

**PROGRAMA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO**

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

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

Magister Scientiae en Agroforestería Tropical

Por

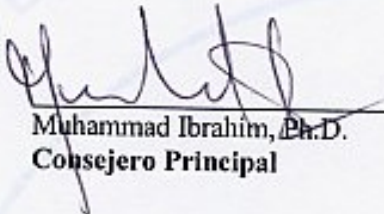
JAIRO ROJAS MOLINA

Turrialba, Costa Rica, 2005

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

MAGISTER SCIENTIAE

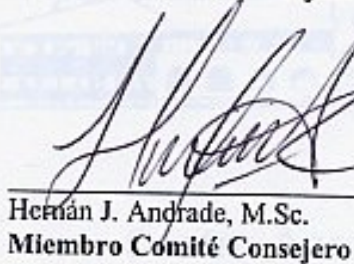
FIRMANTES:



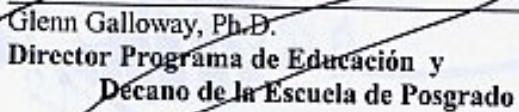
Muhammad Ibrahim, Ph.D.
Consejero Principal



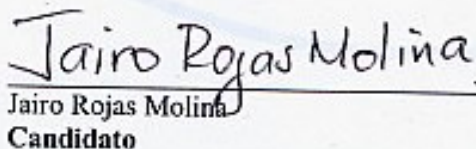
Francisco Jiménez, Dr.Sc.
Miembro Comité Consejero



Hernán J. Andrade, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Glenn Galloway, Ph.D.
Director Programa de Educación y
Decano de la Escuela de Posgrado



Jairo Rojas Molina
Candidato

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso por la protección y las bendiciones que me ha dado durante mi vida.

A mi madre, Jeaneth, por ser la gran mujer que es y que ha mostrado con sus actos el gran cariño y amor que me profesa. Madre los sentimientos son mutuos, gracias por todo.

A mi abuela Eva que es como mi segunda madre y ha sido un valuarte insustituible en mi vida, mi viejita linda espero que nos acompañes por muchos años más.

A mis tías Stella y Lourdes por su apoyo y valiosos consejos.

A mis primas Patricia y Natalia por el cariño y la comprensión.

Por último pero no menos importante a mi hermosa familia conformada por mi esposa Yaneth que ha sido un constante apoyo en los momentos difíciles y un refugio donde desahogar mis tristeza y alegrías; y a la luz de mis ojos mis hijos Juan Sebastián y Paula Valentina que han sabido enseñarme el verdadero sentido de la vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi profesor consejero Muhammad Ibrahim por su gran apoyo durante estos años en el CATIE, brindándome sus valiosos consejos y que ha sabido comprender todas las dificultades que he tenido que pasar para alcanzar este fin.

A mi comité consejero MSc Hernán J. Andrade y al Dr Francisco Jiménez por los consejos y la ayuda brindada en el desarrollo de esta tesis.

A la Academia de Finlandia (beca número 20566) que ayudo con el financiamiento de esta investigación, bajo el proyecto Cambio de uso de la Tierra y Flujos de Carbono en América Central y en especial a Outi Myat-Hirvonen por su ayuda y colaboración durante el desarrollo de la tesis.

A los amigos del CATIE que me han brindado su mano desinteresada y que han sido como una familia en Costa Rica: a Edgar Varón y su esposa Amparo e hija Jessica; a mi compadre Jorge Chagoya y a su esposa Bertha e hija Montserrat; a mis compañeras Sonia D. Ospina y Lilian Astrith y a mis amigos John Jairo Zuluaga y Victoria Eugenia Osorio y sus hijos (Natalia y Sebitas).

A todo el personal de la escuela de posgrado del CATIE por su apoyo

Gracias a todos los que sin pensarlo e ignorado en estos agradecimientos, pero que ellos de alguno u otra forma saber que han aportado un grano de arena para alcanzar este objetivo.

BIOGRAFÍA

El autor nació en Ibagué Tolima y se graduó como Ingeniero Agrónomo en la Universidad del Tolima en el año de 1995. Ha trabajado en la Corporación colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), regional Amazonía en la cual fue coordinador de proyectos de capacitación e investigación como “Capacitación a pequeños productores en caña panelera”, “Capacitación a pequeños productores en el cultivo del plátano”. Además, hizo publicaciones y cartillas relacionadas con el tema y ha realizado varias consultorías en municipios del Caquetá sobre sistemas agroforestales con cultivos de plátano y caña panelera. Al igual que ha sido catedrático en el área de cultivos en la universidad Corporación Unificada Nacional de Colombia (CUN). Ingreso al programa de Agroforestería Tropical con la ayuda de Dios y de mi familia.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	IV
BIOGRAFÍA	V
CONTENIDO	VI
RESUMEN.....	IX
SUMMARY	XI
ÍNDICE DE CUADROS	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 <i>Objetivos General</i>	3
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.2 HIPÓTESIS.....	3
2. MARCO CONCEPTUAL.....	4
2.1 CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL.....	4
2.2 SECUESTRO DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES	5
2.3 SISTEMAS SILVOPASTORILES.....	7
2.4 MODELOS DE BIOMASA	10
2.5 CARBONO EN SUELOS	12
2.5.1 CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO	13
2.5.2 <i>Fracciones de la materia orgánica</i>	13
2.5.3 <i>Fraccionamiento de la materia orgánica en el suelo</i>	14
2.6 TRANSPIRACIÓN	15
2.6.1 <i>Flujo de savia</i>	15
2.7. EFICIENCIA DE USO DEL AGUA.....	19
2.8 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ESPECIES EN ESTUDIO.....	20
2.8.1 <i>Brachiaria brizantha (A. Rich.) Staff</i>	20
2.8.2 <i>Hypparrhenia rufa (Nees) Staff</i>	20
2.8.3. <i>Pithecellobium saman (Jacq.) Benth.</i>	20
2.8.4 <i>Diphysa robinoides Benth.</i>	21

2.8. 5 <i>Dalbergia retusa</i> Hemsl.	22
3. METODOLOGÍA	23
3.1 UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO	23
3.1.1 Condiciones climáticas	23
3.1.2 Suelos	24
3.2. SUJETOS Y FUENTES DE INVESTIGACIÓN	24
3.2.1 Especies seleccionadas	24
3.2.1.1 Árboles	24
3.2.1.2 Pasturas	24
3.2.2 <i>Establecimiento del experimento</i>	25
3.2.3 <i>Diseño experimental</i>	26
Brachiaria brizantha	26
Baquiaría	26
Pithecellobium saman	26
Cenízaro	26
3.3 VARIABLES A MEDIR	27
3.3.1 Estimación de los modelos de biomasa	27
3.3.1.1. Gravedad específica	27
3.3.2 <i>Biomasa de raíces</i>	28
3.3.3 Carbono total en el Suelo	29
3.3.4 Biomasa de las pasturas	31
3.3.5 Carbono total en los sistemas	31
3. 3. 6 <i>Medición de la transpiración en especies nativas</i>	31
3.3.7 Métodos de análisis estadístico	34
4. RESULTADOS Y DISCUSION	35
4.1 CARBONO EN LA BIOMASA AÉREA	35
4.1.1 Gravedad específica	37
4.1.2 Fracción de carbono	38
4. 2 CARBONO EN LA PASTURA	40
4.3 CARBONO EN LAS RAÍCES	42
4.4 CARBONO EN EL SUELO	47
4.5 CARBONO TOTAL EN LOS SISTEMAS	52
4.6 FIJACIÓN DE CARBONO	54
4.7 NITRÓGENO TOTAL	54

4.8 TRANSPIRACIÓN	55
4.9 EFICIENCIA DE USO DE AGUA	58
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
5.1 CONCLUSIONES	60
5.2 RECOMENDACIONES	61
6. BIBLIOGRAFÍA	62

Rojas M, J. 2005. Secuestro de carbono y uso de agua en Sistemas Silvopastoriles con especies maderables nativas en el trópico seco de Costa Rica. Tesis, Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 71p

Palabras claves: Transpiración, Flujo de savia, Macro materia orgánica, Uso de Agua, Carbono arriba del suelo, Carbono en raíces.

RESUMEN

La conversión de bosques y el cambio de uso del suelo han sido de los principales factores en las pérdidas de reservorios de carbono y en el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Por esta razón, sistemas de producción como los silvopastoriles al poder secuestrar carbono en el suelo y en la vegetación, además de ser más eficientes en el uso de agua son altamente promisorios para su establecimiento en el trópico seco. El objetivo de este estudio fue cuantificar el papel de las especies maderables nativas y de pasturas en el secuestro de carbono y en el uso de agua en sistemas silvopastoriles en el trópico seco. El estudio se realizó en la hacienda la Pacífica en Cañas, Guanacaste. El experimento se inicio en septiembre del 2001. El diseño experimental utilizado fue parcelas divididas en bloques al azar, en la parcela principal se encontraba las pasturas *Brachiaria brizantha* e *Hyparrhenia rufa* y en las subparcelas se encontraban las especies maderables nativas Cocobolo (*Dalbergia retusa*), Guachipelín (*Dyphisa robinoides*) and Cenízaro (*Samanea saman*). Los árboles estaban plantados en surcos dobles de 2m X 2m y con una distancia entre surcos dobles de 8 m. Los parámetros evaluados fueron carbono total arriba del suelo (en el árbol y en las pasturas) y bajo el suelo (en el suelo y en las raíces). Para medir el uso del agua de los árboles se midió la transpiración en estos utilizando el método de sapflow, realizando mediciones en 18 árboles (3 por especie por pastura). La especie maderable nativa que presentó mayor almacenamiento de carbono en la biomasa arriba del suelo fue el guachipelín con 4,39 t C ha⁻¹; para el carbono en la pastura fue el *Brachiaria brizantha* al estar asociado con el cenízaro con 5,8 t C ha⁻¹. Con respecto a el carbono en las raíces la mayor acumulación se presentó en los primeros 20 cm del suelo, observando que en las raíces de los árboles el mayor almacenamiento fue en el cenízaro

asociado con *B. brizantha* con 1,13 t C ha⁻¹ y para las raíces de pasturas en *B. brizantha* asociado con guachipelín con 1,45 t C ha⁻¹. No hubo diferencias estadísticas en almacenamiento de carbono en el suelo ($p > 0,05$), pero el 55% de este se encontró almacenado en los primeros 20 cm. La especie de mayor consumo de agua fue el guachipelín con 1,5 mm día⁻¹ y la de menor consumo el cenízaro con 0,27 mm día⁻¹. En conclusión, aunque no existieron diferencias significativas ($P < 0,05$) para el almacenamiento de carbono total en los sistemas silvopastoriles evaluados, los resultados los muestran como promisorios para el secuestro de carbono y las especies maderables nativas utilizadas presentan valores de eficiencia de uso de agua que las hacen útiles para su utilización en sistemas silvopastoriles en el trópico seco.

Rojas M, J. 2005. Carbon sequestration and water use in silvopastoral systems with native timber trees in the dry tropics of Costa Rica. Mag. Sc. Thesis. Turrialba, CR, CATIE. 71p

Key Words: Transpiration, Sap Flow, Organic matter, water use, Above ground Carbon, Roots carbon.

SUMMARY

Forest conversion and land use change in the tropics are the major factors for losses in carbon stocks and increase concentration of greenhouse gases in the atmosphere. Therefore, alternative land management practices, like silvopastoral systems (SSP), are highly promising in the dry tropics because of their capacity of soil and vegetation carbon sequestration besides using more efficiently water resources. The objective of this study was to quantifying the role of native and pasture timber tree species in carbon sequestration and water use in the silvopastoral systems in the dry tropics. The study was carried out at Hacienda La Pacifica located in Cañas, Guanacaste at 50 masl, with an annual average precipitation of 1500 mm, 26 °C average temperatures and 70% annual average relative humidity. The experiment started in September 2001. The experimental design used was randomized blocks with three time replicated split-plot experiment with two grasses species in the mainplot and three native timber trees in the subplots. The two grasses found were *Brachiaria brizantha* and *Hyparrhenia rufa* and the three native timber trees were *Dalbergia retusa*, *Dyphisa robinoides* and *Samanea saman*. The trees in the SSP were planted in double rows with 2m x 2m; the distance between the double rows of trees was kept at 8 m. The parameters evaluated for carbon storage were aboveground total carbon (biomass in both pasture and trees) and belowground (soils and roots). In order to measure tree water use tree transpiration was measured by the sap flow method and water use efficiency where were selected 18 trees (three trees for each combination specie per pasture). The results were that total carbon storage in tree biomass was significant ($p < 0,05$) with the highest value in guachipelín associated with *B. brizantha* with 4,39 t C ha⁻¹. Carbon stored in pasture biomass was higher in *B. brizantha* associated with cenízaro with 5,8 t C ha⁻¹. Carbon stored in roots was higher in the first 20 cm, for tree roots was higher in cenizaro + *B. brizantha* and for pasture roots the best treatment was *B. brizantha* associated with guachipelín with 1,45 t C ha⁻¹ There were no statistical differences in soil carbon sequestration ($p > 0,05$) but 55% of this sequestration was located at the first 20 cm depth.

Transpiration values were higher in guachipelín with $1,5 \text{ mm/day}^{-1}$ and the lower were for cenízaro with $0,27 \text{ mm/day}^{-1}$. In conclusion, the carbon content was similar in all the silvopastoral systems evaluated but they are highly promising to sequester carbon and to use water efficiently if established in the dry tropics.

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. TIPOS DE ECUACIONES MÁS COMUNES PARA DESARROLLAR ECUACIONES DE BIOMASA EN SISTEMAS SILVOPASTORILES.....	12
CUADRO 2. DISTRIBUCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS EN LAS PARCELAS EXPERIMENTALES.	26
CUADRO 3. CARBONO TOTAL ALMACENADO EN LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES EN CAÑAS, COSTA RICA.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA DEL SITIO DE INVESTIGACIÓN, HACIENDA LA PACÍFICA, CAÑAS, COSTA RICA.	23
FIGURA 2. PRECIPITACIÓN MENSUAL PROMEDIO EN LA HACIENDA LA PACIFICA. FUENTE: INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL DE COSTA RICA 2003.....	24
FIGURA 3. DISEÑO DE LAS SUBPARCELAS DEL EXPERIMENTO, HACIENDA LA PACÍFICA, CAÑAS, COSTA RICA.	25
FIGURA 4. ESQUEMA DEL PROCESO DE FRACCIONAMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL SUELO.	30
FIGURA 5. CRECIMIENTO DE LOS ÁRBOLES NATIVOS (GUACHIPELÍN, COCOBOLO Y CENÍZARO) ASOCIADO CON LAS DOS PASTURAS (B. BRIZANTHA Y H. RUFA) EN CAÑAS, COSTA RICA.	35
FIGURA 6. BIOMASA ARRIBA DEL SUELO PARA LAS ESPECIES NATIVAS (GUACHIPELIN (G), COCOBOLO (CO) Y CENIZARO (CE)) EN LAS DOS PASTURAS (B.BRIZANTHA Y H. RUFA), CAÑAS, COSTA RICA.	36
FIGURA 7. FRACCIÓN DE CARBONO EN LAS RAMAS PEQUEÑAS Y HOJAS DE LOS ÁRBOLES DE LAS ESPECIES NATIVAS (GUACHIPELÍN, COCOBOLO, CENÍZARO) EN LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES, CAÑAS, COSTA RICA	38
FIGURA 8. FRACCIÓN DE CARBONO EN LAS RAMAS GRANDES (RG) Y FUSTE (F) EN LOS ÁRBOLES DE LAS ESPECIES NATIVAS (GUACHIPELÍN, COCOBOLO Y CENÍZARO) EN LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES, CAÑAS, COSTA RICA	39
FIGURA 9. FRACCIÓN DE CARBONO EN LAS PASTURAS SS=SIN SOMBRA Y CS= CON SOMBRA, EN SISTEMAS SILVOPASTORILES DE CAÑAS, COSTA RICA.	40
FIGURA 10. CONTENIDO DE CARBONO TOTAL EN LA BIOMASA DE LA PASTURA RESIDUAL EN LOS DIFERENTES SISTEMAS SILVOPASTORILES (BRACHIARIA+CENIZARO (BCE), BRACHIARIA+COCOBOLO (BCo), H. RUFA+CENIZARO(HCE),H. RUFA +COCOBOLO (HCo),BRACHIARIA+GUACHIPELIN(BG),H. RUFA+GUACHIPELIN (HG) EN CAÑAS, COSTA RICA.	41
FIGURA 11. CONTENIDO DE CARBONO EN LAS RAÍCES DE LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES (BRACHIARIA+CENÍZARO (BCE), BRACHIARIA+COCOBOLO (BCo), H. RUFA+CENÍZARO(HCE),H. RUFA +COCOBOLO (HCo),BRACHIARIA+GUACHIPELIN(BG),H. RUFA+GUACHIPELÍN (HG) EN CAÑAS, COSTA RICA.	42
FIGURA 12. CARBONO ALMACENADO EN LAS RAÍCES DE LOS ÁRBOLES EN LOS PRIMEROS 20 CM EN LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES (BRACHIARIA+CENIZARO (BCE), BRACHIARIA+COCOBOLO	

(BCo), H. RUFA+CENIZARO(HCE),H. RUFA +COCOBOLO (HCo),BRACHIARIA+GUACHIPELIN(BG),H. RUFA+GUACHIPELIN (HG) EN CAÑAS, COSTA RICA.	43
FIGURA 13. CARBONO ALMACENADO EN LAS RAÍCES DE LAS PASTURAS EN LOS PRIMEROS 20 CM EN LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES (BRACHIARIA+CENIZARO (BCE), BRACHIARIA+COCOBOLO (BCo), H. RUFA+CENIZARO(HCE),H. RUFA +COCOBOLO (HCo),BRACHIARIA+GUACHIPELIN(BG),H. RUFA+GUACHIPELIN (HG) EN CAÑAS, COSTA RICA.	44
FIGURA 14. CARBONO ALMACENADO EN LAS RAÍCES DE LOS ÁRBOLES EN EL PERFIL 20-40 CM EN LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES(BRACHIARIA+CENIZARO (BCE), BRACHIARIA+COCOBOLO (BCo), H. RUFA+CENIZARO(HCE),H. RUFA +COCOBOLO (HCo),BRACHIARIA+GUACHIPELIN(BG),H. RUFA+GUACHIPELIN (HG) EN CAÑAS, COSTA RICA.	44
FIGURA 15. CARBONO ALMACENADO EN LAS RAÍCES DE LAS PASTURAS EN EL PERFIL DE 20-40CM EN LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES (BRACHIARIA+CENIZARO (BCE), BRACHIARIA+COCOBOLO (BCo), H. RUFA+CENIZARO(HCE),H. RUFA +COCOBOLO (HCo),BRACHIARIA+GUACHIPELIN(BG),H. RUFA+GUACHIPELIN (HG) EN CAÑAS, COSTA RICA.	45
FIGURA 17. CARBONO ALMACENADO EN LAS RAÍCES DE LAS PASTURAS (B. BRIZANTHA Y H. RUFA) EN EL PERFIL 40-60 EN SISTEMAS SILVOPASTORILES (BRACHIARIA+CENIZARO (BCE), BRACHIARIA+COCOBOLO (BCo), H. RUFA+CENIZARO(HCE),H. RUFA +COCOBOLO (HCo),BRACHIARIA+GUACHIPELIN(BG),H. RUFA+GUACHIPELIN (HG) EN CAÑAS, COSTA RICA.	46
FIGURA 18. CARBONO TOTAL EN EL SUELO EN LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES(BRACHIARIA+CENIZARO (BCE), BRACHIARIA+COCOBOLO (BCo), H. RUFA+CENIZARO(HCE),H. RUFA +COCOBOLO (HCo),BRACHIARIA+GUACHIPELIN(BG),H. RUFA+GUACHIPELIN (HG) EN CAÑAS, COSTA RICA.....	48
FIGURA 19. CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO A DIFERENTES PROFUNDIDADES EN SISTEMAS SILVOPASTORILES EN CAÑAS, COSTA RICA.	49
FIGURA 20. CARBONO ALMACENADO EN EL SUELO BAJO LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES EN CAÑAS, COSTA RICA.	50
FIGURA 21. CARBONO ORGÁNICO EN LA FRACCIÓN GRUESA A LA PROFUNDIDAD DE 20 CM EN LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES (BRACHIARIA+CENIZARO (BCE), BRACHIARIA+COCOBOLO (BCo),	

<i>H. RUFA+CENIZARO(HCE),H. RUFA +COCOBOLO (HCo),BRACHIARIA+GUACHIPELIN(BG),H. RUFA+GUACHIPELIN (HG) EN CAÑAS, COSTA RICA.....</i>	<i>50</i>
<i>FIGURA 22. CARBONO ALMACENADO EN LA FRACCIÓN GRUESA A LA PROFUNDIDAD DE 0-20 CM EN LOS SSP (BRACHIARIA+CENIZARO (BCE), BRACHIARIA+COCOBOLO (BCo), H. RUFA+CENIZARO(HCE),H. RUFA +COCOBOLO (HCo),BRACHIARIA+GUACHIPELIN(BG),H. RUFA+GUACHIPELIN (HG) EN CAÑAS, COSTA RICA.....</i>	<i>51</i>
<i>FIGURA 23. CONTENIDO DE NITRÓGENO EN LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES (BRACHIARIA+CENIZARO (BCE), BRACHIARIA+COCOBOLO (BCo), H. RUFA+CENIZARO(HCE),H. RUFA +COCOBOLO (HCo),BRACHIARIA+GUACHIPELIN(BG),H. RUFA+GUACHIPELIN (HG) EN CAÑAS, COSTA RICA.....</i>	<i>54</i>
<i>FIGURA 24. PROMEDIO DE LA TRANSPIRACIÓN DE LAS ESPECIES NATIVAS (GUACHIPELÍN (G),COCOBOLO (Co) Y CENÍZARO (CE).</i>	<i>55</i>
<i>FIGURA 25. TRANSPIRACIÓN DE LAS ESPECIES NATIVAS EN LAS DOS ÉPOCAS EVALUADAS (TRANSICIÓN ÉPOCA SECA A LLUVIOSA Y ÉPOCA LLUVIOSA).....</i>	<i>56</i>
<i>FIGURA 26. TRANSPIRACIÓN DE LAS ESPECIES NATIVAS ASOCIADAS (GUACHIPELÍN, COCOBOLO Y CENÍZARO) EN DOS PASTURAS H. RUFA (H) Y B. BRIZANTHA (B).</i>	<i>56</i>
<i>FIGURA 27. COMPORTAMIENTO DE LA TRANSPIRACIÓN DE LAS ESPECIES NATIVAS (GUACHIPELIN (G), COCOBOLO (Co) Y CENIZARO (CE) ASOCIADOS A BRACHIARIA BRIZANTHA.....</i>	<i>57</i>
<i>FIGURA 28. COMPORTAMIENTO DE LA TRANSPIRACIÓN DE LAS ESPECIES NATIVAS (GUACHIPELÍN (G), COCOBOLO (Co) Y CENÍZARO (CE) ASOCIADAS CON H. RUFA.</i>	<i>58</i>
<i>FIGURA 29. EFICIENCIA DE USO DE AGUA PARA LAS ESPECIES MADERABLES NATIVAS (GUACHIPELÍN, COCOBOLO Y CENÍZARO) ASOCIADAS A LAS DOS PASTURAS (B. BRIZANTHA Y H. RUFA).....</i>	<i>59</i>

1. INTRODUCCIÓN

La retención de energía en la atmósfera por el incremento del CO₂ causando el efecto invernadero se debe principalmente a la utilización indiscriminada de combustibles fósiles y a los cambios de uso del suelo. De acuerdo a cifras reportadas por el Panel Intergubernamental, para el cambio climático 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) (Montenegro y Abarca 1999).

