en general, los sistemas agroforestales almacenan mucho más carbono que las pasturas a pleno sol. Sin embargo, el sistema café en monocultivo presentó valores de almacenamiento mayores que los sistemas silvopastoriles y que el café-eucalipto de 6 años (figura 8, cuadro 9).

La cantidad de carbono almacenada fue mayor en el sistema café-poró ( $195 \text{ t ha}^{-1}$ ), del cual el 94.6% corresponde a carbono del suelo, mientras que el menor almacenamiento se presentó en el sistema brizanta a pleno sol ( $68.3 \text{ t ha}^{-1}$ ) con un aporte del suelo de 97%.(figura 8, cuadro 9)

El aporte del carbono del suelo al total de carbono almacenado en los sistemas varió de 89.8% (en café-eucalipto de 8 años) a 99.9% (en pasto ratana al sol). Estos datos ponen en evidencia la importancia del suelo, principalmente a través de su contenido de materia orgánica, en la determinación de carbono almacenado, como lo muestran otros estudios tales como Fassbender *et al.* (1985), Márquez (1997), Alpízar *et al.*, (1985), Fournier, (1996). Por otra parte, es importante anotar que a pesar de que las cantidades de carbono almacenado en el suelo son bastante altas, las cifras presentadas podrían estar fuertemente subestimadas al considerarse solamente los primeros 30 cm de profundidad del suelo y al no considerar la biomasa radicular mayor que 0.25 mm; así como la microfauna y otras formas de vida existentes en el suelo.

En lo referente al aporte del cultivo al total de carbono almacenado, los datos del presente estudio muestran que éstos oscilan entre  $1.21 \text{ t ha}^{-1}$  para el café en asocio con eucalipto de 6 años a  $4.50 \text{ t ha}^{-1}$  en café con poró (figura 7). Márquez (1997) en un estudio realizado en Guatemala, reporta que el aporte del café al total de carbono almacenado en un sistema de café con sombra fue de  $3.77 \text{ t ha}^{-1}$ ; Derivado del estudio de Alpízar *et al.* (1985) en sistemas café-poró y café-laurel en Turrialba, Costa Rica se obtuvieron  $7.65$  y  $3.93 \text{ t ha}^{-1}$  de aporte del café al total de almacenamiento de carbono, mientras que el valor obtenido por Fournier (1996) fue  $8.4 \text{ t ha}^{-1}$  en un sistema de café con poró en el Valle Central de Costa Rica.

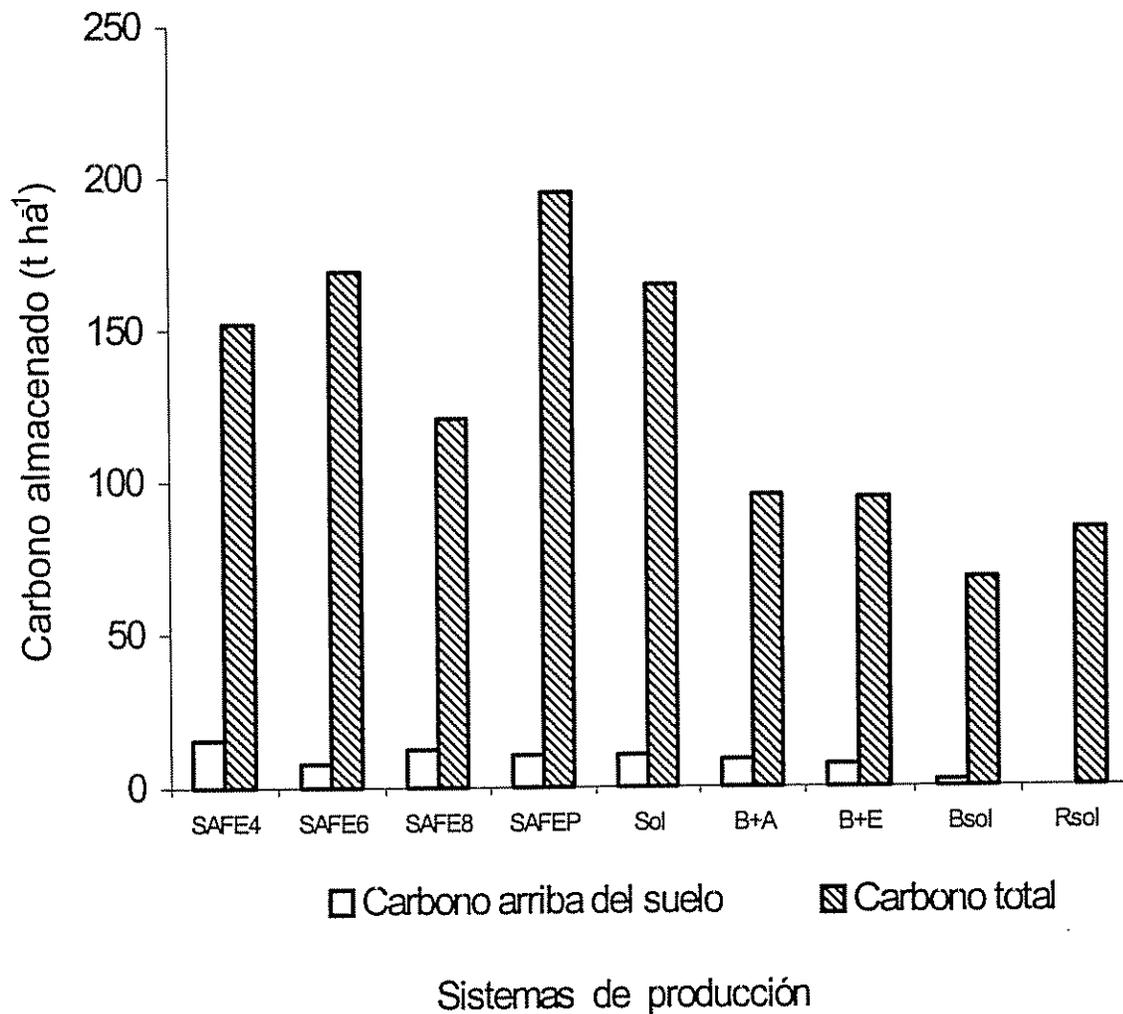


Figura 8: Carbono almacenado por hectárea en sistemas de producción con café y pasturas. Costa Rica, 2000. (SAFE4: sistema agroforestal eucalipto de 4 años-café; SAFE6: sistema agroforestal café-eucalipto de 6 años; SAFE8: sistema agroforestal café-eucalipto de 8 años; SAFEP: sistema agroforestal café-poró, Sol: café a pleno sol; B+A: Sistema silvopastoril *B. brizantha*-*A. mangium*; B+E: Sistema silvopastoril *B. brizantha* -*E. deglupta*; Bsol: sistema brizanta a pleno sol; Rsol: sistema ratana a pleno sol).

Cuadro 9: Cantidad de biomasa y carbono almacenado en diferentes sistemas de producción de café y pastos, Costa Rica, 2000.

Sistema / componente	Carbono (t ha <sup>-1</sup> )				
	Biomasa aérea (t ha <sup>-1</sup> )	% M.O del suelo	Arriba del suelo	Orgánico el suelo	Total
<b>Agroforestal</b>					
<i>C. arabica</i> con <i>Eucalyptus deglupta</i> (4 años)	27.88 a	9.22 a	15.53 a	139.13 cd	151.66
<i>C. arabica</i> con <i>Eucalyptus deglupta</i> (6 años)	17.85 b	10.67 a	7.74 b	161.00 ab	168.74
<i>C. arabica</i> con <i>Eucalyptus deglupta</i> (8 años)	27.52 a	7.20 a	12.29 a	108.63 d	120.92
<i>C. arabica</i> con <i>Erythrina poeppigiana</i> (>10 años)	24.15 ab	12.23 a	10.57 ab	184.43 a	195.00
<i>B. brizantha</i> con <i>A. mangium</i> (3 años)	18.95 b	5.50 b	8.90 a	86.57 d	95.47
<i>B. brizantha</i> con <i>E. deglupta</i> (3 años)	15.62 b	6.00 b	7.48 a	87.30 cd	94.78
<b>Monocultivo</b>					
<i>C. arabica</i> a pleno sol	23.93 ab	12.20 a	10.44 a	153.88 b	164.32
<i>B. brizantha</i> a pleno sol	4.08 bcd	3.60 c	2.04 ab	66.24 e	68.28
<i>I. indicum</i> a pleno sol	0.24 d	5.50 cb	0.12 b	84.19 ed	84.31

Medias con igual letra en la misma columna no difieren significativamente ( $\alpha=0,05$ )

El aporte de los árboles (figura 9) al total de carbono almacenado varió de 2.08 t ha<sup>-1</sup> en el sistema eucalipto - café de 4 años a 6.45 t ha<sup>-1</sup> en el sistema brizanta-mangium, mientras que el aporte del cultivo (café o pasto) fue mayor en el asocio café-poró (4.45 t ha<sup>-1</sup>) y menor en el sistema brizanta-eucalipto (2.14 t ha<sup>-1</sup>). Alpizar *et al* (1985) obtuvieron valores de carbono almacenado en el componente arbóreo de 10.1 t ha<sup>-1</sup> para poró y 14.6 t ha<sup>-1</sup> para laurel en sistemas agroforestales con café en Turrialba, Costa Rica. Medina *et al.* (1999) reportan 15.8 t ha<sup>-1</sup> para cafetales arbolados en Guatemala. En un reporte más general, Kursten y Burschel (1993) indican que el carbono almacenado por los árboles en diferentes sistemas agroforestales oscila de 3 a 25 t ha<sup>-1</sup>.

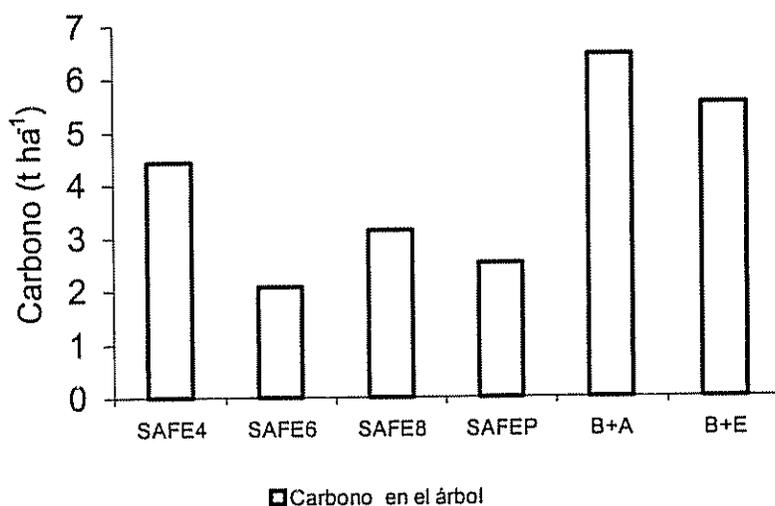


Figura 9: Aporte de los árboles al total de carbono almacenado en sistema agroforestales con café y sistemas silvopastoriles. Costa Rica, 2000. (SAFE4: sistema agroforestal eucalipto de 4 años-café; SAFE6: sistema agroforestal de eucalipto de 6 años-café; SAFE8: sistema agroforestal eucalipto de 8 años-café ; SAFEP: sistema agroforestal poró-café; B+A: Sistema silvopastoril *B. brizantha* -*A. mangium*; B+E: Sistema silvopastoril *B. brizantha* -*E. deglupta*).



