

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Carbon sequestration and water use in silvopastoral systems with native timber tree species in the dry tropic of Costa Rica

Secuestro de carbono y uso de agua en sistemas silvopastoriles con especies maderables nativas en el trópico seco de Costa Rica

Jairo Rojas M.¹, Muhammad Ibrahim², Hernán J. Andrade³

ABSTRACT

The carbon sequestration and water use of silvopastoral systems with native timber tree species in the dry tropics were estimated. It was used an experimental design of randomly complete blocks with split plots, where grasses (*Brachiaria brizantha* and *Hyparrhenia rufa*) were the main plots and timber species (*Dalbergia retusa*, *Dyphisa robinoides* y *Pithecellobium saman*) were the subplots. The total C in aboveground biomass (grasses and trees), belowground C (fine roots and soil) and tree transpiration, using sapflow approach in 18 individuals (three repetitions per tree species per grass) were evaluated. The highest C storage in aboveground biomass was found in *D. robinoides* with 4.4 t C/ha; in C in grass was found in *B. brizantha* with *P. saman* (5.8 t C/ha). The highest C accumulation in fine roots ($d < 2$ mm) was found in the 20 cm of top soil. Tree growing with con *B. brizantha* presented the highest C in roots (1.1 t C/ha); whereas the highest C in grass fine roots was located in *B. brizantha* with *D. robinoides* (1.5 t C/ha). Around 55% of soil C was in first 20 cm of soil. The highest and lowest tree transpiration was presented in *D. robinoides* and *P. saman*, respectively (1.5 vs 0.3 mm/day). The evaluated silvopastoral systems are promissory due their high C sequestration and the use of timber tree species with high water use efficiency.

Keywords: Transpiration, biota, sapflow, aboveground biomass, underground biomass.

RESUMEN

Se estimó el secuestro de carbono y uso de agua en seis sistemas silvopastoriles basados en la combinación de *Brachiaria brizantha* e *Hyparrhenia rufa* con especies maderables nativas en el trópico seco. Se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar con parcelas divididas, donde las pasturas (*B. brizantha* e *H. rufa*) fueron las parcelas principales y los maderables (*Dalbergia retusa*, *Dyphisa robinoides* y *Pithecellobium saman*) las subparcelas. Se evaluó el carbono total en la biomasa aérea (árbol y pastura) y debajo del suelo (suelo y raíces), y la transpiración arbórea mediante el método de "flujo de savia" usando 18 individuos (3 repeticiones por especie arbórea por pastura). El mayor almacenamiento de carbono en la biomasa aérea la realizó *D. robinoides* (4,4 t C/ha), y en la pastura, *B. brizantha* con *P. saman* (5,8 t C/ha). La mayor acumulación de C en raíces finas ($d < 2$ mm) se encontró en los primeros 20 cm del suelo. La mayor cantidad de carbono en raíces se encontró en árboles que crecieron con *B. brizantha* (1,1 t C/ha) y en pasturas que crecen con la asociación *B. brizantha* y *D. robinoides* (1,5 t C/ha). El 55% de C en el suelo se encontró en los primeros 20 cm. La mayor transpiración se encontró en *D. robinoides* (1,5 mm/día) y la menor, en *P. saman* (0,3 mm/día). Los sistemas silvopastoriles evaluados resultaron promisorios gracias a su alto secuestro de carbono y su uso de especies maderables con alta eficiencia de uso de agua.

Palabras clave: transpiración, biota, flujo de savia, biomasa aérea, biomasa debajo del suelo.

INTRODUCCIÓN

EL INCREMENTO DE LA TEMPERATURA en la atmósfera por el incremento del CO₂ ha provocado el llamado efecto invernadero y se debe principalmente a la utilización indiscriminada de combustibles fósiles y a los cambios de uso del suelo. Según cifras reportadas por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change -IPCC-), se estima que la emisión de C por deforestación es de 1,6 billones de toneladas por año (1 t C = 3,67 t CO₂) (Houghton, 1991); gran parte de la cual ocurre en el trópico (12 a 15 millones de hectáreas anuales deforestadas). La información sobre la cobertura del suelo y su uso es esencial, ya que la canti-

Radicado: 15 de abril de 2009
Aprobado: 23 de agosto de 2009

¹ IA. M.Sc. Investigador máster asistente. Red de Cultivos Permanentes. E.E La Suiza, Corpoica, Bucaramanga, Colombia. jrojas@corpoica.org.co

² Ph.D. Profesor-Investigador. Líder Grupo GAMMA. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza-CATIE, Turrialba, Costa Rica. mibrahim@catie.ac.cr

³ IA. Ph.D. Profesor-Investigador. Grupo de Investigación Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales. Universidad del Tolima, Ibagué. hjandrade@ut.edu.co

dad de carbono almacenado en un sitio dado depende del clima (precipitación y temperatura) y las condiciones del suelo, pero también de las actividades desarrolladas por el hombre (Albretch y Kandji, 2003).

En el trópico seco se ha mejorado la productividad de la ganadería a través de la utilización de pasturas mejoradas como la *Brachiaria brizantha*, la cual es más tolerante a largos períodos secos y soporta mayor carga animal que las pasturas naturalizadas (*Hyparrhenia rufa*); además, permite mayor productividad animal (Fisher *et al.*, 1994). Existe poca información sobre la compatibilidad de las pasturas mejoradas y las naturalizadas en asocio con especies maderables nativas en sistemas silvopastoriles; sin embargo, esta información es clave para el diseño y manejo de sistemas silvopastoriles como práctica gana-gana para la producción sostenible de carne, leche y madera y para la generación de servicios ambientales como el secuestro de carbono (Gobbi e Ibrahim, 2004; Andrade *et al.*, 2008).

Una de las principales limitantes para diseñar sistemas silvopastoriles en el trópico seco es la escasez del recurso agua durante los seis meses de época seca. Por esta razón, la investigación tuvo como objetivo evaluar la capacidad de las especies nativas del trópico seco para secuestrar carbono y medir la eficiencia de uso de agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este estudio se llevó a cabo en la hacienda La Pacífica (85° 9' 4,5" O y 10° 28' 36,8" N; 50 msnm) localizada a 5 km al norte de Cañas, Guanacaste, Costa Rica. La precipitación promedio de la zona es de 1500 mm al año, de las cuales 85% cae de mayo a noviembre. La temperatura media es de 28 °C y la humedad relativa varía de 60% a 65% en la temporada seca y de 80% a 85% en la temporada húmeda (Herrick, 1993).