El área mundial de bosques esta disminuyendo aproximadamente entre 12 y 15 millones de hectáreas anuales. La mayoría de esta disminución (10 a 12 millones de hectáreas) ocurre en el trópico. Las causas principales de la deforestación son el cambio de bosques hacia tierras agrícolas y de pastoreo, y la tala de madera para leña y para construcción (Kanninen 1999). Por ello, las prácticas de manejo juegan un importante papel en la determinación del carbono almacenado. Por ejemplo, los sistemas que combinan árboles y pasturas (sistemas silvopastoriles) almacenan más carbono que los sistemas con pastos solamente (Pfaff *et al.* 2000). La información sobre la cubierta de la tierra y el uso de esta es esencial, ya que la cantidad de carbono almacenado en un sitio dado depende del clima (precipitación y temperatura) las condiciones del suelo, también como las actividades humanas desarrolladas (Albretch y Kandji 2003).

La cuantificación del carbono en los diferentes ecosistemas se basa principalmente en la acumulación de carbono (producción de biomasa) y la pérdida de CO₂ estimada por respiración en los diferentes compartimentos del sistema. La variabilidad de los datos por unidad es enorme, dependiendo de factores como componentes del sistema, clima, suelo, ecozona, especies, manejo del sistema y/ o factores socioeconómicos (Camero *et al.* 1999).

Para llegar a una base de datos sólida, que permita negociar incentivos forestales y agroforestales que paguen por los servicios ambientales de almacenaje de C en los sistemas silvopastoriles ya se cuenta con metodologías sencillas que permiten estimar la asimilación y emisión de gases invernadero en el ámbito de sistema y paisaje con un mayor grado de confianza (Camero *et al.* 1999, Andrade e Ibrahim 2000, Andrade e Ibrahim 2003). Además, teniendo en cuenta que los sistemas silvopastoriles se han presentado como una alternativa

para rehabilitar pasturas degradadas y con problemas de productividad en zonas del trópico seco y una de las principales limitantes para lograr este objetivo en la disponibilidad del recurso agua durante gran parte del año por ello se ha evaluado la capacidad de las especies nativas para consumir agua, ya que esta puede ser una limitante fundamental a la hora de secuestrar carbono por parte de estas especies. Teniendo en cuenta que la cantidad de carbono secuestrado en un sistema silvopastoril depende de la estructura, función y extensión, los cuales son afectados por factores ambientales, socioeconómicos, de las especies de árboles y del sistema de manejo (Albrecht y Kandji 2003). Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la capacidad de las especies nativas del trópico seco para secuestrar carbono y el comportamiento de éstas ante la limitante importante como es el recurso agua.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos General

Estimar el almacenamiento, fijación de carbono y uso del agua de especies maderables nativas en sistemas silvopastoriles en el trópico seco de Costa Rica.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Evaluar el almacenamiento de carbono en los sistemas silvopastoriles en el trópico seco de costa Rica.
2. Medir el efecto de los sistemas silvopastoriles sobre el carbono orgánico (CO) en las fracciones de la materia orgánica del suelo (MOS) y en el CO total comparados con las pasturas solas.
3. Cuantificar la transpiración de especies arbóreas nativas en los sistemas silvopastoriles en el trópico seco.

1. 2 Hipótesis

- En los sistemas silvopastoriles existe mayor secuestro de carbono comparado con pasturas en monocultivos.
- En los sistemas silvopastoriles debido a la presencia de árboles existe mayores entradas orgánicas, y por tanto, existirán mayores contenidos de carbono orgánico en el suelo.
- El nivel de competitividad de la especie y la pastura con que se asocie determina el nivel de consumo de agua de la especie maderable nativa.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

Las concentraciones de CO₂ en la atmósfera se han duplicado desde mediados hasta el final del siglo XX, elevando la temperatura global de 1.5 a 4.5°C, proceso que causa un desplazamiento en la distribución y en la producción de la vegetación (Houghton 1994). Tales desplazamientos en los modelos de vegetación afectaran la producción de cultivos agrícolas y el incremento del total de suelos marginales (Dixon 1995b). El gran flujo de carbono a la atmósfera es el resultado de la deforestación en las latitudes tropicales para acomodarse a la producción de alimentos y suplir las necesidades de leña y tierras. Fisher y Trujillo (1999) sugieren que la tasa de deforestación se incrementa en proporción al crecimiento de la población, la emisión de C vía biótica puede ser dos veces que la realizada vía emisiones de combustible fósil.

El carbono se está acumulando en la atmósfera a una tasa de 3,5 Pg (Pg = 10¹⁵ g o billones de toneladas) por año, de la cual, la quema de combustibles fósiles y la conversión de bosques tropicales a producción agrícola o pasturas contribuyen en mayor proporción (Albrecht y Kandji 2003). Se estima que la deforestación de los trópicos aporta entre 42 y 160 millones de t C año⁻¹ a la atmósfera, de las cuales entre 10 y 30 millones de toneladas se atribuyen al decrecimiento de la materia orgánica en los suelos deforestados. Los efectos de la deforestación incluyen la emisión de gases de efecto invernadero, pérdida de la biodiversidad, pérdida de diversidad cultural, degradación de la tierra y del recurso agua y posibles impactos sobre el clima regional (Fujisaka *et al.* 1998)

El uso de la tierra para sistemas de pastoreo intensivo se ha incrementado durante las últimas décadas, principalmente en lo que fueron tierras de bosque. Cerca del 38% (94 millones de hectáreas) del área total de Centroamérica esta constituida por tierras de pastoreo (Kanninen 1999). En países como Costa Rica, se ha presentado una dramática reducción en el área boscosa, éste es uno de los aspectos más preocupantes, ya que la producción de ganado se ha dado con aumentos modestos en productividad y bajo un sistema extensivo (Steinfeld 1999). Por lo tanto, los sistemas de producción agropecuaria

que trasladen CO₂ ocioso de la atmósfera a un ciclo biótico y lo retengan por más tiempo dentro del agroecosistema, serán más sostenibles y convenientes (Montenegro y Abarca 1999).

En cuanto a los medios para reducir carbono en la atmósfera, éste puede alcanzarse por dos procesos: reducción de las emisiones antropogénicas de CO₂ y creando o incrementando los sumideros de C en la biosfera (Albrecht y Kandji 2003). Una de las opciones de manejo de carbono relacionadas con los ecosistemas existentes y con los sistemas de producción, incluyen la incorporación de árboles a los sistemas agrícolas, ya sea como sistemas agroforestales o silvopastoriles (Kanninen 1999, De Jong *et al.* 2000).

La importancia de los sistemas silvopastoriles es su utilización como modelo de uso de la tierra, adaptados a los ecosistemas del trópico seco como herramienta útil en la mitigación del CO₂ atmosférico (Albrecht y Kandji 2003) y a su vez como fuentes de ingresos como medio de reducción de la pobreza (Pandey 2002).

2.2 SECUESTRO DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES

Lundgren y Raintree (1982) definen agroforestería al “nombre colectivo para el sistema de uso de la tierra y las tecnologías donde las leñosas perennes son deliberadamente usadas en el mismo sistemas de manejo tanto como en cultivos agrícolas y/o animales, en alguna forma de arreglo espacial o secuencia temporal.

La promoción de la agroforestería es una de las mayores opciones que se perciben con mayores oportunidades para resolver los problemas relacionados con el uso de la tierra y los problemas de calentamiento global (Schroeder 1994, Albrecht y Kandji 2003). En el contexto del cambio climático y el ciclo global del carbono, la agroforestería es de interés por al menos dos razones. La primera es que el componente arbóreo fija y almacena carbono de la atmósfera vía fotosíntesis. Porque los árboles son plantas perennes, y pueden actuar como un sumidero de carbono por periodos de muchos años y continúan almacenando carbono hasta que se cortan y mueren (Schroeder 1994, Dixon 1995b, Pandey 2002). La segunda razón del interés en la agroforestería es la aparente necesidad de reducir la tala de más bosque para la agricultura y proveer una alternativa para la agricultura migratoria. Debido a

que millones de personas son dependientes, de alguna forma, de la agricultura migratoria y ellos producen el 60% de toda la tierra deforestada, esta deforestación es la fase inicial para transferir estas tierras a un pastoreo a gran escala o a otras formas de uso (Schroeder 1994).

Pandey (2002) sugiere que un sistema agroforestal típico crea una interacción sinérgica entre los cultivos y los árboles para sostener la productividad, mientras que al mismo tiempo el C es secuestrado continuamente para la mitigación del clima. Los sistemas agroforestales tienen dos beneficios principales para conservar C (Schroeder 1994, Dixon 1995b, Pandey 2002):

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

Los beneficios adicionales de los sistemas agroforestales son: alcanzar la seguridad alimentaria y la tenencia de la tierra en los países en desarrollo, incrementar el ingreso familiar, restaurar y mantener la biodiversidad (incluyen o los corredores entre las áreas protegidas), mantener las cuencas hidrográficas y la disminución de la erosión del suelo (Andrade e Ibrahim 2000). En los sistemas agroforestales, el secuestro de carbono es un proceso dinámico y se puede dividir en fases: cuando se establece muchos sistemas probablemente son fuentes de gases de efecto invernadero (pérdida de carbono y nitrógeno de la vegetación y del suelo). Luego sigue una fase rápida de acumulación y período de maduración cuando el carbono es almacenado en los troncos, raíces y en el suelo y al final del periodo de rotación, cuando los árboles son cosechados y la tierra retornada al cultivo (sistemas secuenciales), parte del carbono será lanzado de nuevo a la atmósfera. Por lo tanto, un secuestro efectivo de carbono solo puede ser considerado si hay un balance positivo después de varias décadas al compararlas con una reserva de carbono inicial (Albrecht y kandji 2003).

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

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

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

2.3 SISTEMAS SILVOPASTORILES

Un sistema silvopastoril es una opción de producción pecuaria que involucra la presencia de leñosas perennes (árboles o arbustos), e interactúa con los componentes tradicionales (forrajeras herbáceas y animales), todos ellos bajo un sistema de manejo integral (Pezo e Ibrahim 1999).

Las gramíneas con altos rendimientos de biomasa y bien adaptadas, tienen un rol importante en la retención y reducción de la emisión de carbono a la atmósfera (Veldkamp 1994). Lo anterior se debe tanto a la productividad de biomasa aérea como de raíces, a la longevidad de estas últimas y a la deposición de materia orgánica al suelo cuando son establecidas en suelos de vocación agropecuaria y en sistemas de producción adecuada (Montenegro y Abarca 1999).

Un alto porcentaje de las tierras en pasturas (>35%) en América Central se encuentra en estado avanzado de degradación. Debido a ello, los árboles de uso múltiple pueden jugar un rol importante en la restauración ecológica de estas, mientras que contribuyen con la sostenibilidad económica de los sistemas de producción ganadera (Szott *et al.* 2000). La ganadería y los desechos ganaderos también producen gases que contribuyen al cambio climático global. Algunos son locales, como el amoníaco, otros como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) afectan la atmósfera causando el calentamiento global o efecto invernadero (Steinfeld 1999).

El establecimiento de sistemas silvopastoriles y la creación de reservas forestales, o inclusive plantaciones forestales, son una forma efectiva de mejorar la eficiencia productiva, aprovechar mejor la tierra y generar mas ingresos por la venta de la madera, además que permiten el secuestro de carbono. En cuanto al mercado de la madera, todo revela que también está en expansión, siendo clara la tendencia hacia la diferenciación en función del uso potencial (Pomareda 1999a).

Fisher *et al.* (1994) indican que del llamado C perdido (un déficit de 0,4-4,3 Gt) resultante después de hacer el balance global total del CO₂ y del cual se sugiere que mucho puede estar en la biosfera terrestre, una buena parte podría estar almacenada en las pasturas. Estos autores indican que, por la introducción de pasturas seleccionadas, las sabanas de Sudamérica estarían secuestrando entre 100 y 507 Mt de carbono por año del llamado carbono perdido (Montenegro y Abarca 1999).

Según Veldkamp (1994), una pastura de *Brachiaria dyctioneura* retiene 60 por ciento más de C que un pasto natural (*Axonopus compressus*), debido a la mayor biomasa y longevidad radicular y al incremento en la acumulación de C en el suelo por el aporte de la materia orgánica. En el trópico semiárido, las especies con raíces profundas pueden tener una ventaja ecológica para contrarrestar o evitar los efectos de la sequía. Fisher y Trujillo (1999) especularon que los sistemas radicales profundos podían ser parte del mecanismo por el cual el C era secuestrado por los pastos de gramíneas introducidas en las sabanas neotropicales. La determinación del contenido de carbono en el suelo, con base en los modelos de las respuestas al incremento de CO₂ en la atmósfera y al calentamiento global asociado, indica que el suelo bajo las praderas tropicales tiene un gran potencial para el secuestro de carbono (Dugas *et al.* 1999). Por ejemplo, López (1998) encontró en Costa Rica que en un suelo de mediana fertilidad se almacenan de 180 a 200 t C ha⁻¹ en los primeros 50 cm del suelo bajo una pastura de (*Panicum maximum*) creciendo con *Cordia Alliodora* (López 1998).

Las sabanas, los bosques y las praderas tropicales ocupan al menos un 11,5% de la superficie terrestre total. La fijación de C en sistemas tropicales de gramínea-árbol es cerca de $7,6 \text{ Pg año}^{-1}$ ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$), aproximadamente la mitad de la fijación anual neta de C en los bosques tropicales. La fijación de C es principalmente controlada por la disponibilidad de agua y nutrientes y la composición y estructura de la vegetación. El almacenamiento total de C en las praderas, sabanas y bosques tropicales es cerca de 135 Pg , del cual el 80% está en el suelo (Fisher y Trujillo 1999).

La magnitud con la cual un suelo puede ser un reservorio continuo de C depende del balance entre las tasas de los procesos de adquisición de C y las tasas de degradación, tanto del C residente como del recientemente adquirido. Poco se conoce a cerca de estos procesos, especialmente en los suelos ácidos de las sabanas neotropicales (Fisher *et al.* 1994).

Fisher *et al.* (1994) indicaron que la cantidad de C acumulado en el pasto de las gramíneas sólo era marcadamente constante en 3 t ha^{-1} y sugirieron que el proceso era limitado en su tasa. Como la adición de un componente leguminoso al pasto aumentaba la tasa de 2.5 hasta 5 veces, concluyeron que el proceso era limitado por N. El ecosistema de pastura comprende alrededor del 32% de la vegetación natural en la tierra y nuestra habilidad para predecir el futuro incremento en las concentraciones de CO_2 depende de nuestro entendimiento de cómo se almacena el C en grandes sumideros terrestres de carbono para responder a cambios de manejo, de uso de la tierra y en el clima (Dugas *et al.* 1999).

Sin embargo, el ecosistema de pastura emite 3 g CO_2 por día a la atmósfera durante el periodo seco. Las máximas tasas de fijación generalmente coinciden con la máxima área foliar y con la máxima tasa de acumulación de biomasa (Dugas *et al.* 1999, Sims y Bradford 2001). Es claro que el balance de carbono en sistemas de pasturas es menos beneficioso a largo plazo y la tendencia es a disminuirlo debido a las continuas emisiones de metano. El sistema de aforestación alcanza un carbono total de 222 t C ha^{-1} , comparado con una pastura de alta productividad que alcanza 23 t C ha^{-1} después de 86 años (Ford-Robertson *et*

a/1999). Las emisiones de metano (CH₄) por animal vario de acuerdo al tipo de ganadería. Las estimaciones dan que para ovejas es de 30gdía⁻¹ y de 250gdía⁻¹ para una vaca.

2. 4 Modelos de biomasa

De acuerdo a Segura y Kanninen (2002) la construcción de los modelos de biomasa consiste de la medición de árboles en pie con su posterior corta y cuantificación de su biomasa aérea total. Los árboles se miden y cortan para cuantificar su biomasa y luego se prueban los modelos de regresión para encontrar el modelo que mejor se adapte al comportamiento dentro del sistema. El procedimiento para desarrollar los modelos es el siguiente: se pesan cada uno de los componentes del árbol, se toman muestras y se pesan en el campo; posteriormente, en el laboratorio se calcula el factor de conversión de peso fresco a peso seco (contenido de materia seca a 60°C) por un periodo de 24 a 72 horas (Ecuación 1) y luego se halla la biomasa.

$$MS\% = \left(\frac{PSH}{PFM}\right) * 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde

MS% = Porcentaje de materia seca

PSH = Peso seco al horno (g)

PFM = Peso fresco de la muestra (g)

$$B = \frac{(PTV * MS\%)}{100} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde

B = Biomasa (t)

PTV = Peso total verde del componente (t)

MS% = Porcentaje de materia seca

Luego en el laboratorio se calcula la gravedad específica o densidad básica de la madera (Ecuación 3).

$$DB = \frac{PSH}{VM} \text{ Ecuación 3}$$

Donde

DB = Densidad básica (g.cm^{-3})

PSH = Peso seco al horno (g)

VM = Volumen de la muestra (cm^{-3})

En el campo se hace la cubicación de los componentes de los árboles mediante la utilización de la fórmula de Smalian (Ecuación 4).

$$V = \sum \left(\frac{d_{i1} + d_{i2}}{2} \right)^2 * \left(\frac{\pi}{4} \right) * H_{i1} \text{ Ecuacion4}$$

Donde

V = Volumen del fuste o rama (m^3)

d_{i1} = Diámetro del extremo grueso de la troza o rama (m)

d_{i2} = Diámetro del extremo delgado de la troza (m)

H_{i1} = Altura o longitud de la sección de la troza (m)

De acuerdo a Segura (1999) se selecciona el modelo que presente las siguientes características:

1. El modelo tenga una lógica biológica.
2. Coeficiente de determinación ajustado (R^2 -ajustado)
3. Coeficiente de variación.
4. Análisis de varianza para el modelo y para cada parámetro se hizo la prueba de cp Mallows.

5. Se hicieron las pruebas de normalidad, homocedasticidad e independencia para los modelos.

De acuerdo a MacDiken (1997), para desarrollar modelos de biomasa se puede utilizar 30 árboles bien seleccionados, pero si el desarrollo de estos modelos es para lugares específicos con 12 árboles es suficiente para el desarrollo de estos modelos. Las ecuaciones más comunes para el desarrollo de los modelos de biomasa se indican en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Tipos de ecuaciones más comunes para desarrollar ecuaciones de biomasa en sistemas silvopastoriles.

Tipo de Biomasa	Ecuaciones más comunes ¹
Árbol completo	$B = b_0 + b_1 D^2 H$
	$B = b_0 + b_1 D$
Biomasa leñosa	$B = b_0 + b_1 D^2 H$
Peso de las ramas, follajes y de la copa.	$B = b_0 + b_1 D^2$
	$B = b_0 + b_1 D$

1 B= biomasa total (kg); D= diámetro (cm) a la altura del pecho (1,3 m); H= altura total en m ; b_0 y b_1 =parámetros de la regresión.

2.5 Carbono en Suelos

El suelo es el compartimento más grande de carbono en los ecosistemas terrestres, pues sólo en el primer metro tiene una cantidad equivalente a tres veces el carbono almacenado en la vegetación arriba del suelo y el doble en contenido del carbono en la atmósfera (Schlesinger 1997). El reemplazo de las coberturas boscosas primarias por pasturas produce variaciones en la propiedad físicas y químicas de los suelos. Por tanto, los sistemas de uso del suelo afectan los mecanismos de transformación y de retención del carbono orgánico del suelo (COS). Por esta razón, los procesos de degradación del suelo pueden con frecuencia, traer confusión sobre la estimación del COS en diferentes tipos de cobertura, esto se debe que los procesos como compactación, erosión y mineralización de la materia orgánica incrementan la densidad aparente de las capas superficiales del suelo y por tanto conducen

a sobreestimaciones del carbono orgánico en las capas más degradadas. Por ello, es difícil detectar las diferencias en COS entre coberturas cuando el muestreo se restringe a los horizontes superficiales del suelo (Moreno y Lara 2003).

2.5.1 Carbono orgánico en el suelo

Harmand (2003) define la materia orgánica del suelo como la fracción orgánica del suelo que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, incluyendo tejidos y células de organismos que viven en el suelo, y sustancias orgánicas producidas por los habitantes del mismo (flora y fauna). Los estudios sobre materia orgánica son invariablemente estudios de carbono orgánico (Nair 1993). El carbono es la fuente de energía o el sustrato sobre el que los microorganismos se alimentan, su actividad depende directamente de la cantidad de carbono disponible en cualquier tiempo particular, y la cantidad de carbono así perdido es proporcional al presente inicialmente (Young 1989).