#### 4.4. Fijación de carbono en los sistemas agroforestales con café y pastos

El cuadro 10 presenta lo datos correspondientes a las tasas de fijación de carbono por sistema agroforestales con café y pastos. El sistema brizanta-*A. mangium* mostró la mayor tasa de fijación y el café-eucalipto de 6 y 8 años la más baja. La fijación de carbono resultó mayor en los sistemas silvopastoriles, aunque el valor se encuentra bastante influenciado por la mayor densidad de árboles en esos sistemas.

Cuadro 10: Carbono almacenado y fijación de carbono del componente arbóreo en sistema agroforestal. Costa Rica, 2000.

Sistema y edad	Densidad (árboles ha <sup>-1</sup> )	Carbono almacenado (t ha <sup>-1</sup> )	Tasa de fijación de carbono (t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
Café-eucalipto de 4 años	277	4.43	1.10
Café-eucalipto de 6 años	156	2.08	0.40 <sup>0,35</sup>
Café-eucalipto de 8 años	156	3.14	0.40
Café-poró >10 años	156	2.51	0.30 <sup>0,35</sup>
Brizanta-eucalipto de 3 años	370	5.33	1.80
Brizanta-acacia de 3 años	370	6.45	2.20

Considerando las densidades de siembra, las tasas de fijación son aceptables, encontrándose dentro de los datos estimados por Kursten y Burschel (1993) para árboles en sistemas agroforestales con café y cacao, *Gliricidia sepium* 1.7 t C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (330 árboles ha<sup>-1</sup>, 30 años de edad), *Inga densiflora* 1.2 t C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (400 árboles ha<sup>-1</sup>, 20 años de edad). Andrade (1999) en sistemas silvopastoriles en Costa Rica, en el mismo sitio encontró una tasa de fijación para *E. deglupta* y *A. mangium* de 1.8 t C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (370 árboles ha<sup>-1</sup>, 2 años de edad).

Para plantaciones puras de *E. deglupta*, Lugo et al (1988) obtuvieron una tasa de fijación de 1,78 t C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (1250 árboles ha<sup>-1</sup>) en Costa Rica; mientras que Attiwill (1966) reportó tasas de 1,66 t C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (914 árboles ha<sup>-1</sup>), 1,07 t C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (976 árboles ha<sup>-1</sup>), 1,76 t C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (704 árboles ha<sup>-1</sup>) para especies nativas al suroeste de Australia.

#### 4.5. Valoración económica del servicio ambiental de almacenamiento de carbono

En el cuadro 11 se muestran los resultados de la valoración del servicio ambiental de almacenamiento de carbono en los diferentes sistemas de producción con café, bajo el escenario de reconocer el valor del servicio brindado por los componentes del sistema y bajo tres precios de valoración del servicio ambiental (valor internacional, valor nacional, valor al productor).

Bajo los tres precios de valoración del servicio ambiental de fijación de carbono utilizados, el sistema agroforestal café-poró presentó los valores más altos, mientras que el sistema café-eucalipto de 8 años, los más bajos, incluso por debajo del valor del café a pleno sol (cuadro 11). Bajo el sistema de valoración internacional, los datos variaron entre US\$1210 ha<sup>-1</sup> y US\$1950 ha<sup>-1</sup>, para una diferencia de US\$740; para el sistema de valoración nacional (proyectos de Implementación Conjunta), los datos variaron entre US\$605 y US\$975 ha<sup>-1</sup>, para una diferencia de US\$370; finalmente, con el sistema de valoración basado en el pago que realmente reciben los productores, los valores fueron de US\$185 y US\$298 ha<sup>-1</sup>, lo que significa una diferencia de US\$113.

Este escenario representa la situación ideal para el productor en lo referente al reconocimiento del servicio ambiental de almacenamiento de carbono, ya que considera el carbono de la parte aérea y del suelo del sistema de producción respectivo, aún para el sistema de pago actual utilizado en Costa Rica, (éste solo considera el pago por el carbono almacenado en los árboles), mientras que en el escenario propuesto se le reconoce el carbono almacenado en el cultivo, en la hojarasca y el carbono del suelo.

El cuadro 12 presenta los resultados correspondientes a la valoración del servicio ambiental de almacenamiento de carbono bajo el escenario de considerar solamente el valor para el componente arbóreo dentro de los sistemas agroforestales con café y silvopastoriles, considerando los mismos precios de valoración anteriormente mencionados. Bajo este escenario los sistemas silvopastoriles mostraron el mayor valor para el carbono con los tres precios de valoración utilizados, mientras que para los sistemas agroforestales con café, el mayor valor correspondió al sistema *brizantha-café-eucalipto 4 años*, y el café- eucalipto de 6 años el de menor.

Para el sistema internacional de pago, la diferencia entre el café-eucalipto de 4 años y café-poró, fue de US\$19 (50%); para el sistema nacional de Implementación Conjunta la diferencia fue de US\$10 (50%) el sistema de pago real actual al productor, es de la US\$7.

Cuando se usa el sistema de valoración internacional, el valor del carbono almacenado para el sistema café-eucalipto de 4 años es US\$44 (85%) mayor que si se utiliza el precio de pago real actual, mientras que para el sistema café- eucalipto 6 años (el de más bajo valor de almacenamiento de carbono), el valor del carbono fue US\$20 ha<sup>-1</sup> (85%) menor en el sistema de valoración internacional.

El cuadro 13 muestra los resultados de valoración del servicio de fijación de carbono en los sistemas de producción con pastos. Bajo los tres precios de valoración del servicio utilizados, el sistema de mayor valor fue brizanta-eucalipto y el de menor brizanta a pleno sol. Se puede observar nuevamente el papel dominante que tiene el carbono del suelo en determinar el valor total del carbono almacenado en el sistema, puesto que el pasto ratana, a pesar de tener un aporte de carbono de la biomasa aérea muy bajo (0.12 t C ha<sup>-1</sup>) tiene mayor valor de carbono que el brizanta a pleno sol.

Con el precio de valoración internacional, el valor del carbono almacenado en el sistema brizanta-eucalipto (el más alto) fue de US\$957 ha<sup>-1</sup> y de US\$954 para el sistema brizanta a pleno sol que resultó el de valor más bajo, para una diferencia de US\$272 ha<sup>-1</sup>. Con el precio de valoración nacional la diferencia fue de US\$13.2 ha<sup>-1</sup> y con precio de a los productores la diferencia fue de US\$4.4 ha<sup>-1</sup>.

En el cuadro 14 se muestran los resultados correspondientes a la valoración del servicio de fijación de carbono bajo el escenario de considerar únicamente el cultivo (café o pasto) como componente de valoración del sistema agroforestal. Bajo esta condición, el valor de carbono más alto en los sistemas con café corresponde al café-eucalipto de 6 años y los menores al café a pleno sol y café en el sistema café-eucalipto de 4 años. En los sistemas con pasturas, el valor más alto de almacenamiento de carbono para el pasto se presenta en el sistema brizanta-mangium y el menor con pasto ratana a pleno sol. Si bien este escenario (solo café o pasto) es actualmente poco probable de ser considerado sujeto de

Cuadro 11: Valoración del servicio ambiental de almacenamiento de carbono en diferentes sistemas de producción de café en el Valle Central, Costa Rica, 2000.

Sistema / componente	Almacenamiento de carbono (t ha <sup>-1</sup> )			Valor en dólares (US\$ t C ha <sup>-1</sup> )		
	Arriba del suelo	Orgánico el suelo	Carbono total	10	5	1.53
<b>Agroforestal</b>						
<i>C. arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (4 años)	12.53	139.13	151.66	1560	780	232
<i>C. arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (6 años)	7.74	161.00	168.74	1687	844	258
<i>C. arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (8 años)	12.29	108.63	120.92	1209	605	185
<i>C. arabica</i> con <i>E. poeppigiana</i> (>10 años)	10.57	184.43	195.00	1950	974	298
<b>Monocultivo</b>						
<i>C. arabica</i> a pleno sol	10.44	153.88	164.32	1643	821	251

Cuadro 12: Valoración del servicio ambiental de almacenamiento de carbono arbóreo en sistemas agroforestales. Costa Rica, 2000.

Sistema / componente	Almacenamiento de carbono arbóreo (t C ha <sup>-1</sup> )	Valor en dólares (US\$ t C ha <sup>-1</sup> )		
		10	5	1.53
Agroforestal		44	22	7
C. <i>arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (4 años)	4.43	20	10	3
C. <i>arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (6 años)	2.08	31	15	4
C. <i>arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (8 años)	3.14	25	12	4
C. <i>arabica</i> con <i>E. poeppigiana</i> (>10 años)	2.51	64	32	10
B. <i>brizantha</i> con <i>A. mangium</i> (3 años)	6.45	55	27	9
B. <i>brizantha</i> con <i>E. deglupta</i> (3 años)	5.53			

de pago, da idea del aporte individual que el cultivo hace al valor total de carbono almacenado en los diferentes sistemas de producción.

Para sistemas agroforestales, una situación intermedia entre la condición más favorable de pago del servicio ambiental por almacenamiento de carbono (considerando todos los componentes del sistema) y la menos favorable (pago únicamente por componente arbóreo) es la correspondiente al escenario de pago del servicio por almacenamiento de carbono por ambos, el componente arbóreo y el cultivo asociado. El cuadro 15 muestra los resultados para este escenario, donde se observa que el sistema de mayor valoración corresponde a café-eucalipto de 4 años (US\$84 ha<sup>-1</sup>) y el de menor valor el café-poro (US\$66 ha<sup>-1</sup>).

Se calculó el costo de oportunidad<sup>5</sup> de los diferentes precios de valoración utilizados (cuadro 16), tomando como escenario el pago del servicio ambiental de fijación de carbono por ambos el árbol y el cultivo, ya que representa la situación más cercana a la actual y la de mayor potencial de consideración de pago, si finalmente se reconoce los servicios ambientales que brindan los sistemas agroforestales a la humanidad. En términos porcentuales, los productores nacionales reciben 85% menos de pago por el valor del carbono almacenado en comparación con el precio internacional (US\$1.53 t C vs US\$10 t C) y 70% menos en relación con el precio de valoración nacional (US\$1.53 t C vs US\$5 t C) (Implementación Conjunta); de igual forma se aplicó el cálculo utilizando el escenario de valorar solamente el árbol (cuadro 17), dentro del sistema agroforestal; dado que bajo condiciones reales actuales sería la expresión monetaria brindada a los productores.

En ambos casos, se evidencia la situación desfavorable en que se encuentra el productor, debido a la ausencia de un sistema por pago de servicios ambientales más justo y diferenciado, debido a que no sólo afecta a los propietarios de los sistemas agroforestales en caso de realizarse una valoración para el servicio dentro del sistema, sino que afecta a los mismos productores dueños de plantaciones forestales puras a nivel nacional.

---

<sup>5</sup> Costo de oportunidad definido como aquella cantidad de dinero que se deja de percibir el productor por el precio que se le reconoce por el servicio ambiental de almacenamiento de carbono al no tener opción de elección, con relación a los otros precios utilizados en el mercado costarricense para las negociaciones por el pago de servicio ambiental de almacenamiento y fijación de carbono.