El suelo es clasificado como un Litic Ustorthent del complejo Lithic Dystropept (Herrick, 1993). Las características químicas del suelo donde se estableció el ensayo se encuentran en la tabla 1. El ensayo experimental tenía una pendiente promedio de 4%.

Tabla 1. Características químicas iniciales del ensayo experimental

Profundidad (m)	M.O (%)	pH	Ca g/kg	Mg	K	P mg/kg
0-0,2	3,5	6,7	2,60	0,53	0,25	1,02
0,2-0,4	1,9	7,0	2,62	0,52	0,20	0,66
0,4-0,6	1,1	7,1	2,76	0,58	0,14	0,44

Establecimiento del experimento

Para la realización del experimento se removió de un potrero la pastura original de *Hyparrhenia rufa* (Nees.) Staff., que había sido pastoreada durante veinte años aproximadamente. En su lugar se sembraron, en septiembre del 2001, las pasturas *Brachiaria brizantha* (Hochst. Ex A. Rich) e *H. rufa* como las parcelas principales, y las especies maderables nativas cocobolo (*Dalbergia retusa* Hemsl.), guachipelín (*Diphysa robinoides* Benth.) y cenízaro (*Pithecellobium saman* (Jacq.) Benth) y un control sin árboles, como subparcelas. El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar con tres repeticiones y arreglo en parcelas divididas. Las pasturas en la parcela principal se sembraron de la siguiente manera: *B. brizantha* previa arada y rastrillada del lote, con 4 kg/ha de semilla; y *H. rufa*, mediante propagación vegetativa. Se aplicó en las parcelas un fertilizante compuesto (12:30:20 N:P:K) con una dosis de 180 kg/ha. Los árboles se plantaron en líneas dobles (2 x 2 m) dentro de las pasturas, dejando una distancia entre líneas dobles de 8 m y se fertilizaron con 100 g/planta con el mismo fertilizante utilizado para las pasturas.

A los dos años de sembradas, las pasturas fueron cosechadas y colectadas con tractor para evitar el daño de los árboles jóvenes. El pastoreo del experimento se inició en septiembre del 2004 cuando los árboles estuvieron completamente establecidos (Andrade *et al.*, 2008). En los tres primeros pastoreos, se utilizaron terneros de 80 kg de peso vivo para minimizar el daño en los árboles, y después, animales maduros. Se utilizó un sistema de pastoreo flexible, de 4 a 5 días de ocupación y 30 a 50 días de descanso en las temporadas secas y lluviosas respectivamente.

Carbono por componentes

La biomasa aérea de los árboles se estimó midiendo el diámetro de los dos troncos principales a 30 cm de altura y la altura total de los árboles; y se emplearon modelos de cálculo de biomasa desarrollados para estas especies en el mismo sitio experimental (Andrade *et al.*, 2008):

$$Bt = 10^{(-1,54+2,05\log(dg)+1,18\log(h))}$$

Donde:

Bt = biomasa del árbol (kg)

dg = diámetro cuadrático medio a la altura del pecho (cm)

h = altura total (m)

$$dg = \sqrt{(D_1^2 + D_2^2)}$$

Donde:

D_1 y D_2 : diámetro de los dos principales troncos (cm)

El carbono en la biomasa aérea de la pastura se calculó utilizando marcos metálicos de 50 x 50 cm, muestreando aleatoriamente dos muestras por subparcela y tomando la biomasa comprendida desde el suelo hasta una altura de 25 cm (biomasa residual o biomasa más o menos estable). El muestreo se realizó antes del pastoreo. Se tomó una submuestra para determinar el contenido de materia seca (48 h a una temperatura de 65 °C). Los valores de biomasa fueron convertidos a carbono multiplicándolo por la fracción de carbono promedio estimada para esas especies: 0,45 para *P. saman*, *D. retusa* y *D. robiniooides*; 0,44 para *B. brizantha* y 0,41 para *H. rufa* (Andrade *et al.*, 2008).

La biomasa de raíces finas ($d < 2$ mm) de las pasturas y del componente arbóreo del sistema se estimó utilizando el método de muestreo por barreno de motor (EFCO TR1540, de 50 mm de diámetro y 60 cm de profundidad), debido a la dureza del suelo. Las profundidades evaluadas fueron 0-20, 20-40, y 40-60 cm. Las muestras extraídas en el campo fueron conservadas en refrigeración a 5 °C hasta su procesamiento. Se utilizó un factor de conversión de 1,5 para contabilizar las pérdidas de materia seca en raíces de pasturas y de árboles debido al manejo del material (Oliveira *et al.*, 2000; Sierra *et al.*, 2003).

La concentración de carbono orgánico en el suelo en los sistemas silvopastoriles se estimó tomando muestras compuestas de las tres posiciones (bajo el dosel del árbol, a 2 m de la línea doble y a 4 m de la línea doble) en tres profundidades 0-20, 20-40 y 40-60 cm, utilizando un barreno helicoidal de hierro de 1 cm de diámetro. El carbono orgánico fue analizado por combustión utilizando el autoanalizador CHN. El almacenamiento de carbono orgánico en cada profundidad se estimó empleando la siguiente ecuación:

$$\text{COS} = \text{CO} (\%) \times \text{da} \times \text{Ps}$$

Donde:

COS: carbono orgánico de suelos (t C/ha)

CO (%): concentración de carbono orgánico en suelos (%)

da: densidad aparente del suelo (g/cm^3)

Ps: profundidad de muestro (cm)

Carbono total en los sistemas

El almacenamiento de carbono total de los sistemas se estimó sumando el carbono de cada componente: en biomasa aérea de árboles, en biomasa residual de la pastura, en biomasa de raíces y en carbono orgánico del suelo.

Uso de agua de las especies maderables nativas

Monitoreo del flujo de savia del árbol

Se seleccionaron tres árboles por cada especie nativa (*D. retusa*, *D. robiniooides* y *P. saman*) en cada una de las

pasturas evaluadas (*B. brizantha* e *H. rufa*), de tres años y medio, cuyos diámetros a la altura del sensor (a 1 m del nivel del suelo) variaron de 2,1 a 12,6 cm. Los sensores se instalaron durante cinco días completos y consecutivos en dos períodos: transición época seca a lluviosa y época lluviosa. Los árboles que se midieron se encontraban a una distancia máxima de 30 m del punto central, donde se encontraba el módulo de adquisición de datos y la fuente de poder. Los sensores fueron colocados en el tronco principal del árbol y se les cubrió con un aislante térmico, una botella plástica y, finalmente, una cobertura plástica para protegerlos de la radiación, la lluvia y los insectos, respectivamente (figura 1).