2.5.2 Fracciones de la materia orgánica

Los agregados de suelo pueden ser clasificados en microagregados y macroagregados usando como límite el tamaño de partícula de 250 μm . Los macroagregados son grupos de microagregados que pueden romperse fácilmente cuando son sumergidos en agua o agitados. Fuertes conexiones son creadas por algunos materiales orgánicos (p.e residuos microbiales y de plantas, raíces y polisacáridos). El manejo del suelo ejerce una fuerte influencia en la formación y persistencia de los agregados, especialmente de los macroagregados. Generalmente, las concentraciones de carbono y las tasas de C/N decrecen a medida que los agregados del suelo se hacen más pequeños, pero la cantidad de C fijado en ellos incrementa a medida que el tamaño de los agregados disminuyen (Izaurre et al 2001).

Las fracciones de la materia orgánica en el suelo que más decaen como resultado del manejo son la fracción liviana (FL) y la macro materia orgánica (Cambardella y Elliot 1992). Se considera la fracción ligera como la fracción de la materia orgánica con una densidad menor de 2,0 g cm^{-3} , generalmente con una relación de C/N <25 y contiene cantidades apreciables de restos microbiales y micro fauna incluyendo hifas y hongos. La fracción de macro materia orgánica del suelo está definida como la fracción de la materia orgánica que

tiene un tamaño similar al de la arena ($>53 \mu\text{m}$), está compuesta principalmente por fragmentos de raíces y otros residuos vegetales que se encuentran en varios estados de descomposición, tiene una relación C/N alrededor de 20 (Cambardella y Elliot 1992).

De acuerdo a Parton *et al.* (1987) la materia orgánica se divide en tres fracciones: activa, lenta y pasiva con tiempos de descomposición de < 1 año, 5 – 25 años, y 1000 años, respectivamente. La fracción activa constituye alrededor de un 5 – 10%, la lenta de 20 – 40%, y la pasiva de 40 – 70% de la materia orgánica total del suelo. Meléndez (1997) comenta que las diferencias en las tasas de reciclaje entre estas fracciones son debido a la naturaleza química de los compuestos orgánicos y su asociación con las partículas del suelo.

La fracción activa incluye la biomasa microbiana y las sustancias fácilmente descompuestas (como exudados) que provienen de las plantas y microbios. La fracción lenta incluye residuos orgánicos químicamente complejos o medio descompuestos que se encuentran disponible a los microorganismos (usualmente existen entre los macroagregados del suelo) y que aún no es considerada como humus. La fracción pasiva incluye los compuestos químicos complejos que son difícilmente descompuestos y/o existen dentro de los microagregados y consecuentemente no son físicamente disponibles a los microorganismos (Duxbury *et al.* 1989).

2.5.3 Fraccionamiento de la materia orgánica en el suelo

Los dos principales métodos para el fraccionamiento de la materia orgánica son: 1) el primero es el fraccionamiento granulométrico basado en la separación de las fracciones por el tamaño. La materia orgánica del suelo se puede fraccionar pasando el suelo a través de mallas de diferentes tamaños usando agua. El tamaño del material orgánico u orgánico-mineral está relacionado con procesos de descomposición y función dentro de la materia orgánica del suelo. En el fraccionamiento granulométrico, cada fracción es comparable con los tres tipos de partículas de la textura del suelo: partículas del tamaño de la arena ($>53\mu\text{m}$) llamada materia orgánica particulada (MOP) o fracción macroorgánica; la fracción de limo ($2-53\mu\text{m}$) y la fracción del tamaño de la arcilla ($<2\mu\text{m}$). Uno de los principales objetivos del enfoque del método granulométrico es cuantificar las cantidades de cada una de las fracciones como resultado de los diferentes manejos (Meléndez 1997).

El segundo método son los fraccionamientos químicos de la materia orgánica del suelo, siendo éstos complejos, porque los aislamientos químicos cambian la naturaleza química de la materia orgánica del suelo y no están directamente relacionados con la dinámica de la materia orgánica del suelo en los sistemas cultivados, es por esto que muchos estudios utilizan los métodos de fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo (Cambardella y Elliot 1992).

Además, la perturbación física de la materia orgánica por agitación o sonificación para romper los agregados y exponer la materia orgánica, evita las alternaciones químicas de la materia orgánica que pueden acompañar a las extracciones químicas, pero se puede presentar el problema de las redistribuciones de las fracciones durante el proceso de perturbación. Los métodos de separación física secuencial con base al tamaño de los agregados con los que está asociada la materia orgánica del suelo están siendo utilizadas con gran éxito para esclarecer la dinámica del suelo (Meléndez 1997).

2. 6 Transpiración

La transpiración es un proceso de pérdida de agua en forma de vapor por plantas y otros organismos. Sin embargo, a diferencia de la evaporación desde una superficie acuosa, la transpiración es modificada por diversos factores tales como estructura de la planta y el comportamiento de los estomas que operan en conjunción con los principios físicos que rigen la evaporación (Kramer 1983).

Una de las formas más expeditas para medir el flujo perdido a través de la transpiración es medir la cantidad de agua moviéndose desde la raíz hasta la copa de los árboles. Debido a que el flujo presente en el floema es casi insignificante se puede equiparar como el flujo que pasa a través del xilema como el flujo total. Para medir este flujo existen varias metodologías pero el flujo de savia es una de las más sobresalientes.

2.6.1 Flujo de savia

Este es un método adecuado para medir la transpiración y relaciona la transpiración real con el crecimiento real en la base de un árbol en condiciones *In situ*. Este método fue introducido

por Huber (1937) y éste usa calor como un indicador del movimiento de savia. El flujo de savia ha sido usado en árboles y en plantas herbáceas para determinar el flujo de ascenso de la savia a través del tallo. La medición del flujo de savia se realiza a nivel tallo individual y luego se extrapola a nivel de uso de la planta completa y luego es comparado con los datos de la estación meteorológica, existe un efecto de la densidad de los árboles sobre el flujo de savia. Los métodos disponibles para medir flujo de savia a nivel de tallo individual utilizan la transferencia de calor: el método de balance de calor, el método de balance de calor de flujo constante o de granier y el método de impulso de calor (heat pulse method).

2.6.1.1 El método de balance de calor. El método está basado en el balance de calor en el tallo: durante el día se aplica una cantidad de energía conocida (Q_h) la cual se introduce en la parte activa del xilema entre dos puntos, esta energía debe ser balanceada mediante la transferencia de energía hacia la parte inactiva del xilema (Q_i) (pérdida de calor radial por conducción), el calor transportado por el xilema a través del flujo de transpiración (Q_t) y el calor transferido verticalmente por el xilema vía conducción (Q_c). El balance está dado por:

$$Q_h = Q_i + Q_t + Q_c$$

Para hallar el Q_t se miden directamente las Q_h , Q_i y Q_c para así poder determinar la Q_t la cual es convertida a flujo de savia f :

$$f = \frac{2 * Q_t}{C_e * (\Delta T_a - \Delta T_b)}$$

Donde

C_e = Capacidad de calor específica de la savia

$\Delta T_a - \Delta T_b$ = Diferencia de temperatura en la savia en los dos sitios de medición.

2.6.1.2 Método de la temperatura constante (*Steady-state temperature method*). En este método el agua en el xilema es calentado permanentemente con una cantidad de energía constante. El incremento de la temperatura de la savia en el xilema a una distancia fija arriba del punto de calentamiento, es usado para calcular el flujo de agua a través de las cavidades

del xilema. Si bien es simple instalar un aparato de calentamiento constante y medir la diferencia de temperatura se pueden presentar problemas cuando el flujo es bajo o cuando se detiene el suministro de energía durante la noche. En este método se requiere mantener un flujo constante de calor al tallo para mantener una temperatura constante variando la energía más que los impulsos. Un ejemplo de este método son las agujas de granier (Granier 1987), donde dos agujas de metal son insertadas en el tallo del árbol. El flujo de savia se obtiene de una función de la tasa de pérdida de calor desde la aguja calentada al compararla con la temperatura de una aguja con temperatura de la savia normal registrada por un segundo sensor colocado mas abajo en el tallo que el primero. El flujo de savia se calcula utilizando la fórmula

$$f_s = \left(\frac{\delta T(0)}{\delta T(u) - 1/a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Donde

$\delta T(0)$ = Máxima diferencia de temperatura

$\delta T(U)$ = Diferencia de temperatura en el momento t.

$a = 0,0206$

$b = 0,81204$

2.6.1.3 El método de la velocidad de pulso del calor. La medición de la velocidad de pulso de calor se refiere a la determinación del flujo de savia dentro del tronco a través de la integración de varios puntos de medición dentro del tronco conductivo. Estas medidas asumen que el tallo es térmicamente homogéneo, y que la savia se conduce a través del xilema a una velocidad uniforme, además que los espacios intersticiales en los vasos del xilema son lo bastante pequeños para permitir la transferencia de calor que ocurre en el movimiento de savia entre dos puntos siendo el tiempo insignificante. La metodología fue inicialmente descrita por Huber (1932) y luego desarrollada por Marshall (1958), la cual se realiza mediante el calentamiento del fuste de un árbol en un sitio determinado y de esta manera conocer el flujo de agua de transpiración. Se mide el tiempo que se toma en

detectarse el incremento de temperatura a una distancia determinada desde el punto de calentamiento por un termocouple insertado en el tallo.

En resumen, un flujo de agua convectiva causa movimiento de agua caliente en el flujo de transpiración, de esta manera hay una conducción de calor por los tejidos del fuste del árbol. Los cálculos de transferencia de calor están basados en la máxima temperatura de equilibrio entre dos sensores. La velocidad de impulso de calor es calculada desde el tiempo t_m , y mide la distancia de un sensor a otro con flujo de calor hasta alcanzar la temperatura máxima.

$$v = \sqrt{\frac{(x^2 - 4kt_m)}{t_m}}$$

Donde

v = Es la velocidad de calor

x = Es la distancia entre el sensor caliente y el de referencia

k = Es la difusividad térmica de la madera.

La velocidad de calor es convertida a velocidad de flujo de savia usando la ecuación de Marshall

$$V_s = V_h \cdot (\rho_{sm} C_{sm}) / (\rho_s C_s)$$

Donde

V_h = velocidad de calor

ρ y C_{sm} = son densidad y capacidad de calor específica de la savia (asumiendo que son iguales al agua)

ρ_{sm} y C_{sm} son densidad y capacidad de calor específica de un tronco inmaduro.

V_s = velocidad de flujo de savia.

2.7. Eficiencia de Uso del Agua

La eficiencia de uso de agua se define como la cantidad de agua perdida durante el proceso de producción de biomasa o de fijación de CO₂ en la fotosíntesis. La eficiencia de uso de agua depende de la conductancia estomática y de la diferencia en presión de vapor entre los espacios de aire intercelular y el aire circundante. La temperatura es otro factor, por que este afecta la presión de vapor en la hoja; de la densidad arbórea y del déficit de saturación del aire, por esto se ha dicho que las plantas que crecen en climas semiáridos producen menos materia seca por unidad de agua transpirada que en condiciones húmedas. Cuando el agua es una limitante la producción de las plantas decrece linealmente con el incremento del déficit de presión de vapor. Droppelmann *et al.* (2000) define la eficiencia de uso de agua como

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

Donde

EUA = Eficiencia de uso del agua (g mm⁻¹)

B = Biomasa (g m⁻² day⁻¹)

UA = Uso de agua (mm day⁻¹)

La eficiencia de uso del agua puede afectar la composición y el éxito de la regeneración natural de especies nativas, promoviendo especies que responden mayor a las condiciones del sitio. Especies con EUA baja toman ventaja en sitios húmedos, mientras especies con EUA alta prevalecen en sitios secos (D'alessandro *et al* 2005).

Existe un interés en el uso más eficiente del agua ya que se esta volviendo cada día mas escasa, la evapotranspiración es alta y los periodos de sequía son frecuentes. Es bien conocido que el consumo de agua por las plantas depende de factores fisiológicos y ambientales especialmente de la radiación solar y del déficit de presión de vapor (Whitehead y Beadle 2004).

2. 8 Descripción general de las especies en estudio.

2.8.1 *Brachiaria brizantha* (A. Rich.) Staff

Esta especie gramínea es conocida como “Saint Lucia Grass” (Queensland), estrella África, pasto alambre (América latina); es nativa de África tropical, pero actualmente introducida en la mayor parte de los países tropicales. Es una planta perenne, de porte 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 larga (Skerman y Riveros 1992).

B. brizantha crece bien desde el nivel del mar hasta los 3000 m de altitud, requiere precipitaciones superiores a los 500 mm año⁻¹ y es bastante tolerante a la sequía. Su temperatura óptima de crecimiento esta entre 30 y 35 °C, y sobrevive a las heladas. Esta especie tolera un amplio rango de suelos y de acidez (Skerman y Riveros 1992).

2.8.2 *Hyparrhenia rufa* (Nees) Staff

H. rufa tiene varios nombres comunes: jaragua, faragua o yaragua, puntero (Sudamérica), Veyale (Mali), Senbelet (Etiopía). Es una especie perenne de 60-240 cm de alto. La panícula es suelta y estrecha de hasta 50 cm de largo con racimos algo desplegados o continuos y espiguillas poco vellosas o casi glabras de 3.5 a 5 mm de largo. Los vellos pardo rojizos en las espiguillas y los racimos exertos en los terminales desde los espateolos la distinguen de *H. filipendula* y *H. hirta*. Los tallos en floración presentan pocas hojas. Las vainas foliares encierran casi la mitad de cada entrenudo, lo que da a la caña la apariencia de estar abrazada. Esta especie en los llanos de Colombia y Bolivia, soporta una estación seca de seis meses. (Skerman y Riveros 1992).

2.8.3. *Pithecellobium saman* (Jacq.) Benth.

Esta especie es miembro de la familia Fabaceae y su nombre común es el Cenízaro y Saman. El cenízaro es un árbol grande y macizo, con la corona redonda, las hojas de 2-8

pares de foliolos, cada uno de estos de 2 a 7 pares de foliolos de ovados a obovados con 3-6 cm de longitud; las flores tienen cabezas sueltas, la corola es amarilla-grisácea, los estambres de un rosado intenso, las yemas elongadas de 20 a 24 cm de longitud. Esta especie es propagada por semilla (Póveda y Sánchez 1999). Es una especie crítica que busca sitios que pueden satisfacer sus necesidades de agua, y allí se establece como una especie dominante, utilizando la sombra densa como su principal arma. Pertenece a sistemas de bosque establecido, pero necesita cierta cantidad de luz para regenerarse, por lo cual la regeneración bajo el árbol madre es poco usual. Lo importante para el cenízaro es que no tenga que trabajar demasiado para absorber agua en ninguna estación del año. No le importa que en ciertos periodos tenga que soportar inundaciones, y se le ve muchas veces en la parte inferior de las faldas, donde el agua esta cerca (Faurby y Barahona 1998).

En Costa Rica, se considera una madera preciosa. Uno de los fuertes del cenízaro es su capacidad de crecer hasta lograr dimensiones grandes, y de esta manera puede proveer maderas estructurales y tablas grandes (Faurby y Barahona 1998, Póveda y Sánchez 1999). Los ganaderos reconocen su valor como sombra en los potreros y como productor de alimento (las semillas) para los animales. Ya que el árbol no busca su agua en la parte superior del suelo, y además es fijador de nitrógeno, mantiene una buena producción de pasto bajo su copa, a pesar de la sombra densa (Faurby y Barahona 1998).

2.8.4 *Diphysa robinoides* Benth

Esta especie de árbol es parte de la familia Fabaceae. Tiene hojas alternas, con estipulas, corteza negra con muchas fisuras, frutos llenos y flores amarillas. Su nombre común es el guachipelín es una especie de uso múltiple la cual puede utilizarse para realizar artesanías, producción de miel, control biológico de plagas, leña, construcción, usos industriales, forraje, medicinal y ornamentación (Póveda y Sánchez 1999). Su principal producto es la madera, que generalmente se utiliza en lugares donde se necesita alta resistencia a condiciones climáticas adversas. Se utiliza para construcciones rurales como: corrales, puentes, vigas, postes muertos y postes para cerca y mangos para herramientas. También se utiliza la leña siendo esta de excelente calidad. Las hojas constituyen un buen forraje, rico en proteínas (19 al 27%) y compuestos nitrogenados, muy apetecidos para el ganado, aunque algunos

informes indican que no es muy palatable para el ganado (excepto para las cabras) y que solo come los retoños al final del verano (Cordero y Boshier 2003).

2.8. 5 *Dalbergia retusa* Hemsl.

Su nombre común es cocobolo es parte de la familia Fabaceae. El cocobolo es un árbol de mediano tamaño con tronco recto, usualmente cilíndrico pero más o menos irregular y frecuentemente ramifica cerca de la base. La corteza tiene fisuras verticales. Se reproduce por semilla y existe en Costa Rica un traslape entre la floración y la fructificación: tanto flores como frutos se producen en época seca, entre enero y mayo. Sin embargo, existe otra producción entre agosto y noviembre. Esta especie es heliófita, que no alcanza gran altura, crece bien en sitios abiertos con bosque poco denso (Jiménez 1999, Póveda y Sánchez 1999). Esta especie se adapta a suelos pedregosos y en sitios con tacotal y pastizales con jaragua (*H. rufa*), donde la regeneración no se quema y realmente alcanza buenos crecimientos. Las plantitas son tolerantes a la luz y crece bien a plena iluminación solar, característica que la hace apta para sistemas de enriquecimiento en bosques secos muy perturbados y para plantaciones en bosque (Cordero y Boshier 2003).

Posee una madera muy fina, la cual es utilizada principalmente en la fabricación de artesanías y en ebanistería (muebles), objetos deportivos (piezas de ajedrez), mangos de herramientas (cuchillos de cocina) y mangos de paraguas (Jiménez 1999, Cordero y Boshier 2003).

3. METODOLOGÍA

3.1 Ubicación y descripción del sitio 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 m.s.n.m) localizado a 5 km al norte de Cañas, Guanacaste, Costa Rica (Figura 1). El campo experimental tiene una pendiente promedio de 4%.



Figura 1. Mapa del sitio de investigación, Hacienda La Pacífica, Cañas, Costa Rica.

3.1.1 Condiciones climáticas

La precipitación promedio de la zona es de 1500 mm al año (Figura 2); sin embargo, existe una pobre distribución de las lluvias a través del año, ya que el 85% de éstas caen en los meses de mayo a noviembre. La temperatura media es alrededor de 28 °C, con valores máximos y mínimos de 36 °C y 23 °C, respectivamente. La humedad relativa varía entre 60 y 65% en la temporada seca y de 80 a 85% en la temporada húmeda (Herrick 1993).

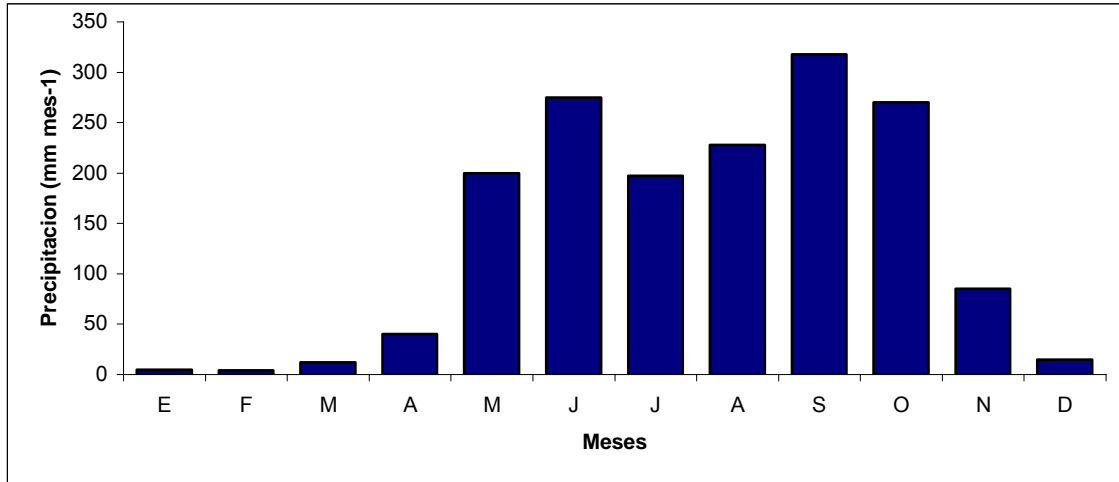


Figura 2. Precipitación mensual promedio en la Hacienda la pacifica. Fuente: Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica 2003

3.1.2 Suelos

El suelo del campo experimental está clasificado como un complejo Lithic Ustorthent- Lithic Dystroptep, y pertenece a la serie Bagaces- Liberia. El material de origen es de cenizas volcánicas. La textura del suelo es limo con 20% de arcilla. El pH es de 6,0 con una capacidad de intercambio catiónico de 21,4 cmol Kg⁻¹, una saturación de bases del 72% y un contenido de fósforo de 2,68 mg Kg⁻¹ (Herrick 1993).

3.2. Sujetos y fuentes de Investigación

3.2.1 Especies seleccionadas

Las especies presentes en el sitio experimental son las siguientes:

3.2.1.1 Árboles

Especies de alto valor comercial y en peligro de extinción como: *Diphyssa robinoides* y *Dalbergia retusa*

Leguminosas como: *Samanea saman*

3.2.1.2 Pasturas

Nativa de crecimiento erecto y de calidad nutricional baja (*Hyparhenia rufa*).

Pastura comercial de crecimiento erecto y de calidad nutricional alta (*Brachiaria brizantha*).

3.2.2 Establecimiento del experimento

El experimento se estableció en un lote de 10 ha, proveniente de un sistema ganadero con manejo de *H. rufa* por 20 años, con una carga animal promedio de 0,67 animales ha⁻¹ y sin utilización de fertilizantes. La parcela principal con *B. brizantha* fue preparada con tractor para mejorar su establecimiento; en el caso de *H. rufa* la pastura se dejó sin preparación. La pastura *B. brizantha* fue sembrada por semilla sexual con una densidad de 4 kg ha⁻¹. Los árboles están plantados en líneas dobles (2x2m) dejando un callejón de 8 m entre las líneas dobles (Figura 3). La plantación de árboles se hizo desde septiembre del 2001, con material proveniente del vivero de la Hacienda La Pacífica. Al momento de la siembra se fertilizó con 180 kg ha⁻¹ de fertilizante 12-30-20.