En general, tomando en cuenta solamente el carbono almacenado por los árboles en los sistemas agroforestales con café y los sistemas silvopastoriles, puede notarse que la cantidad de carbono almacenada varía de 2.08 t C ha<sup>-1</sup> a 6.45 t C ha<sup>-1</sup>, , dato que merece reconocimiento significativo tomando en consideración que las plantaciones puras existentes a nivel nacional cuentan con edades y densidades de siembra superiores a las analizadas en el estudio, y las mismas presentan una cantidad promedio de 5.74 t C ha<sup>-1</sup>, según Corrales y Alpízar (1998).

Lo anterior estaría implicando que no es la cantidad de árboles por hectárea el criterio más óptimo para reconocer la cantidad de carbono almacenado en un determinado sistema, sino a la calidad de sitio y la cantidad de biomasa existente, dado que a menores densidades probablemente las cantidades de biomasa por árbol será mayor por efectos del espacio para el crecimiento y la distribución de los árboles, a diferencia de la ubicación de los árboles en sistemas de plantaciones puras, en los cuales se inicia con densidades muy altas y generalmente de 1100 árboles ha<sup>-1</sup> (Chavarría, 1999) alcanzando una densidad similar de 250 árboles por ha<sup>-1</sup> en el tercer raleo. Por lo tanto, a los sistemas agroforestales estudiados se les debería de reconocer el pago del servicio ambiental, al haberse demostrado su capacidad de almacenar carbono en el componente arbóreo y bajo densidades de siembra menores.

Cuadro 13: Valoración del servicio ambiental de almacenamiento de carbono en diferentes sistemas de producción de pastos en el  
Región Atlántica, Costa Rica, 2000.

Sistema / componente	Almacenamiento de carbono (t ha <sup>-1</sup> )			Valor en dólares (US\$ t C ha <sup>-1</sup> )		
	Arriba del suelo	Orgánico el suelo	Carbono total	10	5	1.53
<b>Agroforestal</b>						
<i>B. brizantha</i> con <i>A. mangium</i> (3 años)	8.90	86.57	95.47	954	47.7	14.6
<i>B. brizantha</i> con <i>E. deglupta</i> (3 años)	7.48	87.30	95.78	957	47.8	14.7
<b>Monocultivo</b>						
<i>B. brizantha</i> a pleno sol	2.04	66.24	68.28	682	34.5	10.5
<i>I. indicum</i> a pleno sol	0.12	84.19	84.31	84.3	42.1	12.9

Cuadro 14: Valoración del servicio ambiental de almacenamiento de carbono para el cultivo asociado en sistemas agroforestales, Costa Rica, 2000.

Sistema / componente	Almacenamiento del cultivo (t C ha <sup>-1</sup> )	Valor en dólares (US\$ t C ha <sup>-1</sup> )		
		10	5	1.53
<i>C. arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (4 años)	3.96	39.6	19.8	6
<i>C. arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (6 años)	5.01	50.1	25.0	8
<i>C. arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (8 años)	4.13	41.3	20.6	6
<i>C. arabica</i> con <i>E. poeppigiana</i> (>10 años)	4.10	41.0	20.5	6
<i>B. brizantha</i> con <i>A. mangium</i> (3 años)	2.45	24.5	12.2	4
<i>B. brizantha</i> con <i>E. deglupta</i> (3 años)	2.15	21.5	10.7	3

Cuadro 15: Valoración del servicio ambiental de almacenamiento de carbono por el componente arbóreo y cultivo asociado, en sistemas agroforestales, Costa Rica, 2000.

Sistema / componente	Almacenamiento de carbono arbóreo y del cultivo (t C ha <sup>-1</sup> )	Valor en dólares (US\$ t C ha <sup>-1</sup> )		
		10	5	1.53
Agroforestal				
<i>C. arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (4 años)	8.40	84	42	13
<i>C. arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (6 años)	7.10	71	35	10
<i>C. arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (8 años)	7.43	74	37	11
<i>C. arabica</i> con <i>E. poeppigiana</i> (>10 años)	6.60	66	33	10
<i>B. brizantha</i> con <i>A. mangium</i> (3 años)	8.90	89	44	13
<i>B. brizantha</i> con <i>E. deglupta</i> (3 años)	7.70	77	38	11

Cuadro 16: Costo de oportunidad por el servicio de almacenamiento de carbono por el componente arbóreo y el cultivo, en sistemas agroforestales y silvopastoriles bajo el sistema actual de pago. Costa Rica, 2000.

Sistema / componente	Almacenamiento de carbono arbóreo y del cultivo (t C ha <sup>-1</sup> )	Valor en dólares (US\$ t C ha <sup>-1</sup> )			Costo de oportunidad (US\$) para el productor nacional	
		10	5	1.53	10	5
Agroforestal		84	42	13	71	30
C. <i>arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (4 años)	8.40	71	35	10	61	25
C. <i>arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (6 años)	7.10	74	37	11	63	26
C. <i>arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (8 años)	7.43	66	33	10	56	33
C. <i>arabica</i> con <i>E. poeppigiana</i> (>10 años)	6.60	89	44	13	76	31
B. <i>brizantha</i> con <i>A. mangium</i> (3 años)	8.90	77	38	11	66	27
B. <i>brizantha</i> con <i>E. deglupta</i> (3 años)	7.70					

Cuadro 17: Costo de oportunidad por el servicio ambiental de almacenamiento de carbono por el componente arbóreo en sistemas agroforestales y silvopastoriles. Costa Rica, 2000.

Sistema / componente	Almacenamiento de carbono arbóreo ( t C ha <sup>-1</sup> )	Valor en dólares (US\$ t C ha <sup>-1</sup> )			Costo de oportunidad (US\$)	
		10	5	1.53	para el productor nacional	5
Agroforestal		44	24	7	37	17
<i>C. arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (4 años)	4.43	20	10	3	17	7
<i>C. arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (6 años)	2.08	31	15	5	26	10
<i>C. arabica</i> con <i>E. deglupta</i> (8 años)	3.14	25	12	4	13	8
<i>C. arabica</i> con <i>E. poeppigiana</i> (>10 años)	2.51	64	32	10	54	22
<i>B. brizantha</i> con <i>A. mangium</i> (3 años)	6.45	55	27	9	46	18
<i>B. brizantha</i> con <i>E. deglupta</i> (3 años)	5.53					

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

En promedio los sistemas agroforestales café-eucalipto almacenaron 40% más carbono que los sistemas silvopastoriles brizanta-eucalipto y brizanta-mangium

En promedio los sistemas agroforestales almacenan más carbono que los sistemas correspondientes a los cultivos a pleno sol, éste comportamiento fue más evidente en los sistemas silvopastoriles.

Más del 89% del carbono almacenado en los sistemas de producción estudiados, corresponden al carbono del suelo; éste varió entre el 89.8% (120.92 t C ha<sup>-1</sup>) en sistemas agroforestales café-eucalipto de 8 años a 99.9% (84.31 t C ha<sup>-1</sup>) en la pastura natural ratana (*I. indicum*).

En los sistemas de producción con café, el asocio café-poró fue el de mayor edad del árbol y almacenamiento de carbono (195 t ha<sup>-1</sup>), mientras que el café-eucalipto de 8 años tuvo el más bajo (121 t ha<sup>-1</sup>), el café en monocultivo almacenó más carbono que el café de cuatro y ocho años.

El aporte de los árboles al carbono almacenado varió de 2.08 t ha<sup>-1</sup> en el sistema café-eucalipto de 6 años a 6.45 t ha<sup>-1</sup> en el sistema brizanta-mangium; porcentualmente esas cifras representan el 1.2% y 6.80% respectivamente, del total de carbono almacenado en esos sistemas.

Considerando el carbono almacenado por los árboles maderables en los sistemas agroforestales con café y los sistemas silvopastoriles, la cantidad de carbono almacenada se encuentra muy cercana y superior a la presentada en plantaciones puras (5.74 t C ha<sup>-1</sup>), reportadas para el País.

Las tasas de fijación de carbono obtenidas para el componente arbóreo maderable en éste estudio para los diferentes sistemas agroforestales variaron entre 0.4 y 2.20 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, estando dentro del rango reportado en la literatura para sistemas forestales y sistemas agroforestales.

El monto pagado por el servicio ambiental de almacenamiento de carbono para proyectos nacionales e internacionales son superiores a los pagados actualmente a los productores como pago de servicio ambiental.

El valor pagado a los productores nacionales por el servicio ambiental de almacenamiento de carbono en el componente arbóreo, refleja un costo de oportunidad de 70% menos que el monto pagado por el mismo servicio dentro del País y 85% menos que el monto pagado en los convenios internacionales.

## **5.2 Recomendaciones**

Se recomienda realizar estudios sobre la cantidad de carbono almacenada en el suelo (incluyendo raíces con diámetros superiores a 0.25 mm y a la misma profundidad (30 cm), que determinen la cantidad de carbono aportada al suelo.

Es preciso realizar estudios sobre la estimación de carbono almacenado en el suelo (considerando la biomasa radicular, de la microfauna y otras formas de vida existentes en el suelo) de los diferentes cultivos y a diferentes profundidades.

Se recomienda realizar cuantificaciones de carbono en más sistemas agroforestales semejantes y diferentes a los evaluados en el estudio con la finalidad de estimar el potencial de carbono contenido en los mismos.

Es preciso realizar cuantificaciones de hojarasca dentro de las estimaciones de carbono almacenado en los sistemas silvopastoriles para determinar su aporte al sistema.

Los sistemas agroforestales con café y los sistemas silvopastoriles almacenan el componente arbóreo cantidades elevadas de carbono, por lo que deberían de ser incluidos en la modalidad por pago de servicios ambientales que regula la Ley Forestal de Costa Rica.

Podría incluirse el pago por servicio ambiental de almacenamiento de carbono para los sistemas agroforestales tomando en consideración el aporte de carbono brindado por el árbol y el cultivo asociado, ya que estos representan reservorios de carbono.

→ Se recomienda incluir dentro de la modalidad del pago por servicio ambiental de carbono, a los sistemas agroforestales y silvopastoriles con especies maderables, ya que almacenan cantidades de carbono similares a las almacenadas por plantaciones puras en el País a las cuales se les otorga el pago por el servicio.

Es preciso realizar una revisión y evaluación sobre el sistema actual de pago de los servicios ambientales brindado a los productores nacionales, dado que se muestran claras desventajas comparativas en relación al monto pagado por el mismo servicio dentro del País a proyectos de almacenamiento de carbono.

Los sistemas agroforestales deben de ser estudiados y analizados detenidamente para establecer su potencialidad al brindar otros servicios ambientales como biodiversidad y belleza escénica, al construir un atractivo para el turismo recreativo, especialmente en el Valle Central.