Figura 1. Instalación de equipo de medición de flujo de savia en árboles de *Diphysa robiniooides* en Cañas, Costa Rica

El monitoreo del flujo de savia se realizó por el método de disipación de calor (Granier 1987; Lu *et al.*, 2004) con sensores radiales de 20 mm de longitud. Los sensores (calentado y de referencia) se conectaron a un módulo de registro de datos (datalogger) a través de un selector de datos (multiplexer), los cuales se encontraban en una caja metálica (CR10X, AM 16/32 Multiplexer y ENC 10/12, Campbell Scientific, Shepshed, RU).

La velocidad del flujo de savia μ fue estimada utilizando la ecuación generada por Andrade (2007) para las mismas especies de árboles en el mismo sitio experimental:

$$\mu = 3,99 \times 10^{-7} + 8,63 \times 10^{-5} \left[\frac{\Delta T_0 - \Delta T_i}{\Delta T_i} \right]$$

Donde:

μ : velocidad de flujo de savia (m/s)

ΔT_0 y ΔT_i : diferencias de temperatura máxima (sin flujo) y real entre las dos agujas, respectivamente.

La cantidad de agua que usa cada árbol se calculó multiplicando la μ_s por el área conductiva (AC en cm^2), la cual fue estimada tiñendo trozos de cortes transversales del tronco principal. El uso de agua en la parcela se estimó multiplicando la VFS de cada árbol por el área basal de la subparcela usando la siguiente ecuación:

$$UA = VFS * AB * (1\text{m}/100\text{cm}) * 1000(\text{l}/\text{m}^3) * (1\text{ha}/10000\text{m}^2) * 24(\text{h}/\text{día})$$

Donde:

UA: uso de agua en la parcela (transpiración en mm/día)

VFS_s : velocidad de flujo de savia (cm/h)

AB: área basal de cada subparcela (m^2/ha)

Eficiencia de uso del agua

La eficiencia de uso de agua se estimó como la relación entre el almacenamiento de carbono y el consumo de agua en un período de tiempo. Droppelmann y colaboradores (2000) definieron la eficiencia de uso de agua como:

$$EUA = \frac{B}{UA}$$

Donde:

EUA = eficiencia de uso del agua (g MS/L H_2O)

B = biomasa (g MS/ $\text{m}^2/\text{día}$)

UA = uso de agua (kg $\text{H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{día}$)

RESULTADOS

Acumulación de carbono en la biomasa aérea en las especies arbóreas

A la edad de 3,5 años, *D. robiniooides* presentó el mayor almacenamiento de carbono en cualquiera de las dos pas-

turas en comparación con las otras especies arbóreas debido a su mayor tasa de crecimiento (figura 2). Sin embargo, *B. brizantha* redujo el crecimiento de *P. saman*, mientras que *D. retusa* creció mejor bajo la pastura de *B. brizantha*.

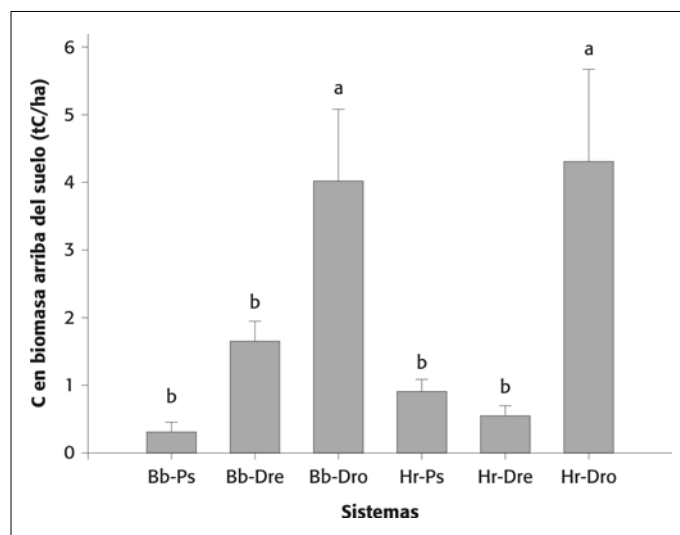


Figura 2. Carbono en biomasa arbórea arriba del suelo: especies maderables nativas *Diphysa robiniooides* (Dro), *Dalbergia retusa* (Dre) y *Pithecellobium saman* (Ps) en dos pasturas *Brachiaria brizantha* (Bb) y *Hyparrhenia rufa* (Hr) en Cañas, Costa Rica. Tratamientos marcados con la misma letra no presentan diferencias significativas (prueba de Duncan, $P < 0,05$)

Acumulación de carbono en la pastura

No se encontraron diferencias significativas ($P > 0,05$) en la acumulación de carbono entre pasturas, aunque *B. brizantha* almacenó siempre más carbono que *H. rufa*. El almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de la pastura, medido como biomasa residual (pasto que queda después del consumo del animal), fue mayor en *B. brizantha* asociada con *P. saman* (5,8 t C/ha), y el menor en *D. robiniooides* con *H. rufa* (2,3 t C/ha); no hubo diferencias estadísticas para las dos pasturas en asocio con arbóreas (figura 3).

Carbono en raíces finas

No se encontraron diferencias significativas ($P > 0,05$) entre tratamientos en el almacenamiento de carbono en raíces finas totales en los primeros 60 cm de suelo. Los mayores almacenamientos de carbono en raíces finas se encontraron en los tratamientos *B. brizantha* en monocultivo (2,3 t C/ha) y *B. brizantha* asociado con *D. robiniooides* (1,7 t C/ha). En los primeros 20 cm de suelo se encontraron diferencias significativas ($P < 0,05$) en el almacenamiento de carbono en raíces finas, siendo los mejores tratamientos *P. saman* y *D. robiniooides* creciendo en *B. brizantha* (1,1 y 0,8 t C/ha, respectivamente) y el peor tratamiento fue *D. retusa* en asocio con *H. rufa* (0,2 t C/ha) (figura 4).