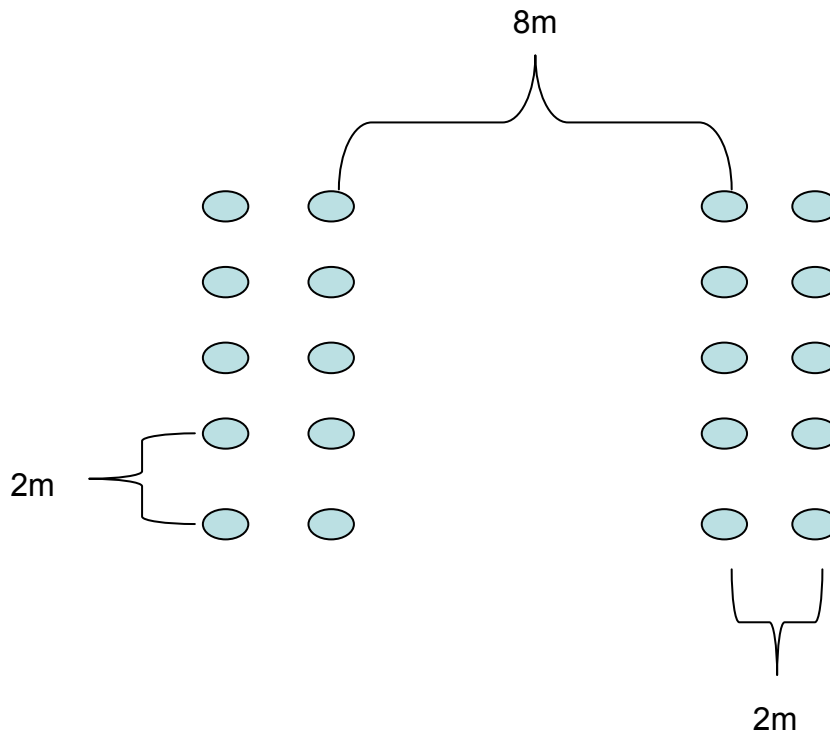


Figura 3. Diseño de las subparcelas del experimento, Hacienda La Pacífica, Cañas, Costa Rica.

3.2.3 Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con arreglos en parcelas divididas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Distribución de los tratamientos en las parcelas experimentales.

Tipo de Parcela	Factor	Nivel	Nombre Vulgar
Parcela Principal	Especie herbácea	<i>Brachiaria brizantha</i>	Braquiaria
		<i>Hypparrhenia rufa</i>	Jaragua
Sub-parcela	Especie arbórea	<i>Pithecellobium saman</i>	Cenízaro
		<i>Diphysa robinoides</i>	Guachipelín
		<i>Dalbergia retusa</i>	Cocobolo
		Sin árboles	

El modelo matemático correspondiente es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + B_j + P_j + \varepsilon_{pxb} + A_k + PA_{jk} + \varepsilon_{ijkp}$$

Donde

μ = Media poblacional de la variable medida

B_j = Efecto del j-ésimo bloque

P_j = Efecto del i-ésimo tratamiento (pasturas)

ε_{pxb} = Error de la parcela principal

A_k = Efecto del k-ésimo tratamiento en las subparcelas (árboles)

PA_{jk} = Efecto de la interacción pastura x árbol

ε_{ijkp} = error para el muestreo en las subparcelas.

3.3 Variables a medir

3.3.1 Estimación de los modelos de biomasa

La biomasa de los árboles se estimó con base en modelos alométricos, los cuales correlacionaron la biomasa del árbol con variables medidas en los árboles en pie (altura total, diámetro a la altura del pecho). Se midió el crecimiento de los árboles haciendo dos mediciones durante la duración del ensayo para estimar el incremento en altura, diámetro y en biomasa.

Para la estimación de la biomasa del componente arbóreo se siguió la metodología sugerida por Segura y Kanninen (2002). El árbol se dividió en sus componentes: fuste, ramas grandes, ramas pequeñas y hojas. Las ramas pequeñas (<25 cm de diámetro) y hojas se pesaron en fresco y se transformaron a valores de biomasa tomando una muestra y secándola en el horno (70 °C hasta obtener un peso constante). El fuste y las ramas grandes (diámetro ≥ 25 cm) se cubicaron (determinando su volumen mediante las ecuaciones de Smallian, Huber entre otras) y se transformo a valores de biomasa por medio de su gravedad específica (Andrade e Ibrahim 2003, Segura y Kanninen 2005). Luego se procedió a desarrollar modelos matemáticos que relaciones variables del árbol con el contenido de biomasa total. Los modelos sugeridos para calcular la biomasa en el componente arbóreo son los desarrollados por Andrade *et al.* (2005, en preparación).

3.3.1.1. Gravedad específica

Determinación de la gravedad específica: 1) se colocaron las muestras por tres a cuatro días al horno a 75 °C, 2) luego las muestras se sellaron con parafina industrial y se obtuvo el peso de estas con parafina (g), 3) con los dos pesos anteriores se calculó el peso de la parafina, 4) el peso de la parafina se convirtió a volumen (m^3) dividiendo entre la gravedad específica de esta $0,9 \text{ g cm}^{-3}$, 5) luego se obtiene el peso del sistema sin muestra, compuesto por una balanza, un recipiente de tres litros de agua y una prensa para sumergir la muestra, 6) se coloca la muestra sobre la prensa y se sumerge en el agua destilada, sin tocar las paredes del recipiente, luego se obtiene el peso del sistema con muestra (g) 7) por diferencia con los dos pesos anteriores, se calcula el peso del agua desplazada (g) 8) el peso anterior se convierte a volumen de agua desplazada (cm^3) dividiendo entre la gravedad específica del

agua (1 g cm^{-3}), 9) se calcula el volumen real de la muestra (cm^3), restándole el volumen obtenido anteriormente al volumen de parafina, 10) se calcula la gravedad específica mediante la ecuación 5.

$$GE = \frac{PSH(g)}{VM_{sp}(cm^3)} \text{ Ecuación 5}$$

Donde

GE = Gravedad específica de la madera ($\text{g cm}^{-3} = \text{t m}^{-3}$)

PSH = Peso seco al horno (g)

VM_{sp} = Volumen muestra sin parafina (cm^3)

3.3.2 Biomasa de raíces

Para estimar la biomasa de raíces en las pasturas y en el componente arbóreo del sistema, se utilizó el método de muestreo por barrenado de motor con un diámetro de broca de 2". Las muestras extraídas en el campo fueron conservadas en refrigeración a 5°C hasta su procesamiento. El muestreo contempló los siguientes pasos: 1) se tomaron muestras de suelos a las siguientes profundidades: 0-20 cm; 20-40 cm; 40-60 cm, 2) se extrajeron las muestras de suelo con raíces con el barrenado de motor con un volumen conocido, 3) se extrajeron y se lavaron las raíces encontradas en la muestra de suelo, 4) se hizo limpieza de las muestras para la separación de residuos u otras partículas que no fueran raíces, 5) se tomó una submuestra y se hizo separación de las raíces por especie de manera visual, 6) se llevaron las muestras al horno a 70°C y se dejaron en él hasta obtener un peso constante, 7) En el proceso de extracción de las mismas: el lavado y el almacenamiento de las muestras de raíces se presentan pérdidas de alrededor del 20 al 40% del peso seco. En las primeras 24 h se puede perder alrededor de un 10% debido principalmente a la respiración. Por ello, se ha sugerido un factor de corrección que está en el rango de 1,4 a 2,0 el cual nos sirve para contabilizar las pérdidas de materia seca en raíces debido al manejo del material. Por esto para las estimaciones del contenido de carbono se aplicó un factor de corrección de 1.5 para no hacer subestimaciones de raíces finas, debido al gran número de pérdidas que se pueden presentar en el proceso (Oliveira *et al.* 2000, Sierra *et al.* 2003). Se hizo la valoración de la

biomasa de las raíces porque es un importante sumidero de carbono, además cuando se presentan cambios ambientales o perturbaciones, estas se recuperan fácilmente (Sierra *et al.* 2003); 8) se extrapolarán los datos (biomasa de raíces) a valores por superficie del suelo.

3.3.3 Carbono total en el Suelo

El carbono total 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 dobles y a 4 m de la línea doble) por cada profundidad (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm), se utilizó un barreno helicoidal de hierro.

Las muestras de suelo se secaron al aire, y fueron pasadas por un tamiz de 2 mm para luego ser enviadas al laboratorio. Del material tamizado se saco una submuestra de 12 g la cual fue utilizada para la determinación de la humedad, secándose el suelo a una temperatura de 105 °C en una estufa de aire forzado. Otra submuestra de suelo fue secada al aire y homogenizada donde se analizó el carbono orgánico total y el nitrógeno total.

El fraccionamiento se realizó combinando un método de dispersión química, seguido con la separación física basado en el tamaño de las partículas (Cambardella y Elliot 1992). En cada tratamiento se tomo 12,5 gramos de suelo, estos se dispersaron en 50 ml de una solución de hexametáfosfato de sodio y se agitó por una hora en un agitador horizontal a 120 r.p.m. Se vació la suspensión sobre un tamiz de 53 µm, se lavó el suelo con pequeñas alícuotas de agua las partículas de suelo adheridas al tubo de ensayo y con una espátula se desprendió ligeramente los agregados que se encontraban encima del tamiz. La fracción de arena + macromateria orgánica retenida sobre el tamiz (53µm) fue recolectada y puesta en un beaker previamente pesado, de igual forma la fracción de la materia orgánica del suelo <53µm asociada al mineral (limos+arcilla) que pasó a través del tamiz se recolectó en un beaker previamente pesado. De cada fracción se dejó evaporar el exceso de agua en una estufa a 60 °C, hasta obtener el peso seco. Cada fracción obtenida fue mortereada y posteriormente se analizó el Carbono orgánico total y el N total para la macromateria orgánica y para la fracción asociada al mineral (figura 4).

La cantidad de carbono orgánico ($t\ ha^{-1}$) almacenada en el perfil del suelo (0-20; 20-40 y 40-60 cm) se obtuvo como el producto del área (ha), por la densidad aparente del suelo ρ ($t\ m^{-3}$), por el porcentaje de carbono ($C\%$) y por la profundidad de muestreo (pm).

En general:

$$COS = a * \rho * fc * pm$$

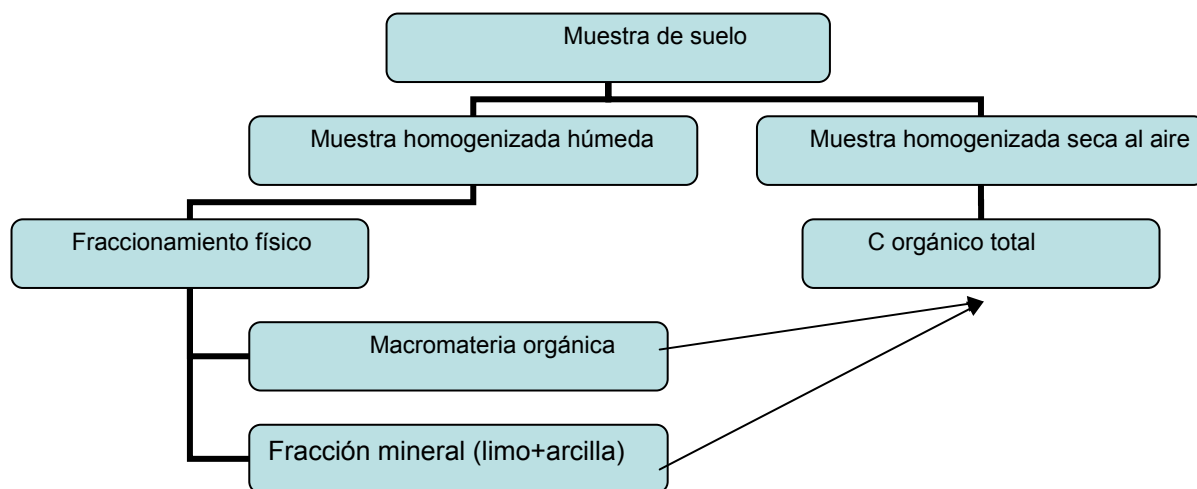


Figura 4. Esquema del proceso de fraccionamiento de la materia orgánica en el suelo.

Las tasas de secuestro de carbono en el suelo se calcularon estimando la diferencia entre carbono orgánico total en cada tratamiento y el carbono orgánico en el tratamiento con pasturas de *Hyparrhenia*, dividiéndolo por la duración del tratamiento:

$$TF_s = \frac{COT_t - COT_p}{A}$$

Donde

TF_s = Tasa de fijación en el suelo ($t\ C\ ha^{-1}\ año^{-1}$)

COT_t = Carbono orgánico en el tratamiento ($t\ C\ ha^{-1}$)

COT_p = Carbono orgánico en la pastura *H. rufa* o línea base ($t\ C\ ha^{-1}$)

A = Años de establecido el tratamiento

3.3.4 Biomasa de las pasturas

La biomasa aérea en la pastura se midió utilizando marcos metálicos de 50x50 cm (0,25 m²) muestreando aleatoriamente para cada subparcela experimental (2 muestras por subparcela) tomando la biomasa comprendida desde el suelo hasta una altura de 25 cm o biomasa de la pastura residual. El procedimiento que se realizó fue cortar el pasto dentro de cada cuadrante, se pesó y se mezcló con el material de otro cuadrante (submuestras), se pesó en fresco y se homogenizaron las muestras para traer aproximadamente 200 g, los cuales se llevaron al laboratorio donde se les determinó la materia seca y carbono orgánico. Para simular el pastoreo de los animales se hizo un corte de las pasturas a una altura de 25 cm, en ambas pasturas.

3.3.5 Carbono total en los sistemas

Para la determinación del carbono total de los sistemas se sumó el carbono obtenido para cada uno de los componentes.

$$CT = C_B + C_R + C_{TS}$$

Donde

CT = Carbono total en el sistema por hectárea.

C_B = Carbono en la biomasa aérea por hectárea.

C_R = Carbono en la biomasa de las raíces por hectárea.

C_{TS} = Carbono total en el suelo por hectárea.

3.3.6 Medición de la transpiración en especies nativas

Se seleccionaron seis árboles por cada especie nativa (*Dalbergia retusa*, *Dyphisa robinoides* y *Samanea saman*)(tres en cada una de las pasturas *Brachiaria brizantha* y *Hyparrhenia rufa*) con diámetros a la altura del sensor (de más de 8 cm). Se utilizaron sensores de flujo de tallo SGB-ws (operando rangos de 24 a 32 mm de diámetro) y SGB1 19 ws (18 a 23 mm de diámetro).

Las agujas de Granier (consistentes en una 'aguja calentada' y una aguja de referencia) fueron instaladas en cada uno los tres árboles por especie por pastura y estas a su vez, conectadas al datalogger y al multiplexer que daba lecturas cada 15 segundos, almacenando resultados promedio de 15 minutos de intervalo en un módulo de almacenaje Campbell Scientific SM192. El sistema fue alimentado de energía con una batería de carro de 50 A (en el día el sistema estaba conectado a un panel solar), el cual regulaba la salida del flujo de voltaje 3,5 a 4,0 mV a las agujas.

El procedimiento utilizado para la instalación de las agujas fue el siguiente: para instalar las agujas se removió la parte exterior e interior de la corteza y el cambium en un área de 1 cm², a aproximadamente 1,30 m para la aguja de referencia y a una altura de 1,45 m de altura del tronco para la aguja con calor, ligeramente desviados de la línea vertical para evitar la inserción en el mismo vaso del xilema, para la aguja calentada. Las agujas fueron insertadas a una profundidad de 22 mm y con 2,3 mm de ancho con un taladro eléctrico. Las agujas instaladas fueron protegidas con una cubierta de plástico cilíndrica (envases plásticos de refrescos), luego cubierto con un aislante térmico para evitar el recalentamiento de las agujas y para impedir el escurrimiento de agua desde el tronco hacia el interior del recubrimiento fueron sellados con cinta aislante. La instalación completa fue protegida en contra de la infiltración con un plástico transparente y sellado con cinta y así evitar la penetración de agua durante las lluvias.

La diferencia promedio entre lecturas simultáneas en las dos agujas fue registrada por el datalogger. Midiendo las agujas la capacidad de disipación del calor con el incremento del flujo de savia y el resultante enfriamiento de la fuente de calor. Valores altos corresponden a mayores flujos de savia.

El valor exacto tiene que ser sustituido en la ecuación empírica de Granier (1987) con un parámetro adimensional K:

$$k = \frac{dT_{\max} - dT}{dT}$$

Donde

dT_{max} = El valor del dT cuando no hay flujo de savia (valor del juego igual a 0).

dT = El calculado del diferencial de voltaje medidos entre la aguja con calor superior y la aguja inferior de referencia.

La velocidad del flujo de savia V ($m\ s^{-1}$) esta relacionada con K :

$$V = 3,458 \times 10^{-4} \times K^{1,231}$$

Se tomó como constante $3,4 \times 10^{-4}$ la que fue suministrada por el fabricante, siendo diferente a la reportada por Granier (1987). Y fue convertido a una tasa de flujo de savia (f_s) en $litro\ h^{-1}$ para la totalidad de árboles:

$$F_s = A_s \times V \times 3600 (sh^{-1}) \times 100 (cm.cm^{-1})$$

Donde

A_s = Área de la sección transversal del xilema (cm^2).

Se tomaron para el análisis las lecturas simultáneas registradas en la estación metereológica cercana al sitio experimental para los meses de mayo y agosto del 2005. Se tomaron mediciones durante las dos épocas (transición seca a lluviosa y lluviosa) a los mismos 18 árboles (3 por especie en cada pastura), durante 4 días en la primera época de transición seca a lluviosa y en 6 días en la época lluviosa. Los sensores o agujas fueron instalados en la misma posición pero las perforaciones fueron realizadas cerca de las hechas previamente.

Teniendo en cuenta los resultados de Kanten (2003) se utilizó un A_s de alrededor de 81,5% del área del tronco. El contenido de humedad (%) fue determinado con por el método gravimétrico durante cada periodo de medición del flujo. La evapotranspiración de referencia (E_{to}) fue estimado con la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al* 1998) con inputs μ_2 , T y HR obtenidas de la estación metereológica.

El déficit de presión de vapor (VPD, por sus siglas en inglés) fue calculado utilizando la ecuación de Penman:

$$e_a = 0,1 \times \exp(54,88 - 5,03 \times \ln(T + 273,15) - \frac{6791}{T + 273,15})$$

$$e_d = e_a \times HR$$

$$VPD = e_a - e_d$$

Donde

VPD = Es el déficit de presión de vapor (kpa)

e_a = Es la presión de vapor de saturación (kpa)

e_d = Presión de vapor a la temperatura del aire T (transformada de grados Celsius a grados Kelvin)

$$K^o = 1,00(^o C + 273)$$

HR = Humedad Relativa (%).

3.3.7 Métodos de análisis estadístico

Los estudios de carbono se analizaron con análisis de varianza para los diferentes compartimentos de carbono y se hizo comparación de los tratamientos con pruebas de Duncan. Los datos fueron analizados con SAS e Infostat y se relacionó la VPD (Déficit de presión de vapor) con el flujo de savia por época por especie. El flujo de savia para los árboles ($\text{mm día}^{-1} \text{ árbol}^{-1}$) fue sometido a un análisis de varianza y a una prueba de significancia para las dos épocas.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Carbono en la biomasa aérea

El carbono acumulado en los sistemas silvopastoriles es afectado por diversos factores entre ellos: la (s) especies de árbol/arbusto, la densidad y distribución espacial de los árboles, y la tolerancia de las especies herbáceas a la sombra (Beer *et al.* 2003). Por ello en este trabajo se evaluó el crecimiento de las especies y se encontró que la de mejor crecimiento fue el guachipelín en las dos pasturas ($p < 0.05$) y la de menor crecimiento fueron cocobolo asociado con *H. ruffa* y el cenízaro asociado *B. brizantha* (figura 5).

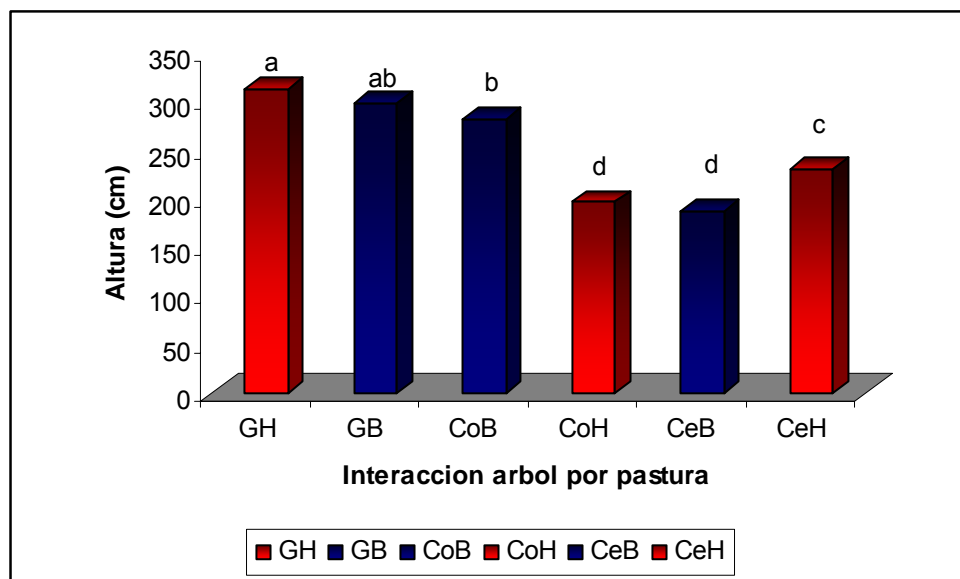


Figura 5. Crecimiento de los árboles nativos (guachipelín, cocobolo y cenízaro) asociado con las dos pasturas (*B. brizantha* y *H. ruffa*) en Cañas, Costa Rica.