## 7. LITERATURA CITADA

- Alexander, S; Schneider, S; Lagerquist, K. 1998. Nature's Services: societal dependence on natural ecosystems. The interaction of climate and life. Washington, D.C: Gretchen C. Daily. 476 p.
- Alfaro, M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en ecosistemas forestales. Revista Forestal Centroamericana No.19: 9-12.
- Alvarado, J; López de León, E; Medina, M. 1999. Cuantificación estimada del dióxido de carbono fijado por el agroecosistema café en Guatemala. Boletín PROMECAFE. (IICA) N 81:7-14.
- Alpizar, L; Fassbender, H. W; Heuvelop, J. 1985. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. I. Biomasa y reservas nutritivas. Turrialba 35 (3) : 233 - 242.
- Alpizar, E; Leiva, M; Rodríguez, E; Alpizar, W. 1996. Propuesta para la consolidación territorial de los parques nacionales y reservas biológicas de Costa Rica como depósitos de gases de efecto invernadero, bajo el marco de actividades implementadas conjuntamente. San José, Costa Rica. Oficina Nacional Costarricense de Implementación Conjunta. 15 p.
- Andrasko, K. 1990. El calentamiento global terráqueo y los bosques: estado actual de los conocimientos. Unasyva. 41 (4): 3-11.
- Andrade, H.J. 1999. Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 83 p.
- Arosemena, E. 1990. Determinación de mecanismos de interferencia por alelopatía y requerimientos externos e internos de fósforo en pasto ratana (*Ischaemun indicum* (Houtt) Merrill). Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 124 p

- Asociación Nacional de Café. ANCAFE. 1995. Hombres de café. Guatemala. Asociación Nacional de Café. 167 p
- Asociación Nacional de Café. ANCAFE. 1998. Cuantificación estimada de dióxido de carbono fijado por el agroecosistema café en Guatemala. Guatemala. 35p.
- Asumadu, K. 1999. El comercio del derecho de emisión: una nueva oportunidad para los países productores de maderas tropicales. *Actualidad Forestal Tropical* 6 (4):2.
- Asumadu, K. 1998. Sumideros de carbono, la alternativa para no hundirnos.. *Actualidad Forestal Tropical* 6 (4):1 - 4.
- Attwill, P. M. 1966. A method for estimating crown weight in eucaliptus and some implications of relationships between crown weigh and stem diameter. *Ecology*. 47 (5): 795-804.
- Bazzaz, F. A; Fajer, D.E. 1992. Plant life in a CO<sub>2</sub> -rich world. *Scientific American*. January 1992: 17-24.
- Beauchamp, E. G; Voroney, R.P. 1994. Crop carbon contribution to the soil with different cropping and livestock systems. *J. Soil and Water Cons.* 49 (2): 205-209.
- Beaumont, R.E. 1999. El Protocolo de Kyoto y el mecanismo para un desarrollo en 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; Somarriba, E; Kass, D. 1997. Maderables como sombra para café.. *Boletín PROMECAFE. (IICA) No 76-77: 5-7.*
- ; Bonnemann, A; Chavez, W; Fassbender, H.W; Imbach, A.C; Martel, I. 1990. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) or poró (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. *Agroforestry Systems* 12: 229 - 249.

- Begon, M, Harper, J; Townsend, C.R. 1996. Ecology: individuals, populations and communities. Oxford, Blackwell Scientific Publications. 876 p.
- Brow, K; Adger, N.W. 1994. Economic and political feasibility of international carbon offsets. *Forest Ecology and Management*. 68 : 217-229.
- ↳Brown, S. 1997 (a). Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. In *Congreso Forestal Mundial (11, Antalya, Turquía)*. Actas. Antalya, Turquía, Ministry of Forestry. p.107-128.
- ; Lugo, A.E. 1992 Aboveground biomass estimate for tropical moist forests of the brazilian amazon. *Interciencia* 17 (1): 8-18.
- ; Gillespie, A.R.J. 1989. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35 (4): 881-902.
- ; Lugo, A.E. 1984a. Biomass of tropical forest: a new estimate based on forest volume. *Science* 223: 1290-1293.
- ; Lugo, A.E. 1984b. The storage and production of organic matter in tropical forest and their role in the global carbon cycle. *Biotropica* 14: 161-187
- Budowski, B. 1999. Secuestro de carbono y gestión forestal en América Tropical. *Bosques y Desarrollo* Abril 20 - 21: 17-20.
- Cairns, M. Meganck, R. 1994. Carbon sequestration, biological diversity and sustainable development: integrated forest management. *Environmental Management*. 18(1): 13-22.
- Cambardella, C. A, Elliott, E. T. 1993. Carbon and nitrogen distribution and aggregates from cultivated and native glassland soils. *Soil Sci. Soc. Am.* 57 : 1071-1076.

- Camero, R, A; Chaimsohn, F; Quintanilla, J; Samaniego, J; Hernández, O. 1995.  
Caracterización y evaluación de un sistema agroforestal de café (*Coffea arábica*)  
con laurel (*Cordia alliodora*) y poró (*Erythrina poeppigiana*) en la Finca Azul,  
Turrialba, Costa Rica. CATIE. 40 p.
- Carranza , C; Allward, B; Echeverría, J; Tosi, J; Mejías, R. 1996. Valoración de los  
servicios ambientales de los bosques de Costa Rica, Centro Científico Tropical.  
71p.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 1994. Deglupta:  
*Eucalyptus deglupta* Blume, una especie de árbol de uso múltiple en América  
Central. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 43 p.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 1994. Mangium: *Acacia*  
*Mangium*, una especie de una especie de árbol de uso múltiple en América  
Central. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 43 p.
- Chavarría, I. 1999. Metodologías de evaluación silvicultural para plantaciones forestales  
en Costa Rica. Manual de campo para extensionistas. DECAFOR/JUNAFORCA.  
San José. 84p.
- Chinchilla, V. E. 1987. Atlas cantonal de Costa Rica, San José, Costa Rica, Instituto de  
fomento y Asesoría Municipal. 396p.
- Ciesla, W.M. 1996. Cambio climático, bosques y ordenación forestal. Una visión de  
conjunto. Estudio FAO Montes No 126. 147 p.
- Corrales, L; Alpizar, W. 1998. Estimación de la cantidad de carbono almacenado y  
captado (masa aérea) por los bosques de Costa Rica. USAID/PROARCA/CAPAS.  
Costa Rica. 50p.
- Costa Rica. Asamblea Legislativa. 1999. Ley Forestal y su Reglamento. Costa Rica. 3 ed.  
San José, Costa Rica. 116 p.

- Costa Rica. Ministerio del Ambiente y la Energía (MINAE). 1998a. Plan Nacional de Desarrollo Forestal. Integración y participación activa del sector forestal en el desarrollo humano sostenible, Costa Rica 1998-2002. San José, Costa Rica. 17p.
- . Presidencia de la República. 1998. Decreto No 26977 - MINAE sobre el pago de servicios ambientales. La Gaceta No 100: 8 - 13.
- Cubero, J; Rojas, S. 1999. Fijación de carbono en plantaciones de melina (*Gmelina arborea Roxb*), teca (*Tectona grandis L.f*) y pochote (*Bombacopsis quinata Jacq*) en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Tesis de Lic. Cs. For. Concentración en Manejo Forestal. Heredia, Costa Rica. Universidad Nacional. 95 p.
- Cuéllar, N; Rosa, H; González, M. 1999. Los servicios ambientales del agro: El caso del café de sombra en El Salvador. PRISMA. No. 34: 1-16.
- De Camino, R; Vázquez, W. 1987. *Eucalyptus deglupta*: una especie para las zonas bajas muy húmedas de Costa Rica. Silvoenergía No 24 : 1-4.
- Dixon, K. 1995 Sistemas agroforestales y gases de invernadero. Agroforestería en las Américas. 2 (7) 22-26.
- Dixon , A; Scura, F; Carpenter, A; Sherman, B.1994 Análisis económico de impactos ambientales. In Desarrollo ambiental y el papel del análisis económico. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 249 p.
- Dixon, J.; Carpenter, R.; Fallon, L.; Sherman, P. 1995. Economic analysis of the environmental impacts of development projects. London. Asian Development Bank. 210 p.
- Duncan, P; Jurgen, B; Bruenig, F; Burguess, P; Cabarde, B; Cassells, D; Douglas, J; Gilmour, D; Hardcastle, P; Hartshorn, G; Kaimowitz, D; Kishor, N; Leslie, A; Palmer, J; Putz, 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.

Eduarte, E; Segura, M. 1998. Determinación del carbono utilizando la calorimetría (Nota técnica). *Ciencias Ambientales* No.15: 54-55.

Enriquez, C; Bertsh, F; Salas, F. 1995. Fertilidad de suelos. Manual de laboratorio. San José, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 64 p

Erickson, J. 1992. El efecto invernadero: el desastre del mañana, hoy. Madrid, España, McGraw-Hill / Interamericana 217 p.

FAO. 1995. Evaluación de los recursos forestales 1990: Países Tropicales. Estudio FAO Montes No 112. 106 p.

-----, 1994. FAO Production Yearbook. 1994. Roma. (FAO. Statistics Series N° 76).

-----, 1982. Piensos tropicales: resúmenes informativos sobre piensos y valores nutritivos. Roma, FAO. 550 p

-----, 1981. El eucalipto en la reproducción mundial. Roma. FAO. 733p.

Fassbender, H.W. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Serie Materiales de Enseñanza N. 29. 491 p.

-----; Alpizar, L; Heuvelop, J; Enriquez, G; Folsters, H. 1985 (a). Sistemas agroforestales de café (*Coffe arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) o poró (*Erythrina poeppigiana*), en Turrialba, Costa Rica. III Modelos de materia orgánica y los elementos nutritivos. Turrialba. 35 (4):403-413.

-----; Alpizar, L; Heuvelop, J; Enriquez, G; Folsters, H. 1985 (b). Sistemas agroforestales de café (*Coffe arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) o poró (*Erythrina poeppigiana*), en Turrialba, Costa Rica. I Biomasa y reservas nutritivas. Turrialba. 35 (3): 233-242.

- Fischer , M.J; Rao, I.M; Ayarza, M.A; Lascano, C.E; Saenz, J.I; Thomas, J.R; Vara, R.R. 1994. Carbon storage by introduced deep rooted grasses in the South American Savannas. *Nature* 371: 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). Turrialba, Costa Rica; FAO - CATIE, SIDE. p.115 - 135.
- Finegan, B.1992. The management potential of neotropical secondary lowland rain forest. *Forest Ecology and Management* 47: 295-321.
- , 1997. Bases Ecológicas "Los ambientes tropicales y el ajuste de los organismos". Turrialba, Costa Rica. CATIE.
- , Delgado, D. 1997 ". Ciclos y flujos de materia y energía: Ecosistema, océano y atmósfera. Bases Ecológicas ". Turrialba, Costa Rica. CATIE. p11- 15.
- Fonseca, M.T. 1968. El poró. *Revista de Agricultura. (IICA). Costa Rica.* 40 (6-7): 102-112.
- Fournier, L. 1988. El cultivo del cafeto (*Coffea arábica* ) al sol o a la sombra un enfoque agronómico y ecofisiológico. *Agronomía Costarricense* 12 (1): 131-146.
- , L. 1996. Fijación de carbono y diversidad biológica en el agroecosistema cafetero. *Boletín PROMECAFE. (IICA). No 71: 7-13.*
- Giraldo, L.A. 1999. Potencial del guácimo (*Guazuma ulmifolia*) en sistemas silvopastoriles. *In* Agroforestería para la producción animal en América Latina. Memorias de una conferencia electrónica setiembre 1998. FAO. Estudio Producción y Sanidad Animal. No 143. p 295 - 308.