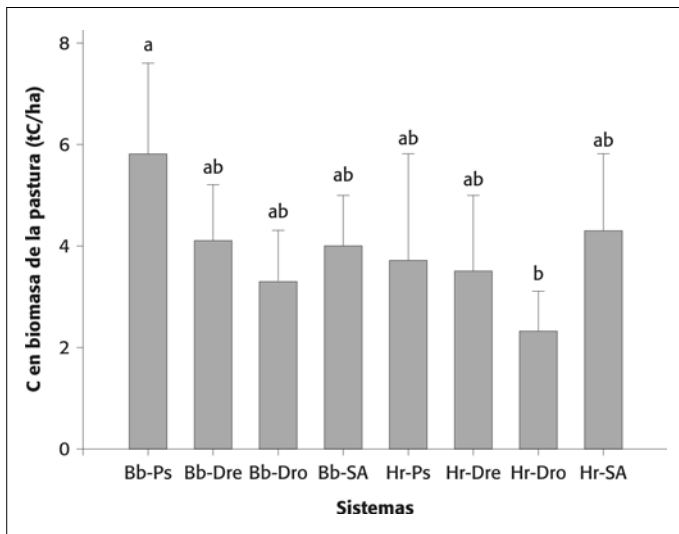


Figura 3. Carbono en la biomasa aérea de las pasturas *Hyparrhenia rufa* (Hr) y *Brachiaria brizantha* (Bb) asociada o no (Sin) a tres especies maderables nativas *Dalbergia retusa* (Dre), *Diphysa robiniooides* (Dro) y *Pithecellobium saman* (Ps). Tratamientos marcados con la misma letra no presentan diferencias significativas (prueba de Duncan, $P < 0,05$)

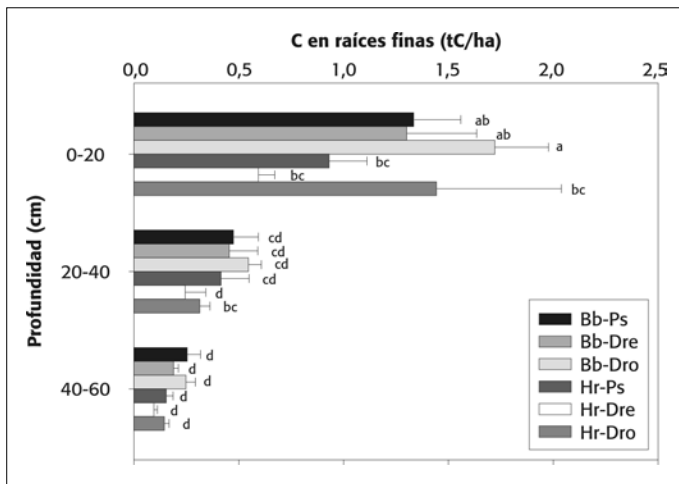


Figura 4. Carbono en biomasa de raíces finas por profundidad en sistemas silvopastoriles con especies maderables nativas: *Diphysa robiniooides* (Dro), *Dalbergia retusa* (Dre) y *Pithecellobium saman* (Ps) en dos pasturas *Brachiaria brizantha* (Bb) y *Hyparrhenia rufa* (Hr), Cañas, Costa Rica

Carbono en el suelo

No se encontraron diferencias significativas ($P > 0,05$) en el carbono orgánico total en el suelo para los diferentes sistemas silvopastoriles. El mayor almacenamiento de carbono orgánico de suelo en los 60 cm fue encontrado en *P. saman* y *D. robiniooides* asociados con *B. brizantha* (121,7 y 121,2 t C/ha, respectivamente) y el menor fue en la pastura de *B. brizantha* en monocultivo (87,7 t C/ha).

La profundidad influyó significativamente ($P < 0,05$) sobre el contenido de carbono orgánico en el suelo,

encontrándose mayor en los primeros 20 cm en todos los sistemas evaluados. En promedio, los primeros 20 cm representan 55% del carbono total en el suelo, mientras que se encontró 25% y 20% para las profundidades de 20-40 y 40-60 cm, respectivamente (figura 5).

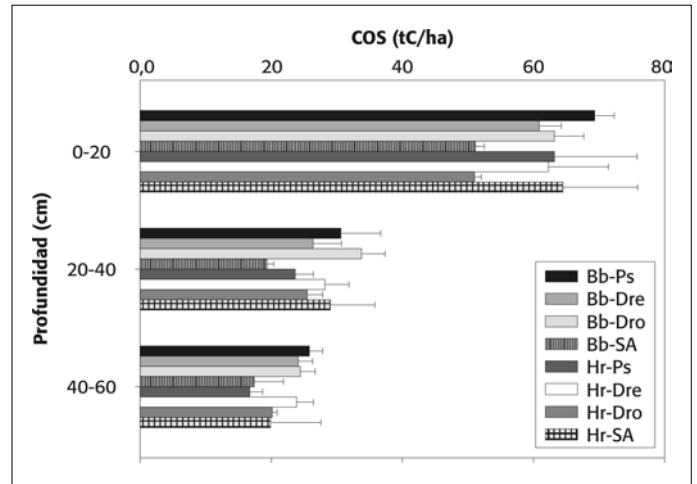


Figura 5. Carbono en el suelo por profundidad (0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm) en sistemas silvopastoriles de Cañas, Costa Rica, *Brachiaria brizantha* (Bb), *Hyparrhenia rufa* (Hr) y maderables nativas *Dalbergia retusa* (Dre), *Diphysa robiniooides* (Dro) y *Pithecellobium saman* (Ps)

Carbono total en los sistemas

No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos ($P > 0,05$) para el almacenamiento total de carbono; sin embargo, los mayores valores se registraron en los sistemas silvopastoriles con *B. brizantha* (tabla 2).

Fijación de carbono

Las tasas de fijación encontradas fueron de 0,2; 0,3 y 1,1 t C/ha/año para *P. saman*, *D. retusa* y *D. robiniooides*, respectivamente.

Transpiración de las especies arbóreas

No se encontraron diferencias significativas ($P > 0,05$) en la velocidad de flujo de savia (μ_s) de los árboles para las dos épocas: transición y lluviosa (figura 6). Sin embargo, se observó que *P. saman* tuvo la mayor μ_s para la época de transición. La μ_s no fue afectada por la pastura, lo cual implica que la pastura asociada no afecta el uso de agua de las maderables nativas.