Para el cálculo de la biomasa se modelaron las ecuaciones alométricas para cada especie relacionando las variables DAP (diámetro a la altura del pecho) y altura con relación a la biomasa, ya que de acuerdo a Segura (1999) la utilización de dos variables proveen estimaciones mas exactas de la biomasa, aunque Suárez (2002) afirma que incluir la variable altura induce a mayores costos y proporciona un error bastante alto. En el caso de los sistemas silvopastoriles estudiados esta dificultad se obvia dada la facilidad para las mediciones y la baja densidad de árboles por hectárea de los mismos. Las ecuaciones

fueron desarrolladas dentro del trabajo de doctorado de Andrade *et al.* (2005, en preparación), el cual encontró que el modelo que se ajustaba a las condiciones de estudio en Cañas era el siguiente:

$$Bt = 10^{(-1.54+2.05\log(dg)+1.18\log(h))}$$

Donde

Bt = Biomasa del árbol (kg)

dg = Diámetro cuadrático a la altura del pecho (cm).

h = Altura total (m)

Posteriormente se hizo el cálculo de la biomasa para cada árbol por parcela, utilizando las ecuaciones alométricas encontradas y luego se extrapolaró su valor a biomasa aérea por hectárea.

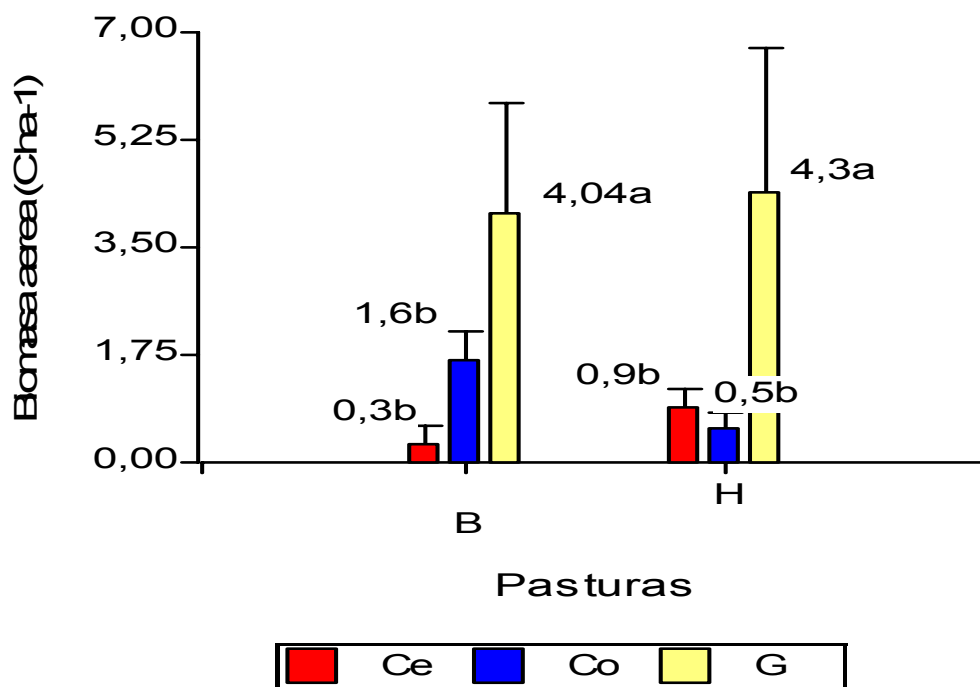


Figura 6. Biomasa arriba del suelo para las especies nativas (guachipelin (G), cocobolo (Co) y cenizaro (Ce)) en las dos pasturas (B.brizantha y H. rufa), Cañas, Costa Rica.

Se encontró que para la biomasa arriba del suelo los tratamientos que presentaron mayor contenido de carbono fue el guachipelín en cualquiera de las dos pasturas ($p < 0.05$) y los de peores rendimientos fueron el cenízaro y el cocobolo acompañado de *B. brizantha* e *H. ruffa*, respectivamente. La biomasa arriba del suelo encontrada en este trabajo vario de $0,39 \text{ t C ha}^{-1}$ en cenízaro asociado con brachiaria a $4,39 \text{ t C ha}^{-1}$ en guachipelín asociado con *H. ruffa* (figura 6). En Nicaragua, Ruiz (2002) encontró en pasturas naturales el carbono almacenado en los árboles fue de $8,2 \text{ t C ha}^{-1}$ y $12,5 \text{ t C ha}^{-1}$ para pasturas mejoradas con árboles, en este caso las especies utilizadas eran de mayor de tamaño y edad. Resultados superiores a Ruiz (2002) y a los de este trabajo, reporto Ramos (2003) en la zona de Esparza, Punta Arenas, encontrando en pasturas mejoradas con árboles un almacenamiento de carbono de $29,71 \text{ t C ha}^{-1}$, en bosque secundario de $96,76 \text{ t C ha}^{-1}$ y para el sistema de pasturas degradadas fue de $0,62 \text{ t C ha}^{-1}$, encontrando la mayor cantidad de biomasa en árboles de la clase diámetro fustales (diámetro $> 10 \text{ cm}$).

Por ello, el carbono almacenado en la parte aérea depende de la densidad, de la especie y de la edad de la plantación; Villanueva *et al.* (2002) encontraron que el C almacenado en los tallos de *Alnus acuminata* para las edades de 2, 3 y 4 años en los SSP fueron de 1,1; 4,2 y $6,2 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente. Para la zona del trópico húmedo de Costa Rica, Andrade (1999) encontró que en SSP con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* valores de almacenamiento de carbono entre 3,7 y $4,7 \text{ t ha}^{-1}$ de los cuales las especies arbóreas aportaron entre el 76 al 94% del carbono.

4.1.1 Gravedad específica

En el presente estudio se encontró que el cocobolo (*Dalbergia retusa*) presenta una gravedad específica de $0,72 \pm 0,060 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$, para el cenízaro (*Samanea saman*) de $0,572 \pm 0,133 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$ y para el guachipelín (*Diphysa robinoides*) de $0,761 \pm 0,082 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$, similares resultados a los reportados para estas especies por Cordero y Boshier (2003) (Guachipelín de 0,6 a $0,72 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$ y cenízaro 0,42 a $0,64 \text{ (g cm}^{-3}\text{)})$ pero con resultados diferentes para cocobolo con un gravedad específica menor ya que estos autores encontraron valores que fluctuaban de 0,99 a $1,22 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$.

En especies de bosque natural Segura (1999) reporta valores de gravedad específica que fluctúan entre 0,56- 0,69 (g cm^{-3}) que para la zona de estudio el valor que mejor se ajustaba a la condiciones fue de 0,63 (g cm^{-3}). En la región norte de Costa Rica para especies de bosques natural Segura y Kanninen (2005) reportan valores cercanos a los 0,62 (g cm^{-3}).

4.1.2 Fracción de carbono

Para estimar el carbono contenido presente en los sistemas silvopastoriles se determino la fracción de carbono (fc) en cada una de los componentes de las especies presentes guachipelín, cocobolo y cenízaro y para las pasturas. Se encontró que la fc para las hojas fue mayor para el cocobolo (0,46) y la menor para el guachipelín (0,43) (figura 7) esto se puede deber a la consistencia de las hojas de el cocobolo que son mas gruesas y coriáceas, en cambio las del guachipelín son delgadas y de poco espesor. Para las ramas pequeñas la fc fue mayor para el guachipelín (0,46) y la menor para el cenízaro (0,44) (figura 7).

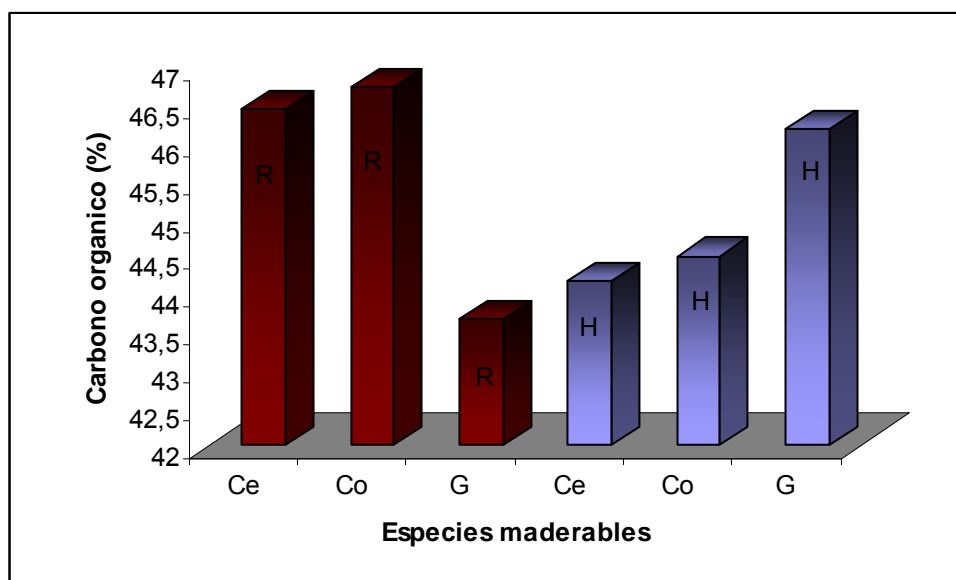


Figura 7. Fracción de carbono en las ramas pequeñas y hojas de los árboles de las especies nativas (guachipelín, cocobolo, cenízaro) en los sistemas silvopastoriles, Cañas, Costa Rica

Para la fracción de carbono Segura (1999) reporta valores promedio de 0,46 incluyendo fustes y ramas, encontrando en ramas gruesas valores de 0,46 y en ramas delgadas de

0,45. Este mismo autor encontró valores de 0,43 para especies del bosque natural de altura de la cordillera de Talamanca, Costa Rica (Segura 1997).

En cuanto a la fracción de carbono en las ramas grandes se encontró el mayor valor en el guachipelín (0,48) y para la fc en el fuste se encontró en el cenízaro (figura 8). Andrade (1999) reporta valores de fracción de carbono de fuste y ramas 0,46 a 0,47, respectivamente, para *Acacia mangium* y de 0,46 para ramas y fuste de *Eucalyptus deglupta*. Para la fracción de carbono en el fuste en especies maderables de bosques de altura en la zona de Cartago, Mora (2001) reporta valores desde 0,44 a 0,47. Por lo general, cuando no se tiene conocimiento de cual es el valor de la fracción de carbono, comúnmente se utiliza el factor de 0,5 para realizar los cálculos (MacDicken 1997).

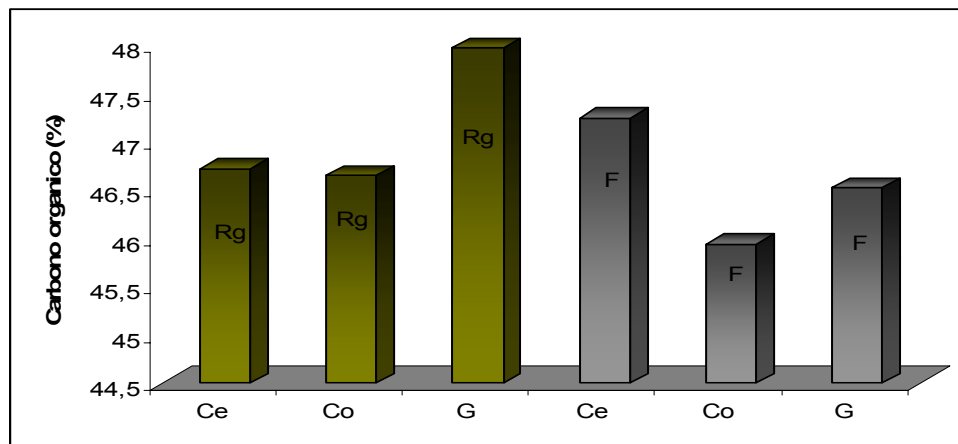


Figura 8. Fracción de carbono en las ramas grandes (Rg) y fuste (F) en los árboles de las especies nativas (guachipelín, cocobolo y cenízaro) en los sistemas silvopastoriles, Cañas, Costa Rica

Para la fracción de carbono en las pasturas se estimó en las dos pasturas *B. brizantha* e *Hyparrhenia rufa* bajo la copa (0.42) o a pleno sol (0.43) encontrándose que los valores más altos fueron para el *B. brizantha* en las dos posiciones y el menor valor fue para *H. rufa* a pleno sol (0.39) (figura 9). Mora (2001) determinó la fracción de carbono para pasturas de kikuyo y de estrella africana tanto a pleno sol como en Sistemas Silvopastoriles o bajo copa. Determinando que para los sistemas Silvopastoriles con kikuyo la fracción de carbono fue 0,373 y para los Sistemas Silvopastoril de estrella africana fue de 0,379; a pleno sol el kikuyo

tuvo 0,387 y el estrella africana de 0,395. Estos datos concuerdan con los reportados en este estudio para la especie *B. brizantha* que se encontró mayores valores de carbono a pleno sol pero difieren de lo encontrado para *H. rufa* el cual presentó un valor superior de fracción de carbono para la pastura a pleno sol.

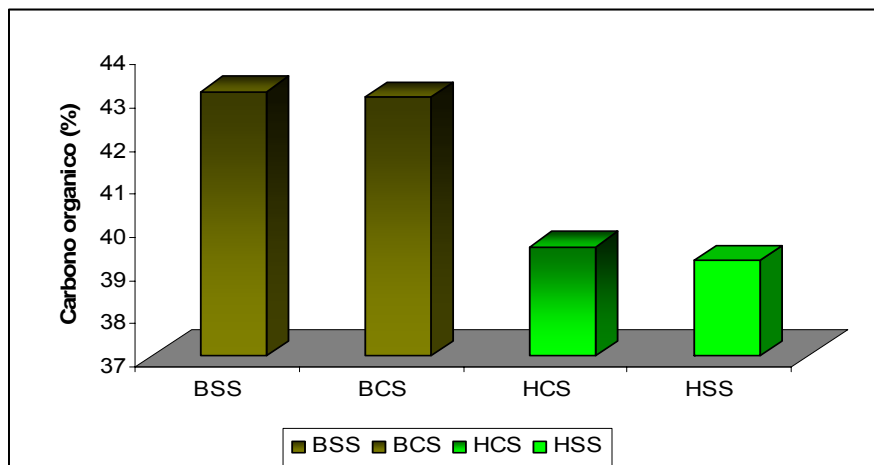


Figura 9. Fracción de carbono en las pasturas ss=sin sombra y cs= con sombra, en sistemas silvopastoriles de Cañas, Costa Rica.

4. 2 Carbono en la pastura

El contenido de carbono en la pastura en la biomasa residual presentó diferencia estadística, encontrándose que el mejor tratamiento fue el de *B. brizantha* asociada con cenízaro (5,8 t C ha⁻¹) y los que presentaron menores valores de almacenamiento de carbono fueron el guachipelín asociado con las dos pastura *H. rufa* (2,3 t C ha⁻¹) y *B. brizantha* (3,3 t C ha⁻¹) (figura 10).

De acuerdo a lo encontrado se puede decir que las pasturas mejoradas almacenan más carbono que las pasturas naturales, ya que en todas los sistemas silvopastoriles el *B. brizantha* asociado fue superior que el *H. rufa* asociado con la misma especie (figura 10); esto confirma lo reportado en estudios realizados en las sabanas de los llanos orientales colombianos donde se notó la superioridad de los sistemas con pasturas mejoradas (*Brachiaria brizantha*, *Panicum maximum*, *Cynodon dactylon*) para el secuestro de C,

respecto a los pastos nativos (*Hyparrhenia ruffa*, *Paspalum notatum* y *Paspalum virgatum*), (Fisher *et al.* 1994, Fisher y Trujillo 1999).

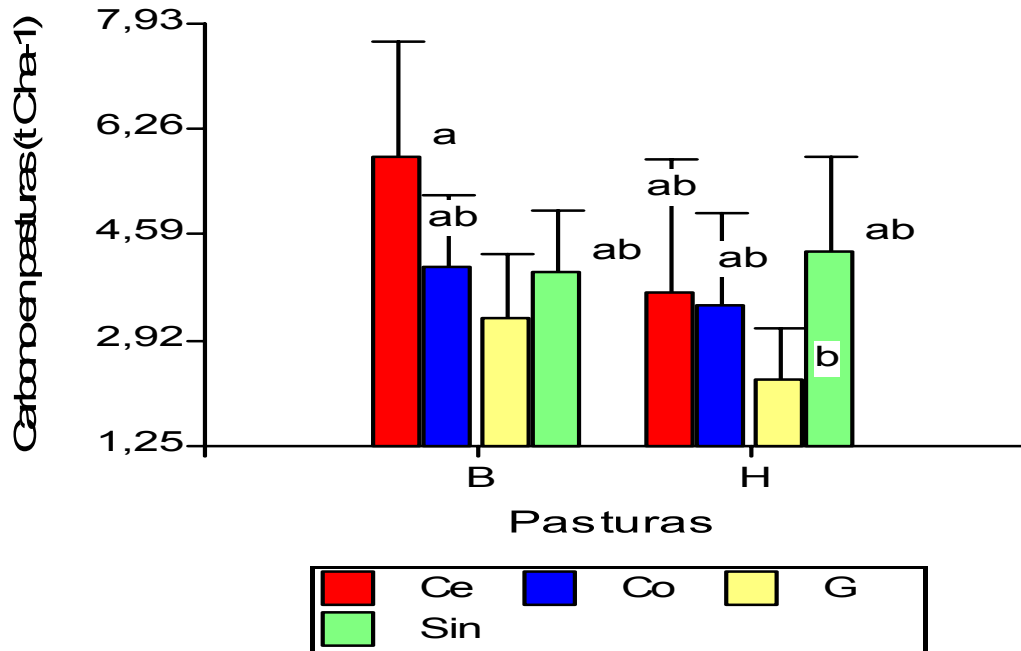


Figura 10. Contenido de carbono total en la biomasa de la pastura residual en los diferentes sistemas silvopastoriles (*Brachiaria*+cenizaro (Bce), *Brachiaria*+cocobolo (BCo), *H. rufa*+cenizaro(HCe),*H. rufa* +cocobolo (HCo),*Brachiaria*+guachipelin(BG),*H. rufa*+guachipelin (HG) en Cañas, Costa Rica.

Los valores reportados en este trabajo fueron superiores a otros estudios similares, debido a la baja carga animal presente y por ende la alta biomasa residual existente dentro de la pastura. Ruiz (2002) reporta para las pasturas mejoradas de 1,6 t C ha⁻¹ y para las pasturas naturales de 1,4 t C ha⁻¹ cuando estas se asociaron con árboles los valores reportados fueron de 2,5 t C ha⁻¹ y de 1,0 t C ha⁻¹, respectivamente. Ramos (2003) encontró para las pasturas en promedio de 1,25 t C ha⁻¹ para el *B. brizantha* en el sistemas de pastura mejorada con árboles y en 0,88 t C ha⁻¹ para la pastura degradada.

Ávila (2000) encontró que el carbono almacenado en la pastura *B. brizantha* asociada con *E. deglupta* fue de 2,5 t C ha⁻¹ y asociada con *A. mangium* fue de 2,1 t C ha⁻¹, para las

pasturas de *B. brizantha* y *Ischaemum indicum* en monocultivo fue de 2 y 0,1 t C ha⁻¹. Buurman *et al.* (2004) afirman que el manejo en las pasturas nativas como el uso de fuego para controlar malezas y estimular rebrotes del pasto contribuye en un incremento en la cantidad de C estable en el suelo, lo cual compensaría parcialmente la mayor cantidad de carbono almacenado por el componente arbóreo en los SSP. Se ha demostrado, que a diferencia de las gramíneas nativas, las gramíneas africanas introducidas con buen manejo en las sabanas de Sudamérica pueden incrementar la materia orgánica de los suelos y por lo tanto, acumular más C en el suelo (Fisher *et al.* 1994, Fischer y Trujillo 1999).

4.3 Carbono en las raíces

En cuanto al contenido de raíces finas, no se encontró diferencia estadística ($p>0,05$) entre los diferentes tratamientos en contenido de carbono en raíces finas totales en el perfil de los 60 cm del suelo. Aunque se encontraron los mayores contenidos de carbono en los tratamientos *Brachiaria* (2,25 t C ha⁻¹) y *Brachiaria* asociado con guachipelín (1,67 t C ha⁻¹) (figura 11).

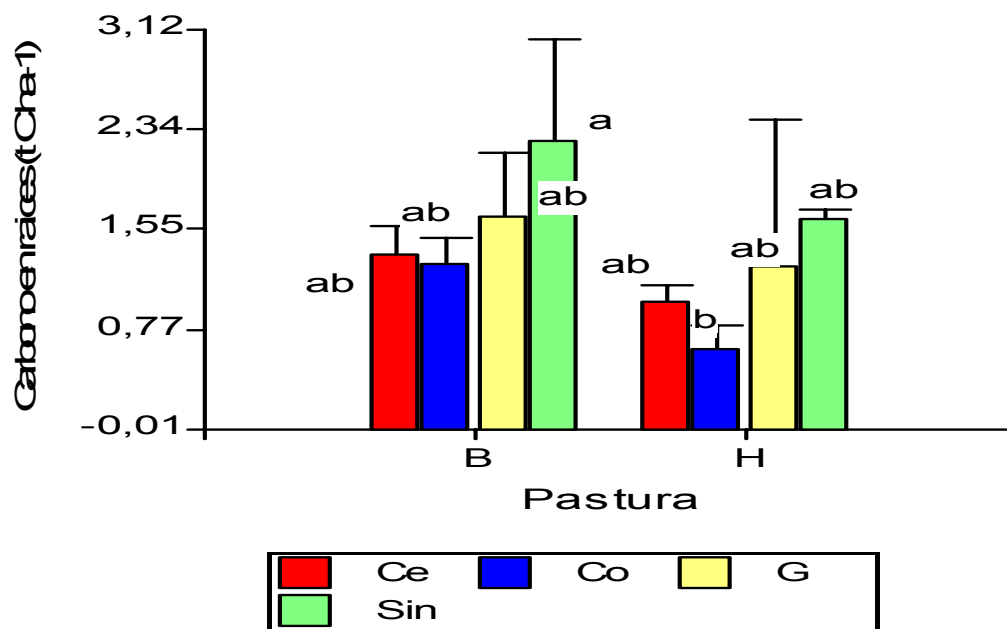


Figura 11. Contenido de carbono en las raíces de los sistemas silvopastoriles (*Brachiaria*+cenízaro (Bce), *Brachiaria*+cocobolo (BCo), *H. rufa*+cenízaro(HCe),*H. rufa*+cocobolo (HCo),*Brachiaria*+guachipelin(BG),*H. rufa*+guachipelín (HG) en Cañas, Costa Rica.