- Gregersen, H; Lundgren, A; Kengen, S; Byron, N. (1999). Avalúo de bienes y servicios forestales y su incorporación a las cuentas nacionales. FAO. Roma. No 124. 24p
- Gripma, P. 1969. *Eucalyptus deglupta* Bl. Una especie forestal prometedora para los trópicos húmedos de América Latina. Turrialba 12 (2): 267 - 283. Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC). 2000. Informe Especial del IPCC: uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. 24 p.
- Hall, D.O; Rao, K.K. 1994. Photosynthesis. 5 ed, Cambridge, Cambridge University Press. 211 p.
- Harmer, C.M. 1998. Impactos ambientales de la industria del café en El Salvador. Café de El Salvador. (El Salvador) Febrero-abril. 25-27.
- Herz, C. 1999. El Protocolo de Kyoto: una oportunidad que no debemos perder. Bosques y Desarrollo. 20 -21: 8-13 .
- Holdridge, L.R. 1978. Ecología basada en las zonas de vida. Trad. H. Jiménez S. San José, Costa Rica. IICA 216 p.
- Instituto de Fomento y Asesoría Municipal. IFAM. 1981. Cantones de Costa Rica. Datos básicos. Departamento de Planificación. San José, Costa Rica. 450p.
- Instituto del Café de Costa Rica. ICAFE. 1998. Manual de recomendaciones para el cultivo del café. Heredia, Costa Rica. 193 p
- Instituto Forestal (INFOR). 1999. Medición de captura de carbono en bosques de Chile y promoción de mercado mundial de carbono. Valdivia. Chile. Proyecto FONDEF D98I1076. 4 p
- IPCC. 2000. Uso de la tierra, cambio del uso de la tierra. Informe especial. Resumen para responsables de políticas. Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Montreal, Canadá. 24 p.

- Kass, M; Abarca, S. 1988. El poró (*Erythrina poeppigiana*) como suplemento proteico de vacas lecheras en pastoreo. CATIE. Agroforestería, No 2 : 3
- Kürsten, E; Burschel; P. 1993. CO<sub>2</sub>-mitigation by agroforestry. Water, Air and Soil. Pollution 70: 533-544.
- Kyrlunk, 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.
- Libreros, H.F. 1990. Efecto de depositar en el suelo material de poda de poró (*Erythrina poeppigiana*) sobre la producción y calidad de la biomasa del king grass (*Pennisetum purpureum* x *P. typhoides*) establecido en asocio. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 116 p.
- López, A. 1998. Aporte de los sistemas silvopastoriles al secuestro de carbono en el suelo. Tesis Mag. Sc. Turrialba. CATIE. Costa Rica. 50 p.
- Lugo, A. E; Brown , S. Chapman, G. 1988. An analytical review of production rates and stem-wood biomass of tropical forest plantations. Forest Ecology and Management. 23 :179-200.
- Márquez, L. 1997. Validación de campo de los métodos del Instituto Winrock para el establecimiento de parcelas permanentes de muestreo para cuantificar carbono en sistemas agroforestales. Guatemala. Universidad del Valle de Guatemala. 45 p.
- Márquez, L. 2000. Elementos técnicos para Inventarios de Carbono en Uso del Suelo.. Guatemala, Fundación Solar. 36 p
- Manoso, P. 1998. Cambio climático y fijación de carbono: La experiencia de Costa Rica. Revista de Ciencias Ambientales No 1528-35 p.
- Medina, B; López, E; Alvarado, J. 1998. Cuantificación estimada del dióxido de carbono fijado por el agroecosistema café en Guatemala. CAFETIN. No 9: 14-16.

- Mora, E. 1998. Protección de bosque, venta de carbono y protagonismo del mercado. *Revista de Ciencias Ambientales* No 15: 6-19 p.
- Montealegre, M. 1956. Cafetales a pleno sol, versus cafetales a la sombra. *Suelo Tico, Costa Rica*. No 9: 199-204.
- Montenegro, J; Abarca, S. 1999. Fijación de carbono, emisión de metano y de óxido nítrico en sistemas de producción bovina en Costa Rica. *In Intensificación de la Ganadería en Centroamérica: beneficios económicos y ambientales. Seminario Internacional*. Turrialba, Costa Rica. mayo. Turrialba, Costa Rica, CATIE. p 151 - 174.
- Navarro, C. 1985. Producción de biomasa de *Eucalyptus deglupta* en una plantación de 8 años en Turrialba, Costa Rica. *Silvoenergía*. No 8 : 1-4.
- Oficina Costarricense de Implementación Conjunta.(OCIC) 1998. Actividades de Implementación Conjunta en Costa Rica. San José, Costa Rica. 6 p.
- Otárola, M; Venegas, G. 1999. Propuesta de un sistema de compensación de servicios ambientales para los robledales de la Cordillera de Talamanca. Tesis Lic. Cs. For. en Manejo forestal. Heredia, Costa Rica. Escuela de Ciencias Ambientales. Facultad de la Tierra y el Mar. Universidad Nacional, 150 p
- Pashin, A.J, Zeeuw, C. 1970. Textbook of wood technology. Structure, identification, defects and uses of the comercial woods of the United States. MacGraw-Hill book company, Inc. New York. Vol 1. 705 p
- Pedroni, L. 1999. Implementación conjunta y desarrollo limpio: Antecedentes a nivel mundial. *Manejo Forestal Tropical*. (CATIE). No 10: 1 -12
- Perfecto, I; Rice, R.A; Grienberg,R; Van der Voort, M.E. 1996. Shade coffee: a disappearing refuge for diversity. *Biosciencie* 46: 598-608.

- Pezo, D; Ibrahim, M 1999. Sistemas silvopastoriles. 2 ed. CATIE, Turrialba Costa Rica. Materiales de Enseñanza. No 44. 275 p.
- Pomareda, C. 1999. Carbon sequestration through pasture intensification: technical, economic and management issues for the livestock and environment initiative. San José, Costa Rica. The World Bank /FAO 47p.
- Radipil, B; Bertrand, B. 1999. Desafíos de la caficultura en Centroamérica. San José. Costa Rica. IICA-PROMECAFE: CIDRA:IRD-Francia. 496 p.
- Rice, R. A. 1991. Observaciones sobre la transición del sector cafetalero en Centroamérica. Agroecología Neotropical. 2: 1-16.
- Ramírez, O; Gómez, M. 1999. Estimación y valoración económica del almacenamiento de carbono. Revista Forestal Centroamericana. 2 (27) : 17-22.
- Ramírez, P. 1998. Gases de efecto invernadero y venta de carbono: Una visión en conjunto. Revista de Ciencias Ambientales No15.: 20 - 27.
- Ramírez, O ; Rodríguez, L; Finegan, B; Gómez, M. 1999. Implicaciones económicas del secuestro de CO<sub>2</sub> en los bosques naturales. Revista Forestal Centroamericana. 2 (27) : 10-16.
- Ramírez, O; Finegan, B; Rodríguez, L, Ortiz, R. 1994. Análisis económico de impactos ambientales in: Estudios de caso: Evaluación económica del servicio ambiental de almacenamiento de Carbono: El caso de un bosque húmedo tropical bajo diferentes estrategias de mercado sostenible. Turrialba, Costa Rica, CATIE, p 212-224.
- Rosenberg, N. J; Izaurrealde, C. R. 2000. Storing carbon in agricultural soils to help mitigate global warning. Issue Paper. Council for Agricultural Science and Technology. 14: 1-8.

- Ruso, R. O. 1983. Efecto de la poda de *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.P. Cook (Poró), sobre la nodulación, producción de biomasa y el contenido en el suelo en un sistema agroforestal café-poró. Tesis Mag. Turrialba, C. R. Programa UCR/CATIE. 108p.
- Salazar, R. 1988. Comportamiento de *Eucalyptus deglupta* en Costa Rica. Silvoenergía No 27 : 1-4.
- Sánchez, M. 1999. Sistemas Agroforestales para intensificar de manera sostenible la producción animal en América Latina. Memorias de una conferencia electrónica setiembre 1998. FAO. Estudio Producción y Sanidad Animal. No143. p. 515.
- , M. 2000. Sistemas agroforestales para intensificar de manera sostenible la producción animal en Latinoamérica Tropical. In Conferencia electrónica FAO sobre Agroforestería para la producción animal en Latinoamérica. Roma, FAO. 8p.
- Shand, E. 1997. Biodiversidad y retención de carbono. In Congreso Forestal Mundial (11, Antalya, Turquía). Actas. Antalya, Turquía, Ministry of Forestry. p 143.
- Shroeder, P. 1994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. Agroforestry Systems. 27 : 89-97.
- 1992. Carbon storage potential of short rotation tropical tree plantations. Forest Ecology and Management 50: 31-41.
- Skerman, P.J; Riveros, F. 1992. Gramíneas Tropicales. Roma, FAO. 850 p.
- 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. Cs. For, Heredia, Costa Rica., UNA. 127 p.

- , M 1999. Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados en el Area de Conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. Tesis Mag Sc. CATIE, Turrialba. Costa Rica. 120 p.
- Sención, G.J. 1996. Valoración económica de un ecosistema de bienes y servicios ambientales en un bosque subtropical: Esatudio de caso San Miguel La Palotada, Petén, Guatemala. Tesis Mag Sc. CATIE, Turrialba. Costa Rica. 132 p.
- Solomon, E; Ville, C; Davis, P. 1987. Biología. México, D.F, Editorila Interamericana. 1325 p.
- Stella, R. 1999. La agrosilvicultura en Argentina: alternativa de manejo forestal. Bosques y Desarrollo. No 20 - 21: 91-94.
- Takle, E. 1996. Ciclo del carbono, metano. Producción Internet Tucumán. 1:1-6.
- Tattenbach , F; Pedroni, L. 1999.. Implementación conjunta y desarrollo en limpio: La experiencia en Centroamérica. Manejo Forestal Tropical No 11:1 - 7.
- Tosi, J. 1980. Symposium on the role of tropical forests in the world carbon cycle for carbon dioxide effects research and assement program: Río Piedras, Puerto Rico. Tropical Sciencie Center. San José, Costa Rica.
- Trouve, C; Mariotti, A; Schwartz, D; Guillet, B. 1994. Soil organic carbon dynamics under eucaliptus and pinus planted on savannas in Congo. Soil. Biol. Biochem. 26(2): 287-295.
- Villareal, M. 1992. Evaluación comparativa de ratana (*Ischaemum ciliare*) como especie forrajera. Agronomía Costarricense. 16 (1) : 37-44 p
- Villareal,M; Bustamente, L. 1996. Respuesta del pasto ratana (*Ischaemum indicum*) a la fertilización nitrogenada. In Congreso Nacional Agronómico y de recursos naturales (10, 1996, San José, Costa Rica).. Memoria. San José, Costa rica, EUNED/EUNA. V 3, p 165.

Veldakamp, E. 1993. Soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropic of Costa Rica. Ph.D. Thesis. Wageningen Agricultural University. The Netherland. 117p.

Winrock International. 1998. Carbon sequestration and sustainable coffee in Guatemala. Arlington. 18 p.