Uso de agua

Se encontraron diferencias significativas en el uso de agua ($P < 0,05$) entre especies arbóreas, siendo *D. robiniooides* la de mayor consumo (0,24 mm/día) en ambas pasturas y las

Tabla 2. Carbono total almacenado en los sistemas silvopastoriles en Cañas, Costa Rica, 2005

Sistema	Carbono debajo del suelo (t C/ha)		Carbono aéreo (t C/ha)		Carbono total (t C/ha)
	Suelo	Raíces	Biomasa árbol	Biomasa pastura	
<i>Brachiaria brizantha</i> + <i>Diphysa robiniooides</i>	121,2 ± 9,6	1,7 ± 0,5	4,0 ± 1,8	3,3 ± 1,0	130,2 ± 9,0 a
<i>B. brizantha</i> + <i>Dalbergia retusa</i>	111,4 ± 11,5	1,3 ± 0,2	1,6 ± 0,5	4,1 ± 1,1	118,5 ± 10,8 a
<i>B. brizantha</i> + <i>Pithecellobium saman</i>	125,6 ± 17,0	1,4 ± 0,2	0,3 ± 0,2	5,8 ± 1,8	133,2 ± 17,3 a
<i>B. brizantha</i> sin árboles	87,7 ± 11,3	2,25 ± 0,8	0,0	4,0 ± 1,0	93,9 ± 11,4 a
<i>Hyparrhenia rufa</i> + <i>D. robiniooides</i>	96,5 ± 5,32	1,26 ± 1,15	4,4 ± 2,3	2,3 ± 0,8	104,4 ± 2,6 a
<i>H. rufa</i> + <i>D. retusa</i>	114,1 ± 26,87	0,62 ± 0,2	0,6 ± 0,3	3,5 ± 1,5	118,7 ± 28,0 a
<i>H. rufa</i> + <i>P. saman</i>	103,4 ± 27,8	0,99 ± 0,12	0,9 ± 0,3	3,7 ± 2,1	109,0 ± 28,6 a
<i>H. rufa</i> sin árboles	113,2 ± 41	1,64 ± 0,08	0,0	4,3 ± 1,5	119,2 ± 42,4 a

1 Letras similares en la misma columna no son diferentes estadísticamente (prueba de Duncan, $P < 0,05$).

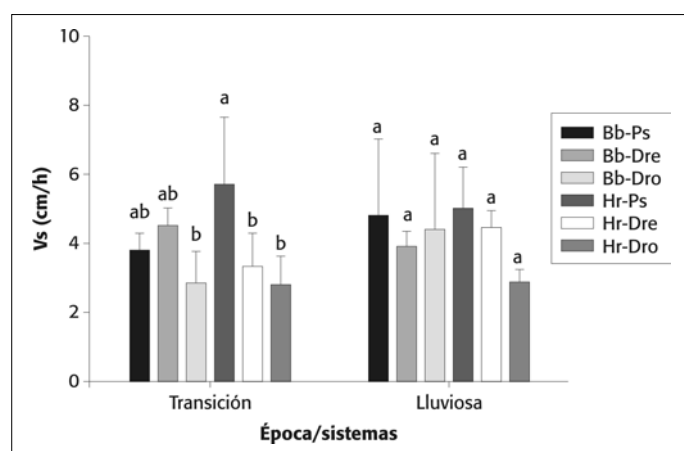


Figura 6. Velocidad de flujo de savia (Vs) para las especies maderables nativas *Diphysa robiniooides* (Dro), *Dalbergia retusa* (Dre) y *Pithecellobium saman* (Ps) en dos pasturas *Brachiaria brizantha* (Bb) y *Hyparrhenia rufa* (H), en el trópico seco de Costa Rica, en dos épocas: transición de lluviosa a seca y lluviosa

de menor consumo fueron *D. retusa* en *H. rufa* y *P. saman* en *B. brizantha* (ambas con 0,04 mm/día).

Eficiencia de uso del agua

No se encontraron diferencias significativas ($P > 0,05$) en la eficiencia de uso del agua entre los diferentes sistemas. Pero *D. robiniooides* en *H. rufa* y *B. brizantha* fueron los sistemas silvopastoriles de mayor eficiencia de uso de agua (1,8 y 1,6 g/L H_2O , respectivamente). La menor eficiencia se encontró en *P. saman* creciendo en *H. rufa* (0,7 g/L H_2O).

DISCUSIÓN

Acumulación de carbono en la biomasa aérea en las especies arbóreas

Las pasturas afectan en diferente forma el crecimiento de los árboles, por ello en los sistemas silvopastoriles se

requiere la selección de especies arbóreas compatibles para diseñar estos sistemas (Kaur *et al.*, 2002).

En el presente estudio se demostró que el crecimiento de las especies maderables nativas depende del hábito de crecimiento de la pastura. Por ejemplo, en Costa Rica, Camargo y colaboradores (2000) en estudios de sobrevivencia de árboles encontraron que *Cordia alliodora* presentó mayor tasa de regeneración natural en pasturas de *Cynodon nlemfuensis* en comparación con *Ischaemum ciliare*, *B. decumbens* e *Hyparrhenia rufa* en sistemas silvopastoriles. En Nicaragua, Ruiz (2002) encontró en especies de mayor tamaño y edad almacenamiento de carbono de árboles en pasturas naturales de 8,2 t C/ha y en pasturas mejoradas 12,5 t C/ha. Ramos (2003) en Esparza, Costa Rica, encontró en pasturas mejoradas con árboles un almacenamiento de carbono de 29,7 t C/ha, en bosque secundario de 96,8 t C/ha y para el sistema de pasturas degradadas fue de 0,6 t C/ha, reflejando la importancia de la calidad de la pastura en la acumulación de carbono, ya que en pasturas mejoradas se presenta mayor acumulación de carbono.

Acumulación de carbono en la pastura

Estos resultados confirman la superioridad de las pasturas mejoradas sobre las naturalizadas, como se vio en los trabajos realizados por Fisher y colaboradores (1994) y Fisher y Trujillo (1999) en las sabanas de los Llanos Orientales colombianos donde el secuestro de C fue mayor en los sistemas con pasturas mejoradas (*B. brizantha*, *Panicum maximum*, *Cynodon dactylon*) que en los pastos nativos *H. rufa*, *Paspalum notatum* y *P. virgatum*. Esto se debe a que se ha encontrado que *B. brizantha* es una especie que presenta tolerancia a la sombra y por tanto es menos afectada por ésta (De Andrade *et al.*, 2004). Por el contrario, *H. rufa* disminuye su producción y por tanto su acumulación de carbono a medida que aumenta la cobertura arbórea, es decir, el sombrío. Bustamante y

colaboradores (1998) encontraron que la producción de *B. brizantha* fue 41% más alta en sistemas silvopastoriles con *Erythrina poeppigiana*, la cual tiene podas cada seis meses, comparada con la producción de esta pastura en monocultivo. De Andrade y colaboradores (2004) encontraron que *B. brizantha* incrementa la producción de biomasa entre 10% en época lluviosa y 42% en época seca cuando crece bajo sombra artificial de 30%; mientras que con un sombrío de 50% su producción no se redujo drásticamente, lo cual muestra la tolerancia de esta especie al sombrío y su capacidad de asocio en sistemas silvopastoriles.