Ramos (2003) encontró diferencias significativas en la presencia de raíces finas de acuerdo a las profundidades encontrando de seis hasta diez veces mayor cantidades de raíces finas en los primeros 20 cm, reportando 1,8 t C ha⁻¹ de raíces finas en las primeros 20 cm, y de 0,68 t C ha⁻¹ y 0,652 t C ha⁻¹ para las profundidades de 20-40 cm y 40-60 cm, respectivamente. Esto se puede deber a que las especies en ecosistemas con limitantes marcadas en este caso disponibilidad de agua concentran su sistemas radicular en los primeros horizontes del suelo (Van Kanten 2003).

Por ello, se separo el contenido de carbono acumulado en raíces en cada uno de las profundidades estudiadas, encontrándose que para los primeros 20 cm si hubo diferencia en el contenido de carbono acumulado en las raíces de los árboles encontrándose que los mejores tratamientos fueron el cenízaro (1,13 t C ha⁻¹) y el guachipelín (0,8 t C ha⁻¹) creciendo en *B. brizantha* y el peor tratamiento fue el de cocobolo creciendo en *H. rufa* (0,23 t C ha⁻¹) (figura 12).

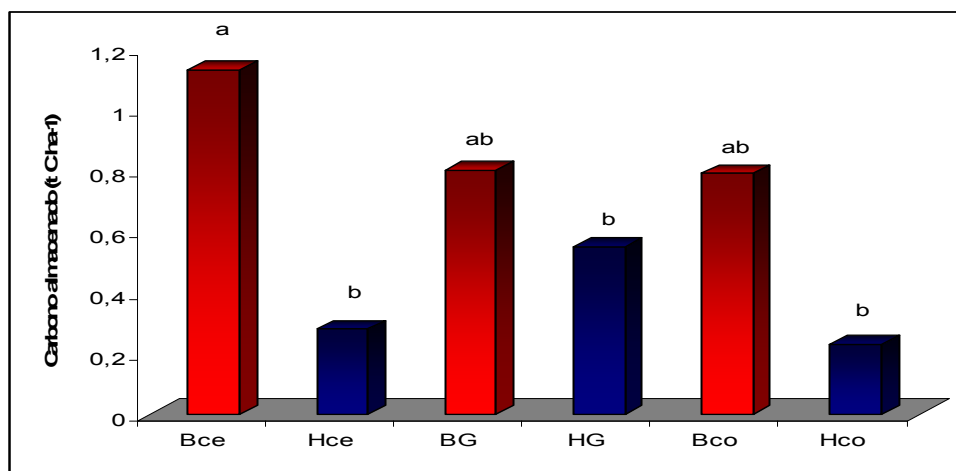


Figura 12. Carbono almacenado en las raíces de los árboles en los primeros 20 cm en los sistemas silvopastoriles (*Brachiaria*+cenízaro (Bce), *Brachiaria*+cocobolo (Bco), *H. rufa*+cenízaro(HCe),*H. rufa* +cocobolo (HCo),*Brachiaria*+guachipelin(BG),*H. rufa*+guachipelin (HG) en Cañas, Costa Rica.

Para el carbono acumulado en raíces de pasturas no se encontró diferencias estadísticas entre tratamientos y solo se reportan los valores superiores en el caso de *B. brizantha*

(1,45 t C ha⁻¹) e *H. rufa* en guachipelín (1,36 t C ha⁻¹) y el de menor fue el de *H. rufa* asociado con cocobolo (0,35 t C ha⁻¹) (figura 13).

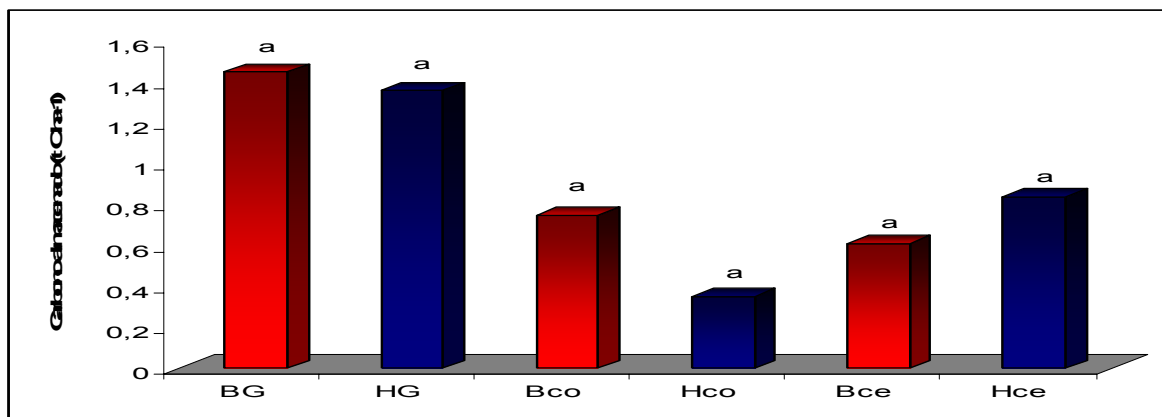


Figura 13. Carbono almacenado en las raíces de las pasturas en los primeros 20 cm en los sistemas silvopastoriles (*Brachiaria*+cenizaro (Bce), *Brachiaria*+cocobolo (Bco), *H. rufa*+cenizaro(HCe),*H. rufa* +cocobolo (HCo),*Brachiaria*+guachipelin(BG),*H. rufa*+guachipelin (HG) en Cañas, Costa Rica.

En el perfil de 20-40 cm para la raíces de los árboles se encontró diferencias ($p < 0,05$) teniendo como el mejor tratamiento para las raíces de los árboles en este perfil al tratamiento de guachipelín en *Brachiaria brizantha* (0,48 t C ha⁻¹) y el de peor comportamiento fue el cenizaro con *H. rufa* (0,18 t C ha⁻¹) (figura 14).

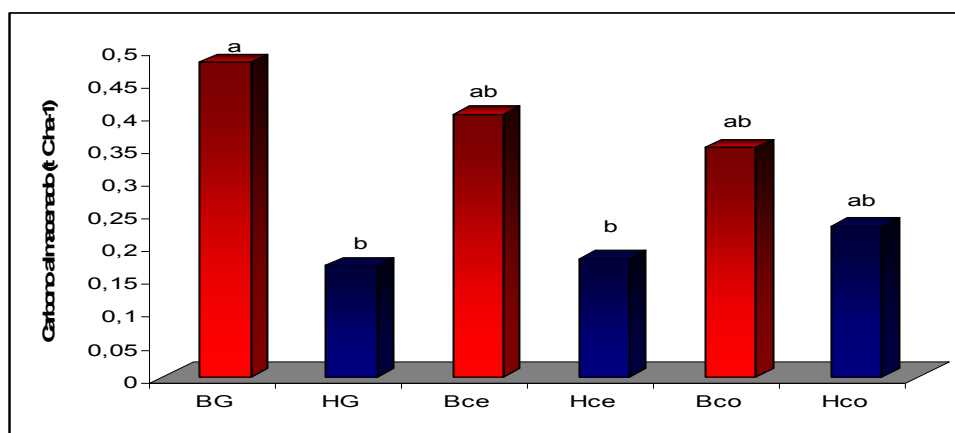


Figura 14. Carbono almacenado en las raíces de los árboles en el perfil 20-40 cm en los sistemas silvopastoriles(*Brachiaria*+cenizaro (Bce), *Brachiaria*+cocobolo (Bco), *H. rufa*+cenizaro(HCe),*H. rufa* +cocobolo (HCo),*Brachiaria*+guachipelin(BG),*H. rufa*+guachipelin (HG) en cañas, Costa Rica.

En este mismo perfil para el contenido de carbono en las raíces de las pasturas se encontró que el mejor tratamiento fue *H. rufa* asociado con cenízaro ($0,34 \text{ t C ha}^{-1}$) y el peor fue la misma pastura asociada con cocobolo ($0,05 \text{ t C ha}^{-1}$) (figura 15).

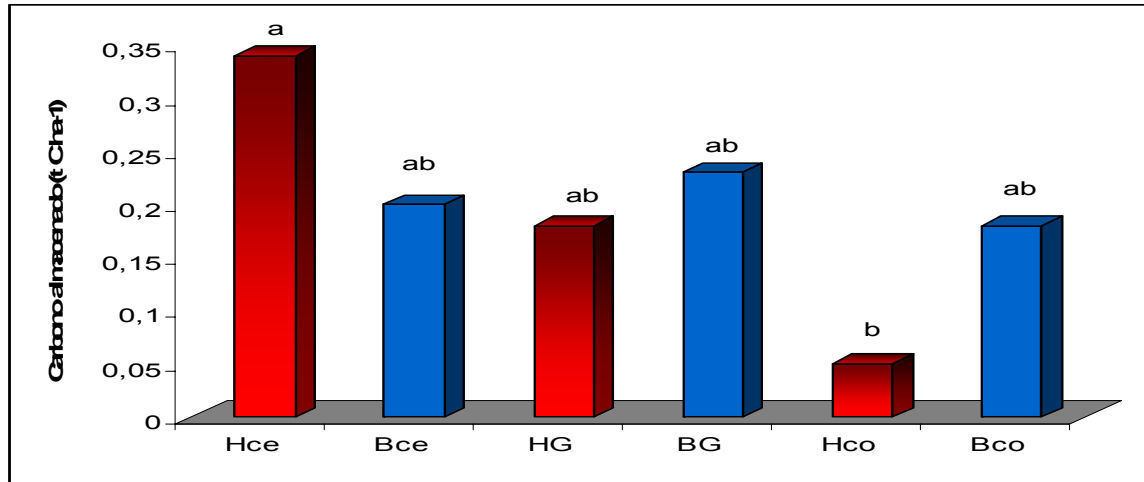


Figura 15. Carbono almacenado en las raíces de las pasturas en el perfil de 20-40cm en los sistemas silvopastoriles (*Brachiaria*+cenízaro (Bce), *Brachiaria*+cocobolo (Bco), *H. rufa*+cenízaro(HCe),*H. rufa* +cocobolo (HCo),*Brachiaria*+guachipelin(BG),*H. rufa*+guachipelin (HG) en Cañas, Costa Rica.

En el perfil de 40-60cm se encontró que hubo diferencias significativas ($p < 0,05$) para el contenido de carbono en las raíces de los árboles siendo el mejor tratamiento el de guachipelín asociado con *B. brizantha* ($0,21 \text{ t C ha}^{-1}$) y el peor el de cenízaro asociado con *H. rufa* ($0,06 \text{ t C ha}^{-1}$). Se puede notar la alta competitividad que tiene la especie guachipelín en condiciones adversas ya que es la especie que presenta la mayor cantidad de raíces en horizontes profundos en búsqueda no solo de nutrientes sino posiblemente de agua en regiones deficitarias de este recurso como es el caso de Cañas (figura 16).

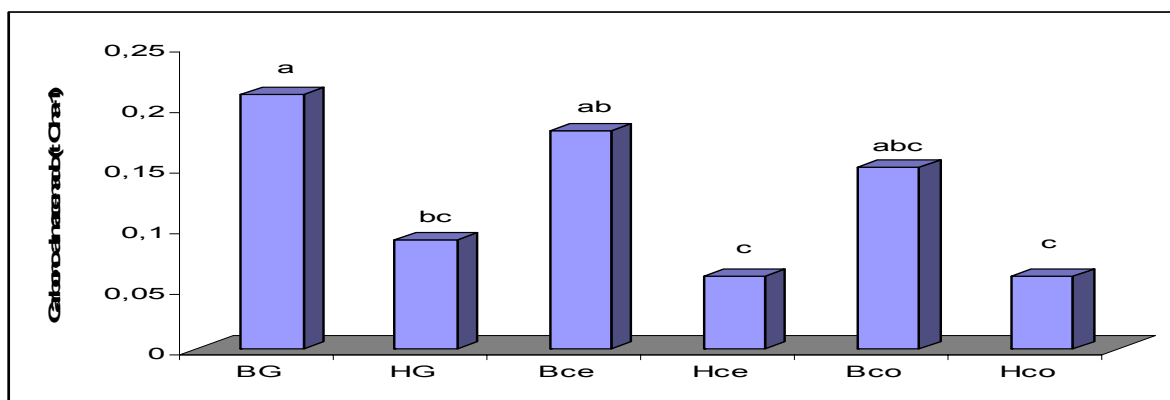


Figura 16. Carbono almacenado en la raíces de los árboles a la profundidad de 40-60 en los sistemas silvopastoriles (Brachiaria+cenizaro (Bce), Brachiaria+cocobolo (Bco), H. rufa+cenizaro(HCe), H. rufa +cocobolo (HCo), Brachiaria+guachipelin(BG), H. rufa+guachipelin (HG) en Cañas, Costa Rica.

En cuanto al contenido de carbono en las raíces de pasturas no se encontró diferencias en tratamientos ($p < 0,05$) y los valores encontrados son bastantes bajos, por tanto se puede inducir de esto que hay poca competencia por recursos en este perfil entre las pasturas y las raíces de los árboles (figura 17).

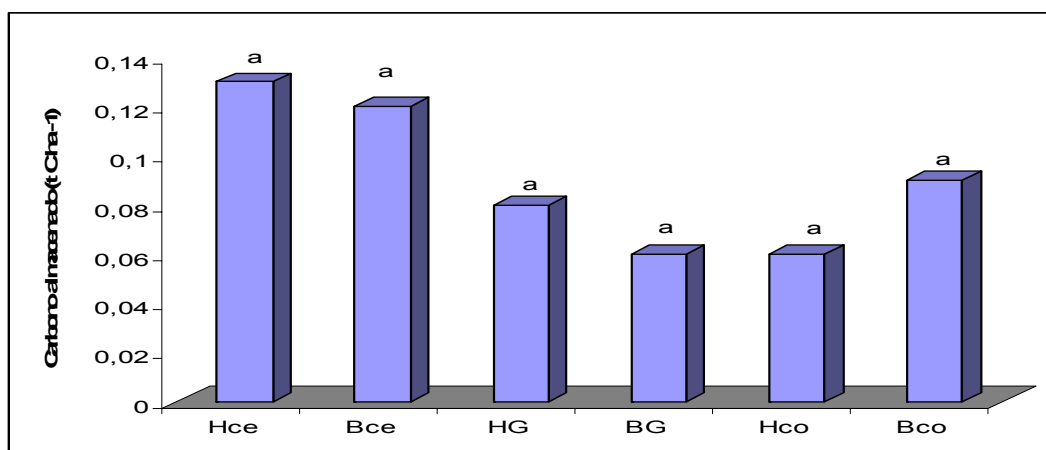


Figura 17. Carbono almacenado en las raíces de las pasturas (B. brizantha y H. rufa) en el perfil 40-60 en sistemas silvopastoriles (Brachiaria+cenizaro (Bce), Brachiaria+cocobolo (Bco), H. rufa+cenizaro(HCe), H. rufa +cocobolo (HCo), Brachiaria+guachipelin(BG), H. rufa+guachipelin (HG) en Cañas, Costa Rica.

En conclusión se puede decir que la profundidad donde se encontró mayor acumulación de raíces en los árboles y pasturas fue en los primeros 20 cm, teniendo los mismos resultados que Dhyaani y Tripathi (2000), los cuales determinaron que el 70% de toda la biomasa radicular (incluyendo biomasa fina y gruesas) estaba localizada en los primeros 20 cm en un cultivo en callejones del noreste de India, donde las condiciones de poca precipitación hacen pensar que hay competencia por recursos entre las especies arbóreas y las pasturas.

Además, se ha establecido la importancia de las raíces en el almacenamiento de carbono a través de diversos estudios: Young (1997) afirma que en sistemas agroforestales las raíces comprenden hasta el 30% de la biomasa total del árbol, y por ello es importante su determinación como reservorio de C debajo del suelo. Oelbermann *et al.* (2002) determinaron que la capacidad de acumular carbono en las raíces se incrementa con la edad, representando un sumidero de C de importancia a largo plazo. Kaur *et al.* (2002) reportan que los sistemas silvopastoriles con pobre rendimiento fueron los que tuvieron menor porcentaje de raíces finas para el caso del estudio desarrollado en la India.

4.4 Carbono en el suelo

Se evaluó el carbono total en el suelo, encontrándose que no existían diferencias significativas ($p > 0.05$) en el carbono orgánico en el suelo para los diferentes sistemas silvopastoriles evaluados. El mayor contenido de carbono orgánico total se obtuvo en el cenízaro ($121,7 \text{ t C ha}^{-1}$) y el guachipelín ($121, 2 \text{ t C ha}^{-1}$) asociados con *B. brizantha* y el menor fue la pastura de *B. brizantha* en monocultivo ($87,73 \text{ t C ha}^{-1}$) (figura 18).

En estudios similares como el realizado en la zona de Cartago, Costa Rica, Mora (2001) pudo observar que en pastura como el kikuyo con árboles y sin árboles presentan similares niveles de carbono almacenado, debido en este caso a la poca agresividad de la pastura. Ruiz (2002), en un trabajo realizado en Nicaragua, encontró valores superiores al de este estudio ya que en pasturas naturales en monocultivo el carbono almacenado en el suelo fue de 150 t C ha^{-1} , en las pasturas mejoradas de 158 t C ha^{-1} , en las pasturas naturales con árboles de 155 t C ha^{-1} y en las pasturas mejoradas con árboles de 55 t C ha^{-1} , aunque

también no encontró significancia para los diferentes sistemas para el carbono almacenado en el suelo.

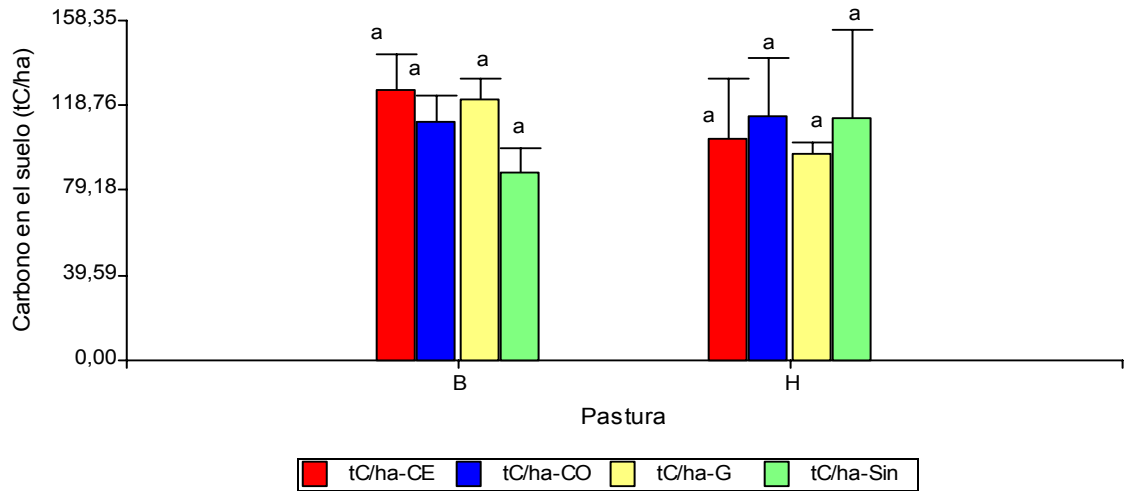


Figura 18. Carbono total en el suelo en los sistemas silvopastoriles (*Brachiaria*+cenizaro (Bce), *Brachiaria*+cocobolo (BCo), *H. rufa*+cenizaro (HCe), *H. rufa* +cocobolo (HCo), *Brachiaria*+guachipelin (BG), *H. rufa*+guachipelin (HG) en cañas, Costa Rica.

En otros estudios reportan valores inferiores a los encontrados en Cañas; por ejemplo, Ávila (2000) reporta contenidos de carbono orgánico en asociación de pasturas mejoradas de *B. brizantha* con *A. mangium* (tres años) y de *B. brizantha* con *E. deglupta* (tres años) de 86,57 t C ha⁻¹ y 87,30 t C ha⁻¹, respectivamente. En los monocultivos de pasturas de 66,24 t C ha⁻¹ para *B. brizantha* y de 84,19 t C ha⁻¹ para *Ischaemum indicum*, mostrando el efecto de la incorporación de los árboles en los sistemas. Fisher y Trujillo (1999) encontraron resultados similares de 64 t C ha⁻¹ y 65 t C ha⁻¹ para pasturas nativas y mejoradas, respectivamente, en los Llanos orientales de Colombia.

La profundidad influyó significativamente ($p < 0.05$) sobre el contenido de carbono orgánico encontrándose mayor en los primeros 20 cm en todos los sistemas evaluados, en promedio representa el 55% del carbono total en este compartimiento, y las profundidades de 20-40 y 40-60 el 24,7% y el 19,7%, respectivamente (figura 19). Mora (2001) encontró que el almacenamiento del carbono aumentaba a medida que se profundizaba en el perfil, resultado diferente a lo encontrado por López (1998), Ramos

(2003) y en este estudio, en los cuales el nivel de carbono en el suelo disminuye a medida que se profundiza en el suelo.

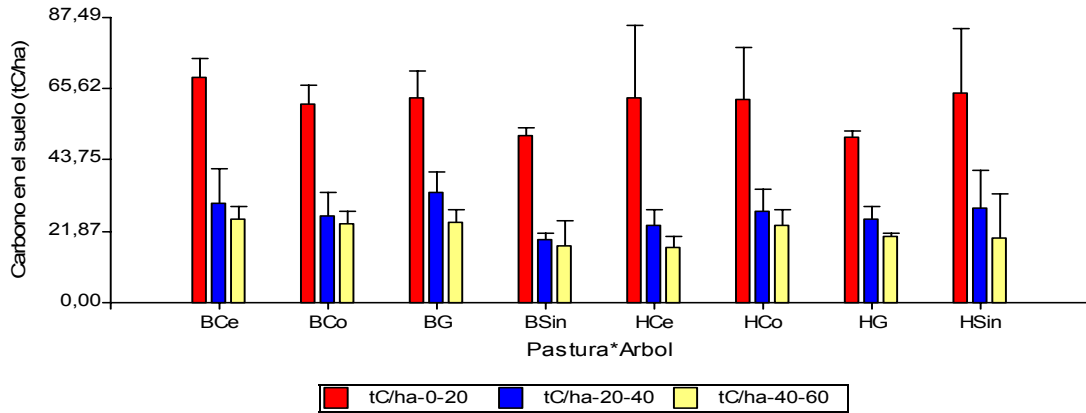


Figura 19. Carbono orgánico en el suelo a diferentes profundidades en sistemas silvopastoriles en Cañas, Costa Rica.