### **COMUNICACIÓN PERSONAL.**

- ❖ Andrade, Hernán. Consultor Internacional en Agroforestería. CATIE.
- ❖ Arias, J.E. 2000. Técnico de ICAFE, Oficina Regional del Valle Central Occidental.
- ❖ Calvo, Gustavo. Comisión de la Red Agroforestería Regional de Centroamérica.
- ❖ Eduarte, Eduardo. Universidad Nacional. Heredia.
- ❖ Jiménez, H. 1997. Director, Laboratorio de Suelos y Nutrición Vegetal. ANACAFÉ, Guatemala.
- ❖ Márquez, Lilian. Fundación Solar. Cambio Climático. Guatemala
- ❖ Segura, Milena. Consultora Internacional en Proyectos de Carbono. CATIE.
- ❖ Ugalde, Luis. Unidad de Comunicación e Informática. CATIE

### **COMUNICACIÓN POR MEDIO DE CORREO ELECTRÓNICO.**

- ❖ Brow, S. Senior Program Officer. Winrock International. Albany, Oregon  
[sbrown@winrock.org](mailto:sbrown@winrock.org)
- ❖ Castellanos, E. Centro de Estudios Ambientales. Universidad del Valle de Guatemala.  
[ecastell@uvg.edu.gt](mailto:ecastell@uvg.edu.gt)
- ❖ Delaney, M. Carbon Monitoring Specialist. Winrock International. Albany, Oregon.  
[md@winrock.org](mailto:md@winrock.org)
- ❖ Marquéz, L. PhD. Public Policy. Bloomington. Indiana. [limarque@indiana.edu](mailto:limarque@indiana.edu)
- ❖ Powell, M. Carbon Monitoring Specialist. Winrock International. Albany, Oregon  
[mpowell@winrock.org](mailto:mpowell@winrock.org)

## SITIOS VISTADOS EN EL WEB:

[http:// www.fao.org](http://www.fao.org)

<http://www.iitap.iastate.edu/egccourse/chem/carbon>

<http://www.winrock.org>

<http://capas.org>

<http://production.com>

<http://www.ipcc.ch>

<http://agroforester.com>

<http://rcfa-cfan.org/english>

<http://www.wri.org>

<http://www.cast-science.org>

<http://www.unfccc.de>

## Anexo 1: Breve descripción de las especies en estudio.

### A) *Coffea arabica* (café)

El café arábico se originó en las tierras altas de más de 1000 metros sobre el nivel del mar en Etiopía y Sudán, Africa. Fue introducido y desarrollado en Costa Rica a principios del siglo XIX, distribuyéndose por todo el territorio nacional, sin embargo el mayor porcentaje del área cultivada se encuentra ubicada en el Valle Central (ICAFE, 1998).

La temperatura favorable promedio anual para el cafeto se ubica entre los 17 °C a 23 °C, con una oscilación diaria máxima de 10 °C, la mínima media entre 15 °C a 17°C y la máxima media entre 25 °C a 28 °C. La temperatura es el componente más relacionado con el crecimiento, bajas temperaturas ocasionan un lento desarrollo y maduración; por el contrario, altas temperaturas aceleran senescencia de los frutos, anomalías de la flor y fructificación limitada; además propician la ocurrencia de plagas y enfermedades, entre otros factores (ICAFE, 1998).

Taxonómicamente, el café esta definido entre la familia de las Rubiaceas, que posee cerca de 400 géneros y 5000 especies principalmente árboles o arbustos. En el género *Coffea* existen más de 100 especies, sin embargo sólo tres de ellas, se cultivan comercialmente, en especial *Coffea arabica*, *C. canephora* o *C. robusta* (ICAFE, 1998).

La planta de café tiene un solo eje, en cuyo extremo hay una zona de crecimiento activo permanente que va alargando el tallo, formando nudos y entrenudos. Las ramas laterales se alargan y la parte lateral del eje vertical continúa creciendo, así se producen nuevas ramas en diversos ángulos, por lo cual la planta adquiere una forma cónica.

El eje central sólo produce yemas vegetativas llamadas bandolas, son las ramas primarias y dan origen a ramas secundarias, de las que a su vez pueden salir ramillas terciarias; estas ramas secundarias y terciarias constituyen los que se conoce como palmilla. Si el punto de crecimiento del eje central es cortado, ciertas yemas latentes ubicadas en el mismo producen nuevos ejes verticales; concentrándose la cosecha en el nuevo crecimiento de ramas inferiores y nuevas del ápice (ICAFE, 1998).

La especie *C. arabica* es la más importante en el mundo y la única que se cultiva en Costa Rica por sus aspectos de calidad, homogeneidad y organolépticos; pueden definirse dos subtipos de acuerdo al origen *Typica* y *Bourbón*. En el caso particular de esta investigación se basa en el estudio del subtipo *Bourbón*, variedad *Catuaí*.

La variedad *Catuaí*, es el resultado del cruce entre el *Mundo Novo* y el *Caturra*, con el fin de reunir en una sola variedad las características agro - productivas en una planta de porte pequeño como el *Caturra*. El *Catuaí* ha mostrado en Costa Rica una reducida variabilidad y gran uniformidad fenotípica, con amplia adaptación a diferentes ambientes (ICAFE, 1998).

### **B) *Eucalyptus deglupta* (eucalipto)**

*Eucalyptus deglupta* es un árbol tropical de la familia *Myrtaceae*, con distribución discontinua, que incluye las Islas de Mindanao, en las Filipinas, Sulawesi, Ceram e Irian Java y Papúa Nueva Guinea. Es una especie de climas muy húmedos en donde la precipitación varía de 2000 a 5000 mm y las temperaturas de 24°C a 32°C. Para su desarrollo óptimo requiere por lo menos 100 mm de precipitación en el mes más seco. En Costa Rica, el árbol crece bien en suelos profundos ligeramente ácidos, siempre que no estén compactados y no tengan problemas de drenaje (Salazar y Jiménez 1988; De Camino, 1987). En sitios donde el viento es muy fuerte, su crecimiento es menor y tiende a formas asimétricas (CATIE, 1994).

En vista del rápido crecimiento de la especie, es recomendable usar un distanciamiento amplio dentro de las plantaciones puras en el caso de que no se puedan vender los productos de raleo (Gripma, 1969). Cuando se asocia con cultivos anuales o perennes, la distancia entre árboles se debe de aumentar considerablemente; cuando se asocia con café se le ha plantado a 5,0 x 3,0 m (660 árboles ha<sup>-1</sup>) con la intención de eliminar posteriormente el café. De no ser así, se debe tratar de mantener un máximo de 100 árboles ha<sup>-1</sup>. La combinación de *deglupta* con café, es una de las más exitosas si se maneja bien la densidad, debido a que el árbol aprovecha los cuidados que se le den al café y crea condiciones microclimáticas adecuadas para el cultivo (CATIE, 1994).

El tronco de este árbol es generalmente recto y en forma cilíndrica, libre de ramas muertas, con cierta frecuencia de gambas. Su corteza es delgada y su caída ocurre por sectores longitudinales. Posee una copa moderadamente abierta con hojas horizontales que permiten una mejor captación de la luz. Sus hojas son pecioladas opuestas y cuando maduran son alternas y se tornan de un color verde pálido. Se caracteriza por sus pequeñas y numerosas flores blancas en umbelas que forman pániculas terminales y axiales. El fruto es una cápsula pedicelada, ovoide o globosa (Gripma 1969).

*E. deglupta* es conocido como eucalipto o deglupta es una especie de crecimiento muy rápido (CATIE, 1994); la forma recta y cilíndrica de los árboles jóvenes ofrece buenas posibilidades para aprovechar los primeros raleos para productos como postes de cerca y pilones. La madera es de conservación relativamente fácil y es usada para muchos fines al ser producida en grandes volúmenes (Gripma, 1969).

### **C) *Erythrina poeppigiana* (poró)**

*Erythrina poeppigiana* es una papilionácea que pertenece a la familia Leguminosae, crece en zonas tropicales con precipitaciones medianas a altas, desde el nivel del mar hasta 4000 metros. Usualmente es propagado por estacones que enraizan y producen copa rápidamente; en condiciones de libre crecimiento alcanza una altura media de 22 m, pudiendo llegar hasta 30 m en menos de diez años en condiciones apropiadas de suelo y manejo. Asociado como sombra en cafetales alcanza de 2 a 5 m debido a las podas frecuentes que se hacen en este sistema. En condiciones naturales pierde sus hojas en época seca; esta leguminosa es usada como árbol de sombra entre cultivos, especialmente café y cacao, donde es manejado por podas periódicas para regular luminosidad y dejar el material de poda como abono verde (Ruso, 1983; Libreros, 1990; Camero *et al.*, 1995).

En Costa Rica fue introducido en 1892, importado desde la Isla de la Reunión (al este de África) (Fonseca 1968). Las primeras siembras de café que se hicieron en la Meseta Central de Costa Rica tenían como sombra únicamente plátano o guineo; luego se adoptó el poró debido a que se observó que las hileras de café que quedaban próximos a las cercas de poró producían más cosechas y se mantenían en mejor estado durante todo el año. Eso indujo a propagar esa sombra en todos los cafetales que existían y en los que

se fueron estableciendo; desde entonces la importancia del poró ha estado ligada con el desarrollo agrícola del país, tanto como cercas vivas, árboles en cafetales (Fonseca, 1968), como una alternativa proteica para la producción de leche (Kass y Abarca, 1988).

#### **D) *Brachiaria brizantha* (brizanta o braquiaria)**

Es una planta oriunda de África Tropical, pero introducida en la actualidad en la mayor parte de los países tropicales; su hábitat corresponde a valles de pastos y montes abiertos. Es una gramínea conocida como Saint Lucía grass (Queensland), estrella de África o pasto alambre en América Latina (Sherman y Riveros 1992).

*B. brizantha* es una planta perenne hasta los 120 cm de alto, con gruesas cañas erectas y limbos foliares ampliamente lanceolados. Posee de 2 a 8 racimos de hasta 15 cm de largo con dos hileras de superposición casi sésil; en la parte inferior espiguillas redondeadas de 4 a 6 mm de largo y poseen un borde subapical de largos vellos purpúreos; muy variable en cuanto a aporte, hojiosidad, pubescencia y rendimiento (FAO, 1982). La temperatura máxima para su crecimiento es de 30-35 °C, crece desde el nivel del mar hasta 3000 msnm. En general requiere precipitaciones superiores a los 500 mm. Sus principales atributos son: su productividad, resistencia a la sequía, capacidad de propagación, eliminación de las malezas, resistencia al sobrepastoreo posibilidad de crecer a la sombra, aunque no resiste el fuego (Sherman y Riveros 1992).

#### **E) *Acacia mangium* (acacia, mangium)**

*Acacia mangium*, es una especie indígena de la parte noroeste de Australia, Papúa Nueva Guinea y del este de Indonesia, incluyendo las Islas Molucas. En América Central se le conoce como mangium o acacia. Es un árbol que en su hábitat natural alcanza de 25 a 30 metros de altura y hasta 90 cm de dap; el fuste es reto y libre de ramas hasta las dos terceras partes de su altura total (CATIE, 1992).