Carbono en raíces finas

Las raíces son una parte importante del balance de carbono, ya que grandes cantidades se transfieren al suelo por esta vía. Más de la mitad del carbono asimilado por la planta es transportado al suelo a medida que crece la raíz y a través de sus exudados, o de sustancias orgánicas, y por la deposición de hojarasca (Nair *et al.*, 2009b). Mucha de la biomasa de las raíces de las pasturas son raíces finas; mientras que las raíces gruesas ($d > 2$ mm) constituyen la mayor proporción en los árboles. Las raíces finas de árboles y cultivos tienen una tasa de intercambio rápida (de días a semanas); mientras que las raíces gruesas se descomponen más lentamente y de este modo contribuyen sustancialmente a las reservas de carbono bajo el suelo (Nair *et al.*, 2009a).

Van Kanten (2003) observó que las especies en ecosistemas con limitantes marcadas, en este caso disponibilidad de agua, concentran su sistema radicular en los primeros horizontes del suelo. Por esta razón, a pesar de que la acumulación de biomasa aérea fue diferente entre especies arbóreas, siendo mayor para *D. robinoides*, la biomasa de raíces presentó pocas diferencias. Esto se puede explicar por la necesidad de las especies de asignar más recursos en las raíces para explorar más suelo en búsqueda de agua. Guenni y colaboradores (2002) encontraron que se presentó una reducción de raíces finas en las capas superficiales en 27% para *B. brizantha*, 24% para *B. mutica* y 20% para *B. humidicola* debido a las condiciones de sequía. La respuesta a la escasez de agua es el incremento de la biomasa radicular, lo que sugiere que las especies de *Brachiaria* incrementan la intensidad de enraizado (Oliveira *et al.*, 2004).

Hipondoka y colaboradores (2003) encontraron que los árboles no exploran capas de suelo más profundas en búsqueda del recurso agua cuando crecen en asocio con árboles en sistemas áridos, lo cual muestra que se presenta una competencia entre las pasturas y los árboles asociados. Ramos (2003) encontró en sistemas silvopastoriles con *B.*

brizantha 1,8 t C/ha de raíces finas en los primeros 20 cm y 0,7 t C/ha a profundidades de 20-60 cm.

Carbono en el suelo

En la zona de Cartago, Costa Rica, Mora (2001) encontró que pasturas de *Pennisetum clandestinum* con árboles y sin árboles presentaron niveles similares de carbono almacenado, debido en este caso a la poca agresividad de la pastura. Ruiz (2002), en Nicaragua, encontró valores superiores al de este estudio ya que el carbono orgánico en pasturas naturales o mejoradas, con o sin árboles varió de 150 a 158 t C/ha.

Ávila (2000) reporta contenidos de carbono orgánico en el suelo en asociación de pasturas mejoradas de *B. brizantha* con *Acacia mangium* (tres años) y de *B. brizantha* con *Eucalyptus deglupta* (tres años) de 87 t C/ha en ambos sistemas; estos resultados son inferiores a los encontrados en la presente investigación de. En los monocultivos de pasturas de 66 t C/ha para *B. brizantha* y de 84 t C/ha para *Ischaemum indicum*, lo que muestra el incremento del contenido de carbono orgánico del suelo por efecto de la incorporación de los árboles en los sistemas. Fisher y Trujillo (1999) encontraron resultados similares de 64 t C/ha y 65 t C/ha para pasturas nativas y mejoradas, respectivamente, en los Llanos Orientales de Colombia.

Mora (2001) también encontró que el almacenamiento del carbono aumentaba a medida que se profundizaba en el perfil del suelo, resultado diferente a lo encontrado por López (1998), Ramos (2003) y el presente estudio, en los cuales el nivel de carbono en el suelo disminuye a medida que se profundiza en él.

En estudios realizados en la región amazónica se han encontrado contenidos de carbono orgánico en el suelo en pasturas similares a los encontrados en los bosques a profundidades entre 20 y 30 cm, lo cual muestra que pasturas bien manejadas y de enraizamiento profundo pueden mejorar el contenido de carbono en los suelos (Fujisaka *et al.*, 1998). Fisher y colaboradores (1994) reportaron secuestro de carbono de 3 a 14 t/ha/año en pasturas introducidas, de las que gran parte se encuentra por debajo de los 20 cm, que es probablemente la zona menos propensa a la oxidación y a que se pierda por cambios en el uso del suelo.

Carbono total en los sistemas

En este estudio, los valores de carbono total fueron más bajos que los reportados por Ruiz (2002), quien encontró que en las pasturas naturales en monocultivo el carbono total fue de 151 t/ha, en pasturas mejoradas en monocul-

tivo de, 159 t/ha, en pasturas naturales con árboles de 164 t/ha y en pasturas mejoradas con árboles de 170 t/ha. Resultados similares presenta Ramos (2003) en Esparza, Costa Rica, donde en la pastura mejorada con árboles fue de 173 t C/ha y fueron superiores al de las pasturas degradadas, 135 t C/ha.

Ávila (2000) reportó que el carbono total en los sistemas silvopastoriles fue mayor en comparación a pasturas de *B. brizantha* e *Ischaemum indicum* en monocultivo (95, 68 y 84 t C/ha, respectivamente). Villanueva e Ibrahim (2002) encontraron que el sistema con mayor almacenamiento de carbono fue *P. clandestinum* con *Alnus acuminata* (de 4 años) y el menor fue para el monocultivo de kikuyo con 185 t C/ha.

Fijación de carbono

Andrade (1999) encontró tasas de fijación de carbono de 1,8 t C/ha/año para *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* con una densidad de plantación de 370 árboles por hectárea.

La tasa de fijación encontrada por Ávila (2000) para el sistema silvopastoril *B. brizantha* y *E. deglupta* fue de 1,8 t C/ha/año y para el sistema de *B. brizantha* – *Acacia mangium* de 2,2 t C/ha/año con densidades de árboles de 377 árboles por hectárea y la edad de las plantaciones de tres años. Para las mismas edades, la tasa de fijación fue de 0,5; 1,4 y 1,5 t/ha/año. Los menores valores encontrados para esta especie se pueden deber a menor densidad de la madera, alta densidad de los árboles y la fuerte competencia de los árboles (Villanueva y Ibrahim 2002).