Ramos (2003) reporta para la pastura mejorada con árboles un contenido de 64,44 t C ha⁻¹ y para la pastura degradada de 63,11 t C ha⁻¹, siendo superiores que para el bosque secundario 41,41 t C ha⁻¹ en la profundidad de 0-20 cm. De acuerdo a Ramos (2003) el comportamiento del carbono orgánico total tiene el mismo comportamiento de la biomasa de raíces finas que disminuye a medida que se va profundizando en el perfil del suelo, debido a la constante incorporación de raíces finas al suelo, reportando que el 45% del carbono orgánico se encuentra presente en los primeros 20 cm y el 55% restantes en la capa de 20-80 cm. Además, la materia orgánica particulada o fracción lenta es mayor en los primeros 20 cm, al ser comparada con las otras tres profundidades estudiadas.

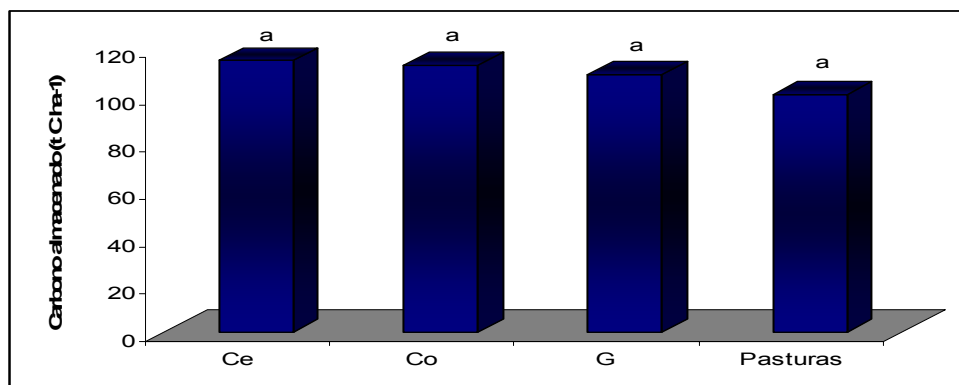


Figura 20. Carbono almacenado en el suelo bajo los sistemas silvopastoriles en Cañas, Costa Rica.

Debido a que los cambios en el carbono total son imperceptibles en un periodo relativamente corto de tiempo como es el periodo que llevan de establecidos los sistemas silvopastoriles, se fraccio la materia orgánica en materia orgánica particulada (POM) o fracción gruesa y en fracción ligera o asociada a la fracción de limo-arcilla, en este estudio se encontró que para el carbono orgánico en la fracción gruesa no se encontró diferencias significativas ($p>0.05$) para los sistemas silvopastoriles en los primeros 20 cm del suelo que es donde se notan los cambios por cambios de manejo en el suelo (figura 21).

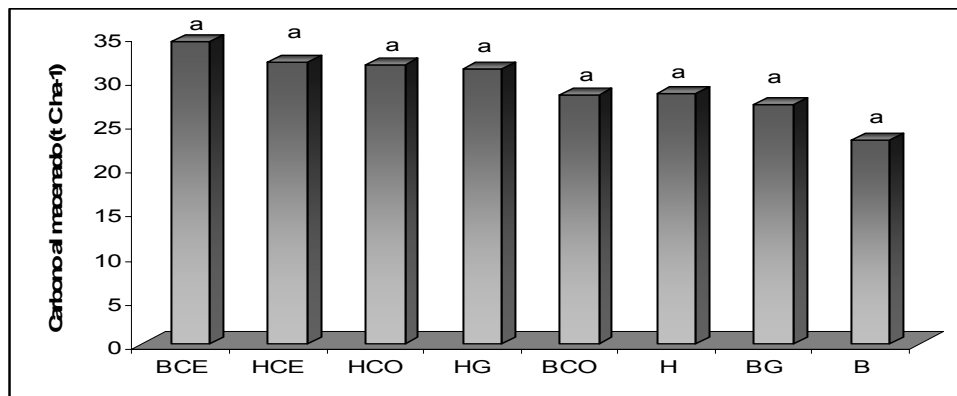


Figura 21. Carbono orgánico en la fracción gruesa a la profundidad de 20 cm en los sistemas silvopastoriles (*Brachiaria*+cenizaro (Bce), *Brachiaria*+cocobolo (BCo), *H. rufa*+cenizaro(HCe), *H. rufa* +cocobolo (HCo), *Brachiaria*+guachipelin(BG), *H. rufa*+guachipelin (HG) en Cañas, Costa Rica.

Según Cambardella y Elliot (1993) los cambios y respuestas al cambio de uso del suelo son descritos por la materia orgánica particulada (POM) o fracción gruesa. Por ello Hassink (1997) relaciono las fracciones de SOM y la textura, encontrando que existe una relación de C asociado a las partículas del suelo mineral (arcilla+limo) y a la textura del suelo, si bien no es marcada la relación entre textura y contenido de carbono en la fracción de arena (POM), el asocio la capacidad de preservar carbono en un suelo a su asociación con la parte mineral (limo y arcilla). Janzen *et al.* (1992) debido a esto sugieren que la fracción ligera y el POM son buenos indicadores de materia orgánica lábil y por tanto son muy sensibles al manejo.

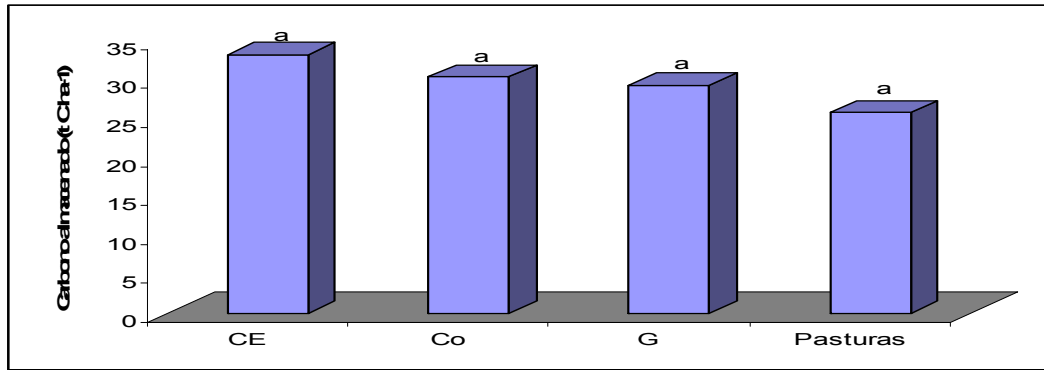


Figura 22. Carbono almacenado en la fracción gruesa a la profundidad de 0-20 cm en los ssp (*Brachiaria*+cenizaro (Bce), *Brachiaria*+cocobolo (BCo), *H. rufa*+cenizaro(HCe),*H. rufa* +cocobolo (HCo),*Brachiaria*+guachipelin(BG),*H. rufa*+guachipelin (HG) en Cañas, Costa Rica.

En la figura 22 se compara el contenido de carbono en la fracción gruesa entre los sistemas de pasturas en monocultivo con los sistemas con árboles encontrándose que aunque no existen diferencias estadísticas ($p > 0,05$) sí es mayor el contenido de carbono en esta fracción, para los sistemas con árboles en relación a las pasturas en monocultivo, la diferencia no es mayor debido posiblemente al poco tiempo de establecido los sistemas.

En estudios comparativos entre sistemas de ganadería extensiva e intensiva Conant *et al.* (2003) encontraron que el carbono asociado a la fracción mineral o fracción gruesa tiende a ser más bajo en sistemas altamente intensivo en este caso se puede indicar en sistemas de ganadería intensivo se califican aquellos donde solo se incluye el componente pastura en el sistema. Debido a esto, en sistemas extensivos el carbono orgánico en los primeros 20 cm es mayor que en los sistemas menos intensivos (Six *et al.* 2002).

Otros factores son también importantes; Veldkamp (1993) menciona que el tipo de suelo tiene implicaciones directas sobre la capacidad de retener carbono en el suelo, ya que los suelos volcánicos (andisoles) tienen una gran capacidad para retener carbono, debido a los complejos amorfos que forman en el matriz del suelo. Da Silva *et al.*

(2004) sugieren que existe una fuerte correlación entre la producción de biomasa y el carbono total en el suelo, demostrando que la acumulación de carbono es altamente dependiente de la producción de biomasa.

La textura también juega un papel importante, ya que las fracciones de arcilla y limo influyen sobre los reservorios de carbono en un suelo (Buurman et al. 2003). Hassink (1997) encontró que dada una fertilidad específica y condiciones de manejo, los contenidos combinados de limo y arcilla determinan la máxima capacidad de un suelo para almacenar carbono orgánico. Uno de los problemas de comparar reservorios de carbono en los suelos bajo diferentes manejos es que el manejo afecta la densidad aparente del suelo también como su contenido de C. El manejo puede afectar el contenido de carbono la adición de fertilizante (mejoramiento de la productividad primaria neta), el manejo del cultivo (uso de pasturas de raíz profunda o asociación de leguminosas-pasturas) y el control de la carga animal (Da Silva et al. 2004).

4.5 Carbono total en los sistemas

Aunque no se encontró diferencia significativa entre los sistemas con las diferentes especies nativas ($p > 0.05$) se puede decir que los tratamientos de *Brachiaria brizantha* con cenízaro y de *B. brizantha* con guachipelín fueron los que almacenaron más carbono y el que menos almacenó fue la pastura *Brachiaria* en monocultivo (Cuadro 3).

Debido a que en sistemas silvopastoriles la mayor parte del carbono se encuentra almacenado en el suelo, Ruiz (2002) reporta valores de 90% del carbono en los SSP en el suelo y López (1998) menciona que en los SSP de *P. maximum* con *C. alliodora* se almacena 86% del C en este compartimento, un resultado semejante a lo encontrado en el presente estudio; en consecuencia, el contenido de carbono en el suelo fue el que más influyó en los resultados de carbono almacenado en los sistemas.

Cuadro 3. Carbono total almacenado en los sistemas silvopastoriles en Cañas, Costa Rica.

Sistema	Carbono bajo el suelo (t C ha ⁻¹)		Carbono arriba del suelo (t C ha ⁻¹)		Carbono Total
	Suelo	Raíces	Biomasa árbol	Biomasa pastura	
<i>B. brizantha</i> + Guachipelin	121,2±9,6	1,67±0,5	4,04±1,8	3,26±1,01	130,17±9,0a
<i>B. brizantha</i> + Cocobolo	111,4±11,5	1,3±0,2	1,6±0,5	4,1±1,1	118,45±10,8a
<i>B. brizantha</i> + Cenizaro	125,6±17,0	1,36±0,2	0,32±0,2	5,8±1,8	133,18±17,3a
<i>H. rufa</i> +Guachipelín	96,5±5,32	1,26±1,15	4,39±2,3	2,32±0,8	104,4±2,6a
<i>H. rufa</i> +Cocobolo	114,08±26,87	0,62±0,2	0,55±0,26	3,46±1,46	118,7±28,0a
<i>H. rufa</i> +cenizaro	103,43±27,8	0,99±0,12	0,91±0,28	3,67±2,1	109,0±28,6a
<i>B. brizantha</i>	87,73±11,3	2,25±0,8		4,01±0,97	93,9±11,4a
<i>H. rufa</i>	113,2±41	1,64±0,08		4,31±1,52	119,18±42,4a

¹·Columnas con letras similares no son diferentes estadísticamente

Los resultados encontrados en este estudio son más bajos que los reportados por Ruiz (2002) encontró que para las pasturas naturales en monocultivo el carbono total fue de 151 t C ha⁻¹, pasturas mejoradas en monocultivo de 159 t C ha⁻¹, las pasturas naturales con árboles fue de 164 t C ha⁻¹ y para las pasturas mejoradas con árboles de 170 t C ha⁻¹. Resultados similares presenta Ramos (2003) en la zona de Esparza donde en la pastura mejorada con árboles fue de 173,09 t C ha⁻¹ y fueron superiores a las pasturas degradadas con 134,7 t C ha⁻¹.

Ávila (2000) reporto que el carbono total en los sistemas silvopastoriles fue mayor (95 t C ha⁻¹) comparado con las pasturas solas (68,2 t C ha⁻¹) para *B. brizantha* y 84,3 t C ha⁻¹ para *Ischaemum indicum*. Villanueva *et al.* (2002) encontraron que el sistema con mayor almacenamiento de carbono fue el kikuyo con *A. acuminata* de 4 años y el menor fue para el monocultivo de kikuyo con 184,5 t C ha⁻¹.

4.6 Fijación de carbono

Las tasas de fijación encontradas fueron de 0,15 t C ha⁻¹ año⁻¹ para el cenízaro, 0,27 t C ha⁻¹ año⁻¹ para el cocobolo y 1,05 t C ha⁻¹ año⁻¹ para el guachipelín. Andrade (1999) encontró tasas de fijación de carbono de 1,75 t C ha⁻¹ año⁻¹ y 1,8 t C ha⁻¹ año⁻¹ para *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* con una densidad de plantación de 370 árboles ha⁻¹. La tasa de fijación encontrada para el sistema silvopastoril *B. brizantha*-*E. deglupta* fue de 1,80 t C ha⁻¹ año⁻¹ y para el sistema de *B. brizantha* – *Acacia mangium* fue de 2,20 t C ha⁻¹ año⁻¹ con densidades de árboles de 377 árboles ha⁻¹ y la edad de las plantaciones de 3 años (Ávila 2000). Para las mismas edades, la tasa de fijación fue de 0,5; 1,4 y 1,5 t ha⁻¹año⁻¹. 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 *et al.* 2002).

4.7 Nitrógeno total

Se encontró diferencia ($p < 0,05$) en cuanto al nitrógeno total almacenado en el suelo en los sistemas silvopastoriles teniéndose como el mejor tratamiento la asociación *B. brizantha* +guachipelín y el de menor contenido de nitrógeno el de la pastura en monocultivo de *B. brizantha*.

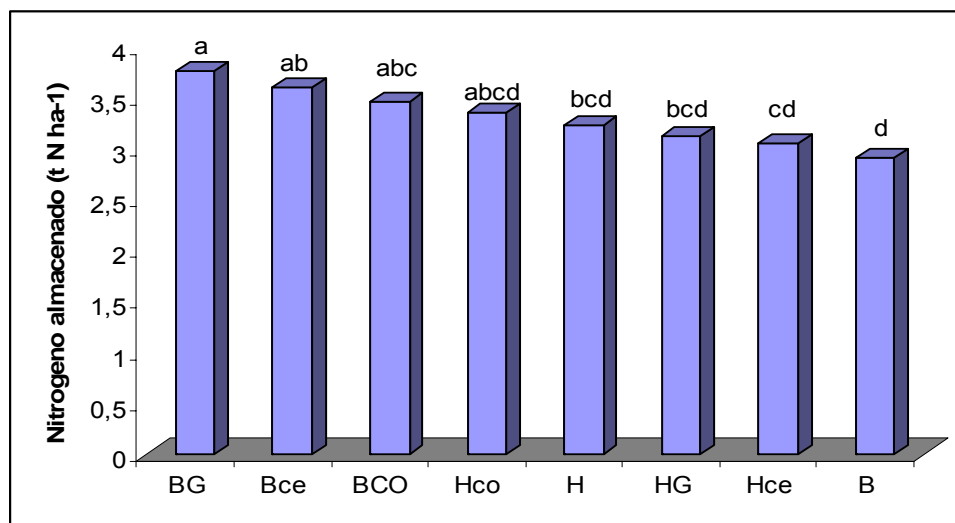


Figura 23. Contenido de nitrógeno en los sistemas silvopastoriles (*Brachiaria*+cenízaro (Bce), *Brachiaria*+cocobolo (BCo), *H. rufa*+cenízaro(HCe),*H. rufa* +cocobolo (HCo),*Brachiaria*+guachipelin(BG),*H. rufa*+guachipelin (HG) en Cañas, Costa Rica.

Esto concuerda con los trabajos realizados por Villanueva *et al.* (2002) reportan una relación positiva en la concentración de N en el suelo y el secuestro de carbono. En los sistemas silvopastoriles investigados encontraron concentraciones de nitrógeno de 0,17 a 0,37% mayores que en las pasturas en monocultivo. Un comportamiento similar fue encontrado en el estudio de Bolívar (1998) la cual reportó valores superiores de nitrógeno en un sistema silvopastoril *Acacia mangium* y *Brachiaria humidicola* al compararlos con las pasturas en monocultivo.

4.8 Transpiración

Al analizar el consumo de agua de las especies nativas a través de la transpiración se presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre las especies, obteniéndose que el guachipelín tiene un consumo cinco y seis veces mayor comparado con las otras dos especies nativas: cocobolo y cenízaro, respectivamente (figura 24).

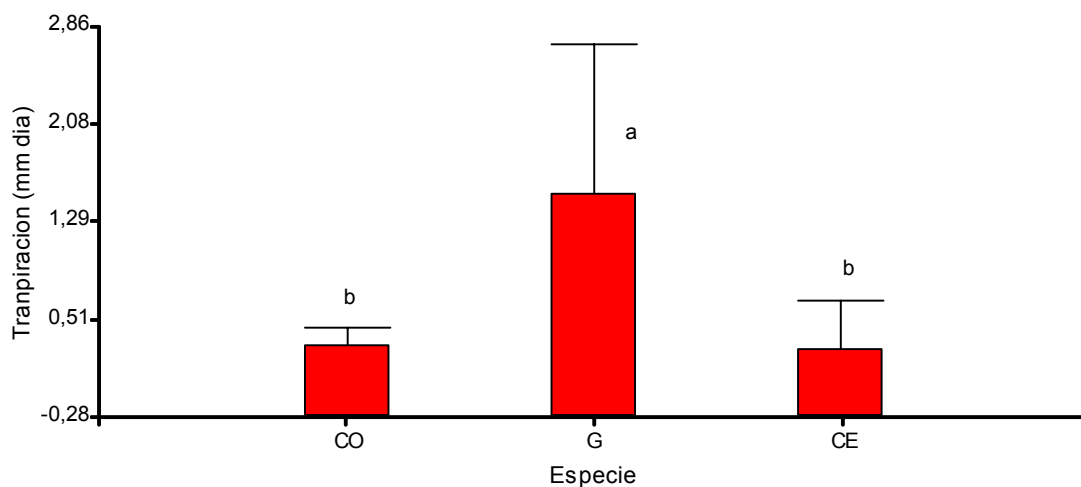


Figura 24. Promedio de la transpiración de las especies nativas (guachipelín (G), cocobolo (Co) y cenízaro (Ce)).

En cuanto al consumo de agua por especie y por época se presentaron diferencias encontrándose que el guachipelín es la especie que presenta las mas altas tasas de

transpiración en las dos épocas estudiadas ($p < 0.05$) y el cenízaro en la época seca es el que presenta la menor tasa de transpiración (Figura 25).

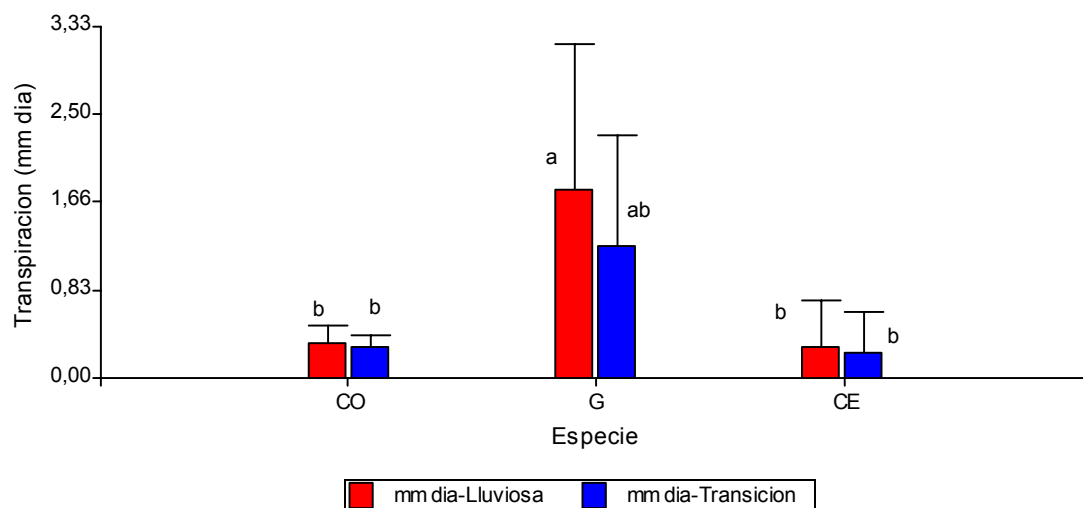


Figura 25. Transpiración de las especies nativas en las dos épocas evaluadas (transición época seca a lluviosa y época lluviosa).

Al evaluar cual es el consumo de agua de las especies nativas asociadas a las dos pasturas se encontró diferencias significativas ($p < 0,050$) teniendo al guachipelín asociada a *Brachiaria brizantha* como la especie que tiene las tasas mas altas de transpiración y al cenízaro asociado a la misma pastura con las tasas menores (figura 26)

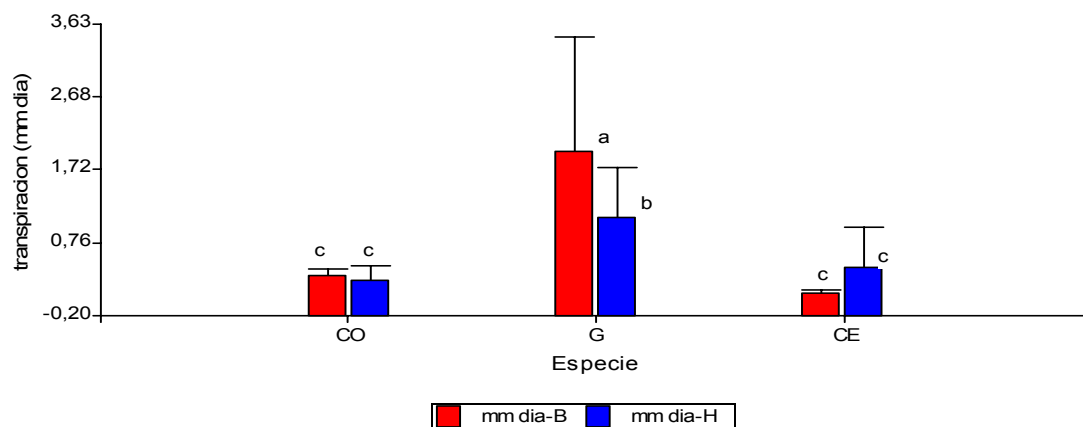


Figura 26. Transpiración de las especies nativas asociadas (guachipelín, cocobolo y cenízaro) en dos pasturas *H. rufa* (H) y *B. brizantha* (B).