Mangium pertenece a la familia *Leguminosae* (subfamilia *Mimosoideae*). En sus áreas de origen crece hasta los 720 msnm, con temperatura desde 12 °C hasta 34 °C y precipitaciones de 1500 a 4500 mm año<sup>-1</sup>. En América Central fue introducida desde 1979 a nivel de investigación y a nivel mayor, sólo a partir de 1984 en Costa Rica, Panamá y Honduras (CATIE, 1992).

El fuste de éste árbol es recto y libre de ramas hasta las dos terceras partes de su altura total. Presenta filodios simples y de borde entero; sus flores son en espigas pequeñas blancas; los frutos son una especie de vaina angosta de aproximadamente 10 cm de largo y retorcidas; las semillas son de color negro de 3 a 5 mm de longitud y testa dura (CATIE, 1992).

**F) *Ischaemun indicum* (ratana)**

El pasto *Ischaemun indicum* es conocido también por los sinónimos: *I. ciliare*, *I. aristatum* y *Pheleum indicum*; popularmente se conoce como pasto ratana, retana o rotana. Es una especie nativa y endémica del subcontinente Indio y sureste de Asia, adaptada a terrenos pobres y húmedos (Villareal, 1992; Arosemena, 1990). En algunas regiones del Asia, se le menciona entre los pastos dominantes. En América Tropical se encuentra presente desde 1948; en la década de los setenta se informó de su presencia en el trópico muy húmedo de Panamá, indicando que se trata de una gramínea invasora de pastos mejorados (Arosemena, 1990).

En la década de los setenta e inicio de los ochenta, el pasto fue rápidamente difundido entre los productores debido a su facilidad de siembra, a la disponibilidad de semilla y a su rapidez de establecimiento; de esta forma, ratana paso a ser de una especie prácticamente desconocida a una especie que representaba un importante porcentaje dentro de los pastos predominantes en las explotaciones ganaderas en la Región Huetar Norte y Atlántica de Costa Rica (Villareal, 1992; Arosemena, 1990)

El pasto ratana es una gramínea endémica en áreas del trópico húmedo de América Central, particularmente en Panamá y Costa Rica; la misma cuenta con la limitante de ser una especie agresiva, de porte bajo que forma una cubierta densa y enmarañada, con baja disponibilidad de forraje, tanto en época de baja como de alta precipitación (Arosemena, 1990; Villareal y Bustamente, 1996).

**Anexo 2:** Ubicación de la unidades de muestreo en los sistemas de producción con café y pasturas.

Sistema	Ubicación	Propietario	Área (ha)
Café a pleno sol	Grecia, Alajuela	Joaquín Cruz	8
Café con árboles de eucalipto de cuatro años	Rosario de Naranjo, Finca El Pílon, Alajuela	Carlos Gallegos	50
Café con árboles de eucalipto de seis años	Rosario de Naranjo, Finca La Espiga y Naranjo Centro, Alajuela	Carlos Gallegos Ricardo Céver	50
Café con árboles de eucalipto de ocho años	Rosario de Naranjo Finca La Espiga y Naranjo Centro - Beneficio San Juanillo	Carlos Gallegos	10 10
Café con árboles de poró manejados	Naranjo Centro	Miguel González	30
Ratana a pleno sol	Guácimo, calle El África	Edgar Solís González	22
Brizanta a pleno sol	Guácimo, calle El África	Juan Rafael Corrales	10
Brizanta con acacia y brizanta con eucalipto	Pococí, Finca Las Delicias	Federico Rojas	3

### **Anexo 3:** Procedimiento en el campo para coleccionar muestras de hojarasca y demás material muerto.

La toma de la muestra de hojarasca se realizó previa a la corta el cafeto bajo el siguiente procedimiento:

- Se rotularon bolsas de papel con la identificación de cada parcela.
- Se colocó el marco de 50 x 50 cm a dos distancias: 15 cm y 100 cm a partir del eje central de planta, de forma tal que se logró obtener en la muestra material proveniente de los dos cafetos, más la acumulada por el árbol dentro del cafetal en el caso de los sistemas agroforestales.
- Colocado el marco se cortó el material ubicado dentro del mismo con ayuda de un cuchillo muy filoso.
- Cortado el material, se procedió a clasificar el mismo en dos categorías:

Material vegetal bien diferenciado: todo aquel material que se encontró en la superficie del suelo aún en su forma original o se logró observar su forma: hojas, ramas de café, flores, tallos, cáscaras, etc.

Material no diferenciado: aquel material que se encontró en algún estado de descomposición, no siendo posible distinguir su forma. Se ubicó dentro de esta clasificación el material que se encontró en estado de putrefacción avanzada, así como a la mezcla de residuos orgánicos mezclados con el suelo superficial, lo que hacía sumamente difícil distinguir entre suelo y material vegetal.

- Para efectos del estudio se trabajó únicamente como hojarasca el material vegetal bien diferenciado.
- Se coleccionó el material y se depositó en una bolsa grande de plástico.
- Se recolectaron en total cuatro muestras de hojarasca por parcela en forma giratoria a las manecillas de un reloj y ubicándolas al lado arriba y debajo de cada planta, tomando una muestra por planta. Por ejemplo: planta uno, se tomó la muestra al lado arriba a una distancia de 15 cm a partir del eje central de la planta; planta dos, se tomó la muestra al lado abajo a una distancia de 100 cm a partir del eje central de la planta; planta tres, se tomó la planta al lado derecho a una distancia de 15 cm a partir del eje central de la planta, y planta cuatro, se tomó la muestra a 100 cm de distancia del eje central de la planta, tomando las cuatro muestras en forma giratoria a través de

las plantas de café seleccionadas en la parcela, para un total de cuatro muestras por parcela.

- Colectadas las cuatro muestras se colocaron todas en la bolsa grande de plástico, para ser pesadas
- Luego se procedió a homogenizar el material y extraer una muestra representativa de aproximadamente 250 gramos por parcela, para un total de 45 muestras entre todas las parcelas (36 parcelas establecidas para los diferentes sistemas agroforestales con café y 9 parcelas establecidas para el café a pleno sol).

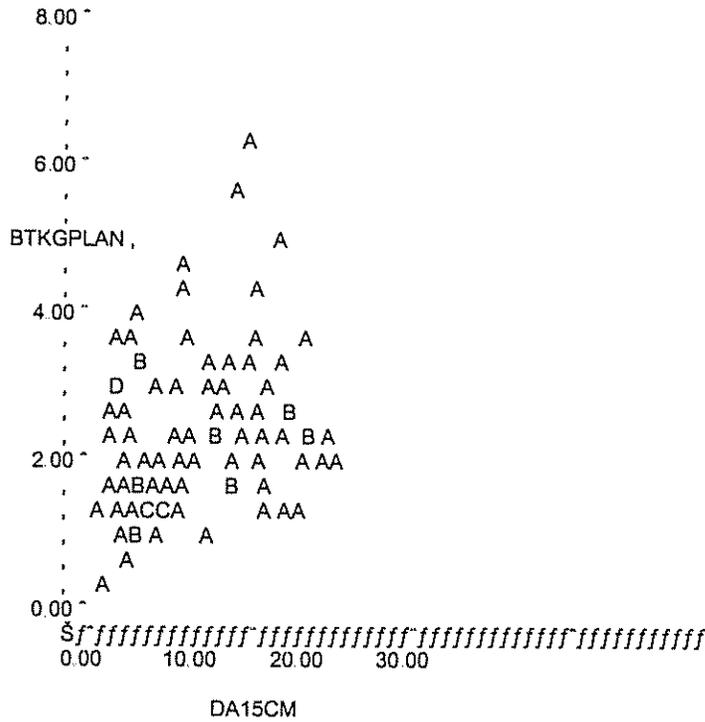
La muestra de 250 gramos fue colocada en una bolsa de papel, previamente rotulada y se envió al laboratorio para la determinación de peso seco.

#### **Anexo 4: Densidad aparente del suelo: toma de muestra en el campo**

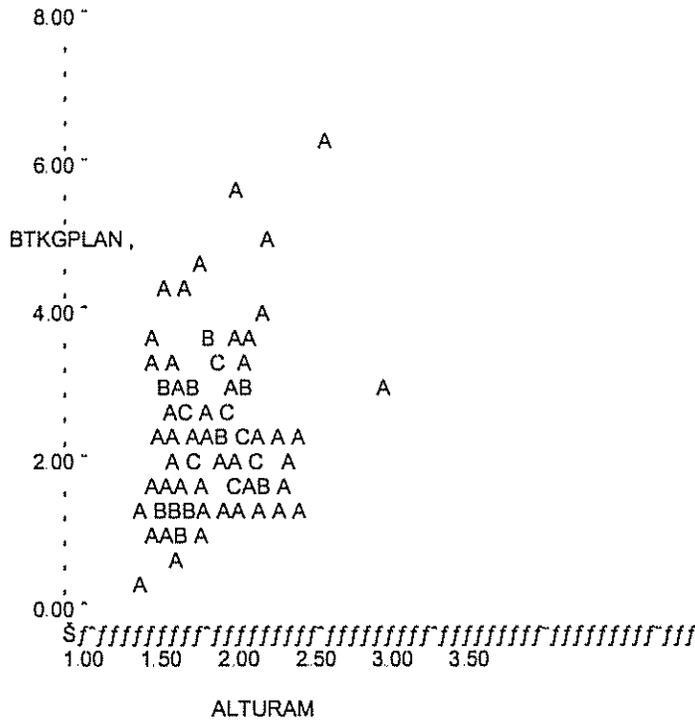
La muestra para determinar densidad aparente se tomó en cada una de las diferentes plantaciones evaluadas mediante el método del cilindro de volumen conocido. El procedimiento fue el siguiente:

- Se identificó cada cilindro con su respectiva tapadera y se le otorgó un código referente a la parcela y plantación perteneciente.
- Se preparó la superficie del suelo retirando material vegetal y demás residuos que dificultaban el muestreo.
- Con la ayuda de un martillo de hule, se introdujo el cilindro en el suelo a una profundidad de 5 cm sin comprimir el suelo contenido en el cilindro.
- Se retiró el cilindro del suelo y se procedió a remover el exceso de suelo de los extremos del cilindro.
- Se guardó el cilindro dentro de una bolsa plástica con los respectivos códigos de identificación.
- Comprobada la identificación de la muestra se colocó en una caja de cartón para ser enviada al laboratorio de suelos.

**Anexo 5:** Gráficos de dispersión de los datos de las plantas de café para generar el modelo de biomasa.



B: biomasa en kilogramos.  
 A: diámetro de la planta tomado a 15 centímetros del suelo



B: biomasa en kilogramos.  
A: altura de la planta en metros.

**Anexo 6:** Procedimiento en el campo para evaluar materia seca en cafetos, hojarasca y pasturas.

- Las plantas cortadas de café, como las muestras de hojarasca y pasto se tomaron en el campo y se les anotó su peso fresco.
- De cada material cortado o recolectado se obtuvo una muestra de 250 gramos.
- La muestra se llevó al laboratorio para determinar materia seca.
- En el laboratorio se colocó cada muestra dentro de un horno a 65 °C hasta peso constante.
- Secas las muestras, se midió el peso seco.
- Con la información obtenida se calculó la cantidad de biomasa por individuo o por área, según fuese el caso.