Transpiración de las especies arbóreas

Se ha observado que en árboles juveniles los valores de μ_s son altos al compararse con árboles adultos. Van Kanten y Vaast (2006) encontraron tendencias similares, ya que valores bajos de μ_s que no excedían 0,3 mm/s fueron registrados en árboles de *E. deglupta* de cuatro años de edad. Clearwater y colaboradores (1999) encontraron una μ_s de 0,6 mm/s en *E. deglupta* de 2 años de edad con diámetro del tronco a la altura del pecho (DAP) de 6,1 a 6,7 cm. Por ello, se calculó el flujo de savia por área foliar (Fs/AF) (figura 7) para disminuir el efecto que tiene el tamaño del árbol sobre el Fs. Se encontró que *P. saman* fue la especie arbórea que más agua consumió por área foliar en todas las épocas y en ambas pasturas. Esto muestra que *P. saman* requiere mayor volumen de agua por área foliar, lo cual la pone en desventaja en su competencia por agua con las pasturas asociadas y puede ser una de las razones que limitó su crecimiento.

Uso de agua

El consumo de agua por parte de las especies nativas de este estudio fue inferior a lo reportado por Kanten (2003)

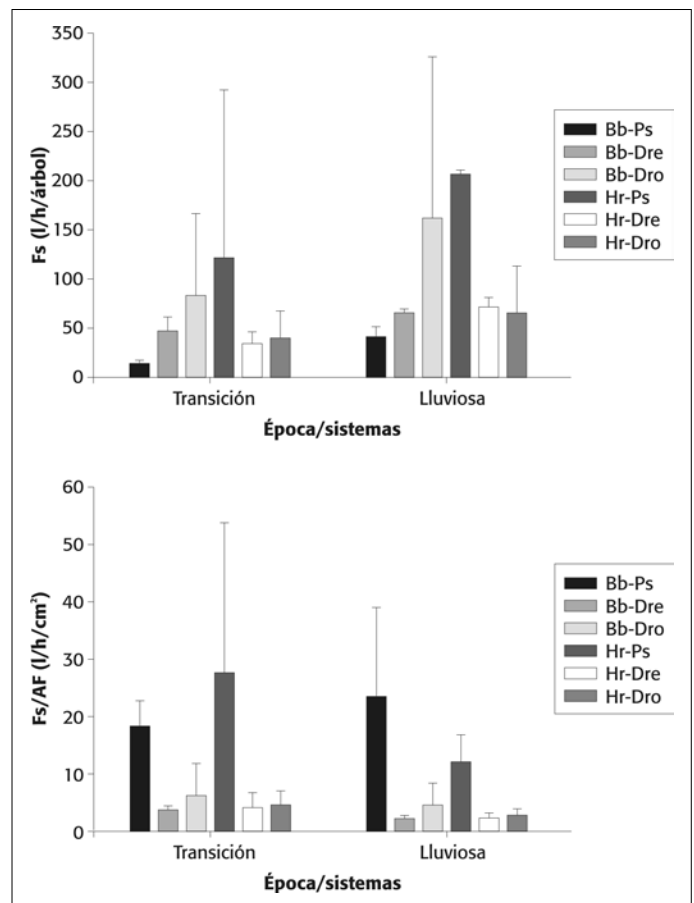


Figura 7. Flujo de savia (Fs) y flujo de savia por área foliar (Fs/AF) para las especies maderables nativas *Diphysa robinoides* (Dro), *Dalbergia retusa* (Dre) y *Pithecellobium saman* (Ps) en dos pasturas *Brachiaria brizantha* (Bb) y *Hyparrhenia rufa* (Hr), en el trópico seco de Costa Rica, en dos épocas: transición de lluviosa a seca y lluviosa

para *Terminalia ivorensis*, *E. deglupta* y *Erythrina poeppigiana* (2,1; 1,1 y 0,8 mm/día, respectivamente) en árboles de mayor edad y tamaños y en zonas donde los períodos de escasez son menores.

Eficiencia de uso del agua

La eficiencia de uso del agua de las diferentes especies nativas afectan sus capacidades de regeneración natural o de su establecimiento en sitios con déficit hídrico, como es el caso del trópico seco y subhúmedo (D'alessandro *et al.*, 2006). En el presente estudio se encontró que especies como *D. robinoides* con eficiencia más alta tienden a prevalecer en zonas secas al producir mayor biomasa aérea; y tener bajas tasas de mortalidad; lo cual concuerda con lo encontrado por Whitehead y Beadle (2004). Por otro lado, estos autores han encontrado en el *Eucalyptus* una eficiencia de uso de agua de 5 g/mm de agua o en *Eucalyptus grandis* de 1,9 g/mm para plantación de 50 años y de 0,8 g/mm para plantaciones de 230 años.

CONCLUSIONES

La concentración de raíces finas en los primeros 20 cm del perfil del suelo en *P. saman* y *D. robinoides* en asocio con *B. brizantha* (1,1 y 0,8 t C/ha, respectivamente), muestra que estas especies arbóreas están compitiendo por el recurso agua con una pastura altamente competitiva como *B. brizantha*. La mayor cantidad de raíces finas encontradas en los sistemas silvopastoriles con *B. brizantha* nos indica la estimulación en la producción de raíces en ambientes altamente competitivos, lo cual puede redundar en un mayor ciclaje de nutrientes por su muerte y descomposición.

La producción de biomasa aérea de las pasturas fue mayor en *B. brizantha* que en *H. rufa*. Por esta razón los productores convierten sus pasturas naturalizadas de *H. rufa* a pasturas mejoradas de *B. brizantha*, lo cual se refleja en la posibilidad de sostener mayor carga animal y, por ende, productividad del sistema ganadero.

El contenido de carbono orgánico en los sistemas silvopastoriles evaluados se encuentra concentrado en los primeros 20 cm de suelo en todos los sistemas evaluados,

representando en promedio 55% del carbono total en este compartimiento. No obstante, la ausencia de diferencias entre sistemas silvopastoriles y pastura en monocultivo y el nulo efecto de la incorporación de los árboles sobre el carbono orgánico del suelo puede deberse a la juventud de los sistemas silvopastoriles estudiados.