## Anexo 7: Determinación de la gravedad específica de la madera.

Las muestras para determinar la gravedad específica<sup>1</sup> son de 5x5x15 cm utilizando las normas del ASTM. Para la gravedad específica, se utilizó el método de inmersión en agua destilada.

1. Se colocan las muestras de tres a cuatro días en un horno a 75°C y a una presión de 15 atmósferas para obtener el peso seco al horno (g).
2. Luego se sellan las muestras con parafina industrial y se obtiene el peso de esta con parafina (g).
3. Con los dos pesos anteriores se calcula el peso de la parafina (g)
4. Este peso de la parafina (g) se convierte a volumen (m<sup>3</sup>), dividiéndolo entre la gravedad específica de ésta (0.90 g cm<sup>3</sup>).
5. Luego se obtiene el peso del sistema sin muestra (g), compuesto por una balanza, un recipiente con 3 litros de agua destilada y una prensa para la muestra sumergida.
6. Se coloca la muestra sobre la prensa y se sumerge en el agua destilada; es importante recalcar que ésta no debe tocar las paredes del recipiente. Luego se obtiene el peso del sistema con muestra (g).
7. Con la diferencia de los dos pesos anteriores se calculó el peso del agua desplazada (g).
8. El peso anterior se convierte a volumen de agua desplazada (cm<sup>3</sup>) dividiéndolo entre la gravedad específica del agua (1 g cm<sup>3</sup>).
9. Se calcula el volumen real de la muestra (cm<sup>3</sup>) restándole al volumen obtenido anteriormente el volumen de la parafina.
10. Por último se calcula la gravedad específica (g cm<sup>3</sup>) con la siguiente fórmula:

$$GE = PSH \div VM_{sp}$$

donde: G.E.: Gravedad específica (t m<sup>3</sup>); PSH: Peso seco al horno (g); VM<sub>sp</sub>: Volumen de la muestra sin parafina (cm<sup>3</sup>).

<sup>1</sup> Se define como el peso de un bloque de madera secado al horno dividido por el peso de una cantidad igual de volumen de agua y es expresado en decimales" (Panshin y Zeeuw 1970).  
1m<sup>3</sup> = 1000000 cm<sup>3</sup>, 1 t = 1000 kg, por lo tanto g cm<sup>3</sup> = t m<sup>3</sup>.

## Anexo 8: Procedimiento para tomar la muestra de pastura

- Se rotularon bolsas de plástico con la identificación de cada sistema y número de muestra.
- Se colocó el marco de muestreo de 50 x 50 cm en el suelo y con ayuda de un cuchillo muy filoso se procedió a cortar todo el material vegetal existente, tanto vivo como muerto hasta el ras del suelo, corroborando que mantenga todo el material ubicado dentro del cuadro sin incluir las raíces.
- Se procedió a cortar el material ubicado dentro del marco y se depositó en una bolsa grande de plástico.
- Las muestras se tomaron en forma de zigzag garantizando representatividad del sistema en monocultivo evitando el efecto de orilla.
- En los sistemas silvopastoriles se toman las muestras a 1,5 m y 4,5 metros a partir del árbol con la finalidad de obtener material representativo proveniente bajo y fuera de la sombra de los árboles
- Cada una de las muestras se colocó en la bolsa grande plástica y se obtuvo el peso fresco.
- Se homogenizó el material y se obtuvo una muestra compuesta de 250 gramos, en total se colectaron cuatro muestras compuestas de pasto por parcela en cada sistema por mes.
- Colectada la muestra compuesta en el campo se colocó en la bolsa de plástico previamente rotulada.
- Los 250 gramos se colocaron luego en una bolsa de papel rotulada y se le realizó en el laboratorio el análisis de materia seca para obtener biomasa.
- Las muestras fueron tomadas tanto en días lluviosos como secos garantizando representatividad de las condiciones reales de campo a las cuales se ve expuesto el material.

**Anexo 9:** Valoración del servicio ambiental de almacenamiento y/o fijación de carbono según el pago vigente por servicios ambientales en Costa Rica.

Se estimó que una de plantación forestal típica puede almacenar anualmente  $5,74 \text{ t C ha}^{-1}$  según Corrales y Alpízar (1998); (se tomó como referencia éste estudio dado que constituye la actualización más reciente del documento original: Potencial de carbono y fijación de dióxido de carbono de la biomasa en pie por encima del suelo en los bosques de la República de Costa Rica, documento de discusión en la Agenda Centroamericana para el siglo XXI). Sobre ésta base, se multiplicó el dato por la responsabilidad del contrato de 20 años (Costa Rica, 1999), obteniendo con ello, la cantidad de carbono esperada que se almacené durante el periodo de concesión de las plantaciones en el proyecto; para los posteriores análisis se tomó la cantidad de carbono a los 10 años, partiendo de que en los primeros no se alcanza la cantidad de carbono promedio estimada, sino que se mantiene por debajo de ella, pero que luego a la mitad del proyecto la cantidad de carbono va a ser incrementada por encima del promedio (Figura 5).

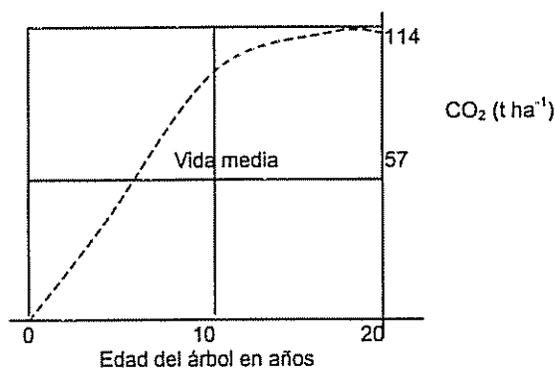


Figura 5: Toneladas de carbono almacenadas por plantaciones forestales durante un periodo de 20 años. Costa Rica, 2000.

Actualmente en el país se paga la suma de 154000 colones (US\$ 488,89) por hectárea por servicios ambientales a los productores que tienen plantaciones forestales. Cifra que refleja el pago valorando todos los servicios ambientales del ecosistema y no la valoración por servicio ambiental individual dentro de un ecosistema.

La determinación del monto a pagar por el servicio ambiental de fijación y/o almacenamiento de carbono se desarrolló a partir de la cantidad de carbono fijada y/o almacenada en la mitad del proyecto (10 años) por las plantaciones forestales y 18 % de la cantidad del pago por servicios ambientales (Otárola y Venegas, 1999), el 82 % restante es el valor de los otros servicios ambientales.

Los cálculos correspondientes son los siguientes:

A- Cantidad de carbono almacenado y/o fijado.

Toneladas de carbono almacenadas y/o fijadas promedio por plantaciones forestales en Costa Rica: 5,74. Periodo de responsabilidad del proyecto : 20 años.

$5,74 \text{ t C ha}^{-1} \times 20 = 114,80 \text{ t C ha}^{-1}$  en el periodo de 20 años.

$5,74 \text{ t C ha}^{-1} \times 10 = 57,40 \text{ t C ha}^{-1}$  en el periodo de 10 años.

B- Valor de la tonelada de carbono fijada y/o almacenada:

$\$488,89 \text{ ha}^{-1} \times 0,18 = \$88 \text{ ha}^{-1}$ .

$\$88 \text{ ha}^{-1} / 57,40 \text{ t C ha}^{-1} = \$ 1,53 \text{ t C}$ .

Anexo 10: Reportes de laboratorio.

1-) Análisis correspondientes a la fracción de carbono:

Fracción de Carbono	Desviación standar	Fuente
0.43	0.013	Parte lignificada de la planta de café
0.46	0.017	Follaje de la planta de café
0.43	0.012	Hojarasca de café al sol
0.40	0.033	Hojarasca de café bajo sombra <i>E. deglupta</i>
0.37	0.060	Hojarasca de café bajo sombra <i>E. poeppigiana</i>
0.49	0.013	<i>E. deglupta</i> de 4 años de edad
0.46	0.004	<i>E. deglupta</i> de 6 años de edad
0.48	0.004	<i>E. deglupta</i> de 8 años de edad
0.47	0.002	<i>E. poeppigiana</i> > 10 años de edad

2-) Determinación de la gravedad específica de la madera del tallo y ramas de *Erythrina poeppigiana* de > 10 años de edad.

Especie	Densidad específica t m <sup>3</sup>	Desviación standar
<i>E. poeppigiana</i>	0.252	0.11

3-) Porcentajes de materia orgánica y densidad aparente (a 5 cm de profundidad) en sistemas de producción con pasto.

Especie	%MO	DA g/cm <sup>3</sup>
Acacia	4,79	0,89
Acacia	6,39	0,89
Eucalyptus	5,62	0,89
Eucalyptus	5,62	0,89
Eucalyptus	5,67	0,89
Brizanta sol	4,07	1,03
Brizanta sol	3,13	1,03
Brizanta sol	3,09	1,03
Brizanta sol	3,04	1,03
Brizanta sol	5,15	1,03
Ratana	4,63	1,12
Ratana	4,91	1,12
Ratana	3,41	1,12
Ratana	4,45	1,12
Ratana	4,20	1,12

4-) Porcentajes de materia orgánica y densidad aparente (10 cm de profundidad) en sistemas de producción con café.

PARCELA	Sistema	%MO	DA g/cm <sup>3</sup>
P1	Sol	11,36	0,73
P2	Sol	11,59	0,73
P3	Sol	15,38	0,73
P4	Sol	16,13	0,73
P5	Sol	10,97	0,73
P6	Sol	13,08	0,73
P7	Sol	14,08	0,73
P8	Sol	6,29	0,73
P9	Sol	10,90	0,73
P1	SAFE4	11,9	0,87
P2	SAFE4	9,48	0,87
P3	SAFE4	9,74	0,87
P4	SAFE4	9,96	0,87
P5	SAFE4	6,48	0,87
P6	SAFE4	9,77	0,87
P7	SAFE4	7,56	0,87
P8	SAFE4	9,51	0,87
P9	SAFE4	8,60	0,87
P1	SAFE6	6,75	0,87
P2	SAFE6	7,34	0,87
P3	SAFE6	5,64	0,87
P4	SAFE6	8,50	0,87
P5	SAFE6	11,84	0,87
P6	SAFE6	14,48	0,87
P7	SAFE6	14,85	0,87
P8	SAFE6	13,12	0,87
P9	SAFE6	13,53	0,87
P1	SAFE8	7,47	0,87
P2	SAFE8	6,47	0,87
P3	SAFE8	5,95	0,87
P4	SAFE8	6,50	0,87
P5	SAFE8	7,46	0,87
P6	SAFE8	6,97	0,87
P7	SAFE8	6,45	0,87
P8	SAFE8	8,56	0,87
P9	SAFE8	8,98	0,87
P1	SAFP	11,69	0,87
P2	SAFP	13,44	0,87
P3	SAFP	12,45	0,87
P4	SAFP	13,07	0,87
P5	SAFP	10,61	0,87
P6	SAFP	12,79	0,87
P7	SAFP	12,64	0,87
P8	SAFP	12,15	0,87
P9	SAFP	11,19	0,87

SAFE4: sistema agroforestal eucalipto de 4 años-café; SAFE6: sistema agroforestal café-eucalipto de 6 años; SAFE8: sistema agroforestal café-eucalipto de 8 años; SAFEP: sistema agroforestal café-poró, Sol: café a pleno sol.