Si bien *D. robinoides* tiene mayor almacenamiento de carbono en la biomasa aérea que las otras dos especies maderables nativas, la acumulación de carbono por unidad de agua consumida es similar (valores absolutos mayores), lo cual demuestra la adaptación de las especies nativas a las limitaciones en la disponibilidad por el recurso hídrico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Academia de Finlandia (beca número 20566) que ayudó con el financiamiento de esta investigación, bajo el proyecto Cambio de uso de la tierra y flujos de carbono en América Central; al Grupo GAMMA (Ganadería y Medio Ambiente) del CATIE por su colaboración y apoyo en la finalización de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albretch A, Kandji S. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99: 15-27.
- Andrade HJ. 1999. Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo (tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 99 p.
- Andrade HJ. 2007. Growth and inter-specific interactions in young silvopastoral systems with native timber trees in the dry tropics of Costa Rica (tesis de doctorado) convenio University of Wales - CATIE, Turrialba, Costa Rica, 224 p.
- Andrade HJ, Brook R, Ibrahim M. 2008. Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. *Plant and Soil* 308 (1-2): 11-22.
- Ávila G. 2000. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol (tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 99 p.
- Bustamante J, Ibrahim M, Beer J. 1998. Evaluación agronómica de ocho gramíneas mejoradas en un sistema silvopastoril con poró (*Erythrina poeppigina*) en el trópico húmedo de Turrialba. *Agroforestería en las Américas* 5 (19): 11-16.
- Camargo JC, Ibrahim M, Somarriba E, Finegan B, Current D. 2000. Factores ecológicos y socioeconómicos que influyen en la regeneración natural de laurel en sistemas silvopastoriles del trópico húmedo y subhúmedo de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 7 (26): 46-49.
- Clearwater MJ, Meinzer FC, Andrade JL, Goldstein G, Holbrook NM. 1999. Potential errors in measurement of non-uniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiology* 19: 681-687.
- De Andrade CMS, Valentin JF, Carneiro J, Vaz FA. 2004. Growth of tropical forage grasses and legumes under shade. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 39: 263-270.
- D'Alessandro CM, Saracino A, Borguetti M. 2006. Thinning affects water use efficiency of hardwood saplings naturally recruited in a *Pinus radiata* D. Don plantation. *Forest Ecology and Management* 222:116-122.
- Droppelmann KJ, Lehmann J, Epharth JE, Berliner PR. 2000. Water use efficiency and uptake patterns in a runoff agroforestry system in an arid environment. *Agroforestry Systems* 49:223-243.
- Fischer MJ, Rao IM, Ayarza MA, Lascano CE, Saenz JL, Thomas JR, Vara RR. 1994. Carbon storage by introduced deep rooted grasses in the South American Savannas. *Nature* 371: 236-238.
- Fischer MJ, Trujillo W. 1999. Fijación de carbono en pastos tropicales en sabanas de suelos ácidos neotropicales. En: Seminario Internacional Intensificación de la Ganadería Centroamericana: Beneficios Económicos y Ambientales. Turrialba, CR, FAO-CATIE. p 115-135.
- Fujisaka S, Castilla C, Escobar G, Rodriguez V, Veneklaas EJ, Thomas R, Fisher M. 1998. The effects of forest conversion on annual crops and pastures: Estimates of carbon emissions and plant species loss in a Brazilian Amazon colony. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 69: 17-26.
- Guenni O, Marin D, Baruch Z. 2002. Responses to drought of five *Brachiaria* species. Biomass production, leaf growth, root distribution, water use and forage quality. *Plant and Soil* 243: 229-241.
- Gobbi J, Ibrahim M. 2004. Creating win-win situations: the strategy of paying for environmental services to promote adoption of silvopastoral systems. En: Mannelje L't, Ramírez L, Ibrahim M, Sandoval C, Ojeda N, Ku J. (eds.) International Symposium on Silvopastoral Systems: The Importance of Silvopastoral Systems in Rural Livelihoods to Provide Ecosystem Services. Yucatán, México, Universidad Autónoma de Yucatán. pp. 98-101.
- Granier A. 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-Fir stand by means of sapflow measurements. *Tree Physiology* 3: 309-320.
- Herrick JE. 1993. Restoration on tropical pastures and the role of cattle dung patches. Ph. D. Thesis. Ohio State University. 204 p.
- Hipondoka MHT, Aranibarw JN, Chiraraz C, Lihavhaz M, Mackow SA. 2003. Vertical distribution of grass and tree roots in arid ecosystems of Southern Africa: niche differentiation or competition? *Journal of Arid Environments* 54: 319-325.
- Houghton RA. 1991. Tropical deforestation and atmospheric carbon dioxide. *Climate Change* 19: 99-118.
- Kaur B, Gupta SR, Singh G. 2002. Carbon storage and nitrogen cycling in silvopastoral systems on a sodic soil in northwestern India. *Agroforestry Systems* 54: 21-29.
- López A. 1998. Aporte de los sistemas silvopastoriles al secuestro de carbono en el suelo (tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 50 p.
- Lu P, Urban L, Zhao P. 2004. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. *Acta Botanica Sinica* 46(6): 631-646.
- Mora V. 2001. Fijación, emisión y balance de gases de efecto invernadero en pasturas en monocultivo y en sistemas silvopastoriles de fincas lecheras intensivas de las zonas altas de Costa Rica (tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 92 p.
- Nair PKR, Kumar BM, Nair VD. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition of Soil Science* 172: 10-23.
- Nair PKR, Nair VD, Kumar BM, Haile S. 2009. Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. *Environment Science & Policy*, doi: 10.1016/j.envsci.2009.01.010.
- Oliveira MR, Van Noordwijk M, Gaze SR, Brouwer G, Bona S, Mosca G, Hairiah K. 2000. Auger sampling, Ingrowth cores and pinboard methods. En: Smith AL, Bengough AG, Engels C, Van Noordwijk M, Pellerin S, Van de Geijn SC (eds.) *Root methods: a handbook*. Berlin, Springer-Verlag, p. 175-210.
- Ramos R. 2003. Fraccionamiento del carbono orgánico del suelo en tres tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Punta Arenas, Costa Rica (tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 81 p.
- Ruiz A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguas, (tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica, 106 p.
- Sierra C, Del Valle JI, Orrego SA. 2003. Ecuaciones de biomasa de raíces en bosques primarios intervenidos y secundarios. En: Orrego S, Del Valle JI, Moreno FH (eds.) *Medida de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia*. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, 313 p.
- Van Kanten R, Vaast P. 2006. Transpiration of arabica coffee and associated shade tree species in sub-optimal, low-altitude conditions of Costa Rica. *Agroforestry Systems* 67:187-202.
- Van Kanten R. 2003. Competitive interactions between *Coffea Arabica* L. and fast-growing timber shade trees (tesis de doctorado). Bangor, UK, University of Wales Bangor, 162 p.
- Villanueva C, Ibrahim M. 2002. Evaluación del impacto de los sistemas silvopastoriles sobre la recuperación de pasturas degradadas y su contribución en el secuestro de carbono en lecherías de altura en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 9(35-36): 69-74.
- Whitehead D, Beadle CH. 2004. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. *Forest Ecology and Management* 193: 113-140.