Los resultados obtenidos para el consumo de agua por estas especies nativas fueron inferiores a los reportados por Kantén (2003) para las especies *Eucalyptus deglupta* ($16.4-32.4\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{día}^{-1}$), *Terminalia ivorensis* ($13-32,94\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{día}^{-1}$) y *Erythrina poeppigiana* ($17.4-29.94\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{día}^{-1}$) teniendo en cuenta que los árboles en este estudio eran de mayor edad y de mayores diámetros.

Al analizar el comportamiento en el consumo de agua de las especies nativas a lo largo del día y asociado a las dos pasturas, se puede observar en la figura 27 que el guachipelín asociado con *B. brizantha* es el que hace el mayor consumo de agua y especialmente en horas de la tarde, el cenízaro mantiene el consumo constante a lo largo del día y el cocobolo es el que tiene un menor consumo y al igual que el anterior se mantiene constante. Especies con similares características pueden alcanzar su máxima capacidad de flujo de savia o transpiración a diferentes horas del día debido a diferencia en la capacidad de almacenamiento de agua, la forma de la corona y de la hoja y los requerimientos fotosintéticos (Menzer *et al.* 2001).

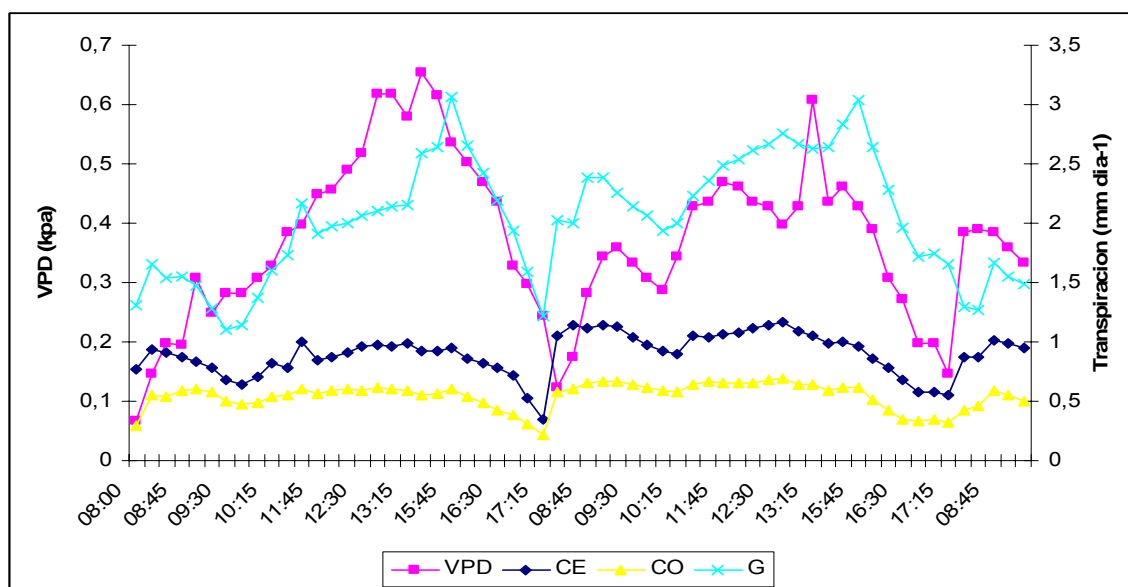


Figura 27. Comportamiento de la transpiración de las especies nativas (guachipelín (G), cocobolo (Co) y cenízaro (Ce) asociados a *Brachiaria brizantha*.

En la figura 28 se puede observar que al igual que en la asociación anterior el guachipelín es la especie que presenta el mayor consumo de agua y lo hace en horas de la mañana, el cocobolo es el segundo en consumo y lo hace de manera constante a través del día, el menor consumo lo tiene el cenízaro cuyo consumo es bajo y se mantiene constante a lo largo del día.

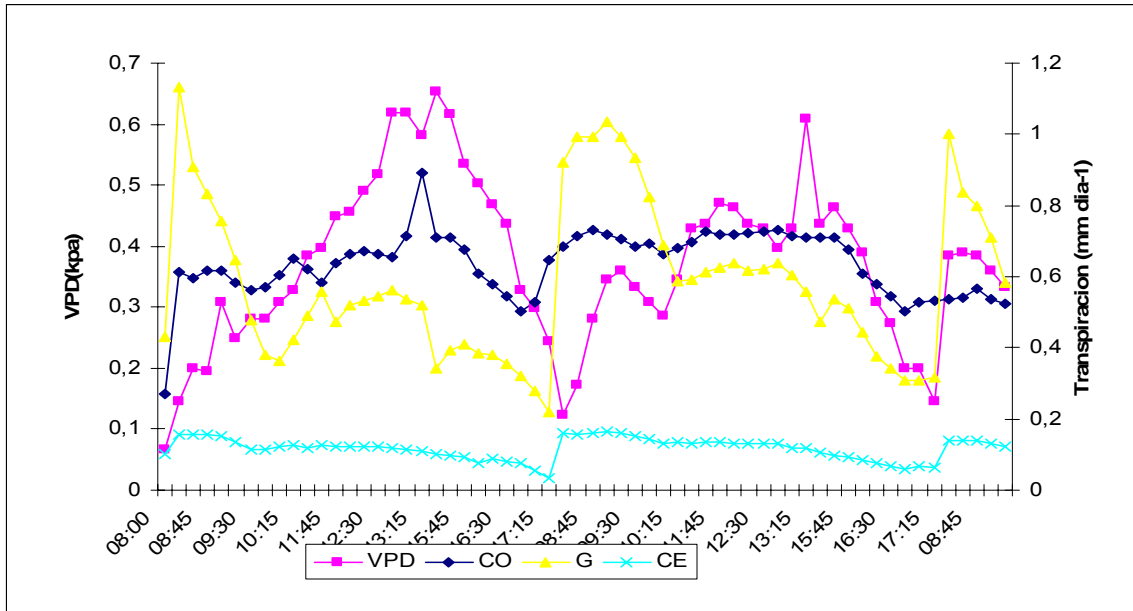


Figura 28. Comportamiento de la transpiración de las especies nativas (guachipelín (G), cocobolo (Co) y cenízaro (Ce) asociadas con *H. rufa*.

Existe una relación entre el consumo de agua y el contenido de raíces de árboles a la profundidad de 40-60 cm encontrándose que los árboles asociados a pasturas con mayores contenidos de biomasa de raíces en este estrato, son las de mayor consumo.

4.9 Eficiencia de uso de agua

No se encontró diferencias significativas ($p > 0,050$) para los diferentes sistemas en cuanto a la eficiencia del uso del agua (figura 29). Se tuvo en cuenta este factor porque las características que tengan las distintas especies nativas pueden afectar sus capacidades de regeneración natural o de establecimiento en sitios con escasez de agua, como es el caso de Cañas que se encuentra en la zona de vida del Bosque Seco Tropical (D'alessandro *et al* 2005). Al evaluar este parámetro nos encontramos que las

especies que tengan valores de eficiencia de uso de agua altos tienen la capacidad de prevalecer en sitios secos (Whitehead y Beadle 2004).

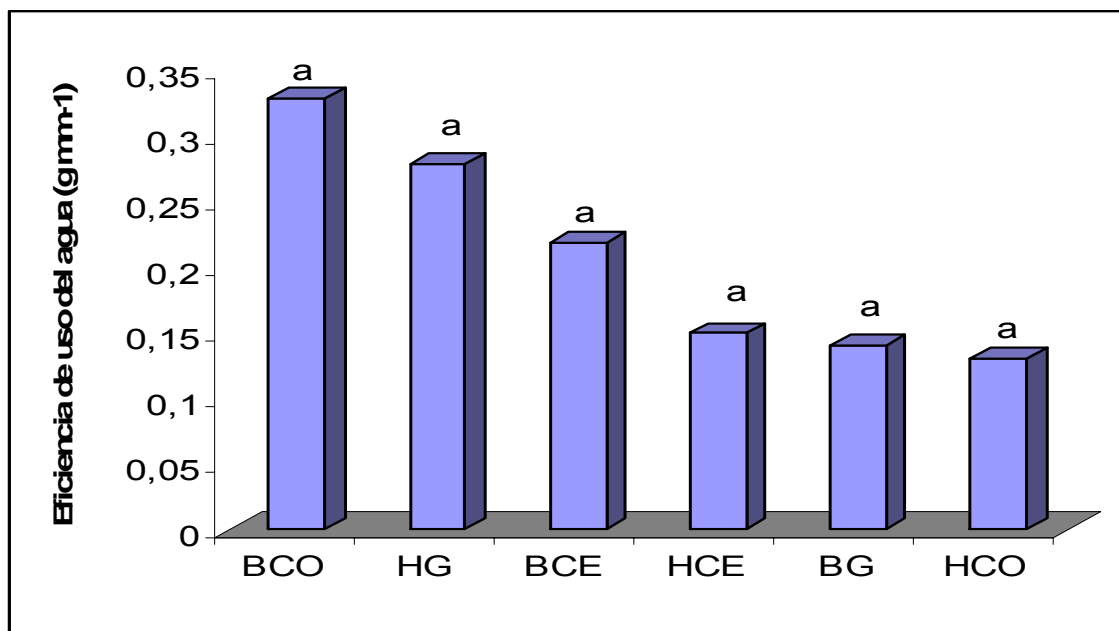


Figura 29. Eficiencia de uso de agua para las especies maderables nativas (Guachipelín, cocobolo y cenízaro) asociadas a las dos pasturas (*B. brizantha* y *H. rufa*)

Se ha encontrado en el *Eucalypto* valores de eficiencia de uso de 5 g de materia seca por kg de agua o como en el caso de *Eucalyptus grandis* de 1,9 g mm⁻¹ para plantación de 50 años y de 0,8 g mm⁻¹ para plantaciones de 230 años (Whitehead y Beadle 2004).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Los sistemas silvopastoriles no presentaron diferencias en cuanto al almacenamiento de carbono total en el sistema, pero si se presentaron diferencias en algunos de los componentes de los mismos:

1. La especie que presento mayor almacenamiento de carbono en la biomasa arriba del suelo fue el guachipelín ($4,39 \text{ t C ha}^{-1}$) y la de menor acumulación fue el cenízaro.
2. La acumulación de carbono en las raíces fue mayor en los primeros 20cm del suelo siendo mayor en las raíces de los árboles: cenízaro ($1,13 \text{ t C ha}^{-1}$) y guachipelín ($0,8 \text{ t C ha}^{-1}$) ambos asociados con *B. brizantha* y para raíces de las pasturas la mayor acumulación de carbono se presento en *B. brizantha* asociado con guachipelín ($1,45 \text{ t C ha}^{-1}$).
3. El mayor almacenamiento de carbono en las pasturas se encontró en *B. brizantha* asociado con cenízaro ($5,8 \text{ t C ha}^{-1}$) mostrando la eficiencia de las pasturas mejoradas en la producción de biomasa.

Para el almacenamiento de carbono en el suelo hubo diferencias en cuanto a profundidades encontrándose que en los primeros 20 cm se acumula el 55% del carbono. Aunque no se presentaron diferencias estadísticas en carbono en la fracción gruesa se presentaron mayores valores en los tratamientos con árboles mostrando los beneficios de la incorporación de estos a los sistemas.

La especie mas competitiva por el recurso agua es el guachipelín con un consumo de $1,5 \text{ mm día}^{-1}$ en cualquiera de las dos pasturas y la de menor consumo de agua fue el cenízaro con $0,27 \text{ mm día}^{-1}$. Lo anterior demuestra que la selección de la especie es importante para el establecimiento de los sistemas silvopastoriles en cuanto al requerimiento del recurso agua, por ello, en zonas del trópico seco el éxito de los sistemas silvopastoriles depende de la especie seleccionada y de la pastura a la cual se asocie.

Para el parámetro eficiencia de uso de agua no se encontraron diferencias entre los diferentes tratamientos evaluados, por ello se puede recomendar para la zona de Cañas la asociaciones de *Brachiaria* + Cocobolo e *Hypharrenia* + Guachipelín que fueron las de mayor valor absoluto en cuanto este parámetro.

5.2 Recomendaciones

Es importante evaluar posteriormente en estos ensayos la fracciones de carbono especialmente la fracción gruesa, ya que el poco tiempo de establecido los ensayos no se puede observar la magnitud de los beneficios en la acumulación de carbono en el suelo de la incorporación del componente arbóreo.

Una de las recomendaciones importantes es la determinación del consumo de agua por parte de las pasturas y de las especies nativas especialmente en la época seca, para así observar el verdadero comportamiento de las asociaciones cuando se presenta una competencia por el recurso hídrico.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Albretch, A; Kandji, S. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99: 15-27.
- Amezquita, MC, Ibrahim, M; Bourman, P. 2003. Carbon sequestration in pasture, agropastoral and silvopastoral systems in the American tropical forest ecosystem. In Mannetje, L; Ramirez, L; Ibrahim, M; Sandoval, C; Ojeda, N; Ku, J. eds. The importance of silvopastoral system in rural livelihoods to provide ecosystem services. 2nd International Symposium on silvopastoral systems. p 304-306.
- Andrade, HJ. 1999. Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo. Tesis. Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 70p
- Andrade, HJ; Ibrahim, M. 2000. Fijación de Carbono en Sistemas Silvopastoriles: una propuesta metodológica (en línea). Consulta 10 Nov 2003. Disponible en <http://lead.virtualcentre.org>
- Andrade, HJ; Ibrahim, M. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Americas* 10(39-40): 109-116.
- Ávila, G. 2000. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. Tesis. Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 99p
- Beer, J; Harvey, C; Ibrahim, M; Harmand, JM; Somarriba, E; Jiménez, F. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Revista Agroforestería en las Américas* 10(37-38): 80-87.
- Bolivar, D. 1998. Contribución de *Acacia mangium* al mejoramiento de la calidad forrajera de *Brachiaria humidicola* y la fertilidad de un suelo ácido del trópico húmedo. Tesis. Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 97p
- Buurman, P; Ibrahim, M; Amezquita, M. 2004. Mitigation of greenhouse gas emissions by tropical silvopastoral systems: Options and Facts. In: Mannetje L't, Ramirez L., Ibrahim M., Sandoval C. and Ojeda N. eds. The importance of silvopastoral systems in rural livelihoods to provide ecosystem services, 2nd. Internacional Symposium on Silvopastoral Systems, Merida, University of Yucatán, Mexico. pp 62-72

- Cambardella, CA; Elliot, ET. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal* 56:777-783.
- Cambardella, CA; Elliot, ET. 1993. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. *Geoderma* 56:449-457.
- Camero, A; Camargo, JC; Ibrahim, M; Schlönvoigt, A. 1999. Agroforestería y Sistemas de producción Animal en América Central. *In Seminario Internacional Intensificación de la Ganadería Centroamericana: Beneficios Económicos y Ambientales*. Turrialba, CR, FAO-CATIE. p 177-198.
- Conant, RT; Six, J; Paustian, K. 2003. Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern, United states. I management-Intensive versus extensive grazing. *Biol. Fert. Soils* 38: 386-392.
- Cordero, J; Boshier, D. 2003. Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas. Turrialba, CR, Oxford Press Institute-CATIE. 1079p
- Curtis, PS; Hanson, PJ; Bolstad, P; Barford, C; Randolph, JC; Schmid, HP; Wilson. KB. 2002. Biometric and eddy-covariance bases estimates of annual carbon storage in five eastern North American deciduous forests. *Agriculture and Forest Metereology* 113: 3-29.
- D'alessandro, CM; Sarracín, A; Borguetti, M. 2005. Thinning affects water use efficiency of hardwood sapling naturally recruited in a *Pinus radiata* D. Don plantation. *Forest Ecology and Management* (In press).
- Da Silva, JE; Resck, DVS; Corazza, L; Vivaldi, L. 2004. Carbon storage in clayey oxisol cultivated pastures in the "Cerrado" region, Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 103: 357-363.
- De Jong, BIL; Tipper, R; Montoya-Gomez, G. 2000. An economic analysis potential for carbon sequestration by forests: evidence from southern Mexico. *Ecological Economics* 33: 313-327.
- Dhyani, RC; Tripathi, RS. 2000. Biomass and production of fine and coarse roots of trees under agrisilvicultural practices in north-east India. *Agroforestry Systems* 50: 107-121.
- Dixon, K. 1995a. Sistemas Agroforestales y gases de invernadero. *Agroforestería en las Américas* 2(7): 22-26.

- Dixon, RK. 1995b. Agroforestry Systems: sources or sinks of greenhouse gases?. *Agroforestry Systems* 31: 99-116.
- Dugas, WA; Heuer, ML; Mayeux, HS. 1999. Carbon dioxide fluxes over Bermuda grass, native prairie, and sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology* 93: 121-139.
- Eamus, D; Prior, L. 2001. Ecophysiology of trees of seasonally dry tropics: comparisons among phenologies. *Advances in Ecological Research* 32: 113-197.
- Faurby, O; Barahona, T. 1998. *Silvicultura de Especies Maderables Nativas del Tropicco Seco de Nicaragua*. Managua, Nicaragua, UCA. 134p
- Fischer, MJ; Rao, IM; Ayarza, MA; Lascano, CE; Saenz, JI; 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. *In Seminario Internacional Intensificación de la Ganadería Centroamericana: Beneficios Económicos y Ambientales*. Turrialba, CR, FAO-CATIE. p 115-135.
- Ford- Robertson, J; Robertson, K; Maclaren, P. 1999. Modelling the effect of land use practices on green-house gas emissions and sinks in New Zealand. *Environmental Science & Policy* 2: 135-144.
- Fujisaka, S; Castilla, C; Escobar, G; Rodríguez, 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.
- Goetz, SJ; Prince, SD. 1999. Modelling Terrestrial Carbon Exchange and Storage: Evidence and Implications of Functional Convergence in Light-Use efficiency. *Advances in Ecological Research* 28: 57-92.
- Granier, A. 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology* 3: 309-320.
- Griffis, TJ; Black, TA; Morgenstern, K; Barr, AB; Nesic, Z; Drewitt, GB; Gaumont-Guay, D; McCaughey, JH. 2003. Ecophysiological controls on the carbon balances of three southern boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 117: 53-71.

- Gutiérrez, P. 2001. Comportamiento fisiológico del café asociado con *Eucalyptus deglupta*, *Terminalia ivorensis* y sin sombra. Tesis. Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 88p
- Hassink, J. 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil* 191: 77-87.
- Herrick, JE. 1993. Restoration on tropical pastures and the role of cattle dung patches. Ph. D. Thesis. Ohio State University. 204.
- Houghton, RA. 1994. The worldwide extent of land-use change: in the last few centuries, and particularly in the last several decades, effects of land-use change have become global. *Bioscience* 44(5): 305-313.
- Houghton, RA; Skole, DL; Lefkowitz, DS. 1991. Changes in the landscape of Latin America between 1850 and 1985. II. Net release of CO₂ to the atmosphere. *Forest Ecology and Management* 38:173-199.
- Ingram, JSI; Fernandes, EM. 2001. Managing carbon sequestration in soils: concepts and terminology. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 87: 111-117. x
- IPCC. 2000. Land Use, Land-Use Change, and Forestry. Cambridge, UK, Cambridge University Press. 377p
- Izaurrealde, RC; Rosenberg, NJ; Lal, R. 2001. Mitigation of climatic change by soil carbon sequestration: issues of science, monitoring, and degrade lands. *Advances in Agronomy* 70: 1-75.
- Jiménez, Q. 1999. Árboles maderables en peligro de extinción en Costa Rica. 2ed. Heredia, CR, INBIO. 187p
- Kanninen, M. 1999. Secuestro de Carbono en los bosques: el papel de los bosques en el ciclo global de Carbono. *In Seminario Internacional Intensificación de la Ganadería Centroamericana: Beneficios Económicos y Ambientales*. Turrialba, CR, FAO-CATIE. p 137-149.
- 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.
- Kramer, P. 1983. Water relations of plants. New York, USA, Academic Press. 489p
- Kumagay, T; Nagasawa, H; Mabuchi, T; Ohsaki, S; Kubota, K; Kogi, K; Utsumi, Y; Koga, K; Otsuki, K. 2005. Sources of error in estimating stand transpiration using

- allometric relationships between stem diameter and sapwood area for *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtuse*. *Forest Ecology and Management* 206:191-195.
- Kumar, BM; George, SJ; Jamaludheen, V; Suresh, TK. 1998. Comparison of biomass production, tree allometry and nutrient use efficiency of multipurpose trees grown in woodlot and silvopastoral experiments in Kerala, India. *Forest Ecology and Management* 112: 145-163.
- Lal, R. 2002. The potential of soils of the tropics to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Advances in Agronomy* 76: 1-30.
- LeCain, D; Morgan, J; Schuman, G; Reeder, JD; Hart, RH. 2002. Carbon exchange and species composition of grazed pastures and exclosures in the shortgrass steppe of Colorado. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 93: 421–435.
- López, A. 1998. Aporte de los sistemas Silvopastoriles al secuestro del carbono en el suelo. Tesis Mag Sc. Turrialba, CR, CATIE. 50p
- Losi, CL; Siccama, TG; Condit, R; Morales, JE. 2003. Analysis of alternative methods for estimating carbon stock in young tropical plantations. *Forest Ecology and Management* 184: 355-368.
- Lundgren, BO; Raintree, JB. 1982. Sustained agroforestry. Nairobi, Ke, ICRAF. 25p
- MacDiken, K. 1997. A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects. Winrock International, 1611 N. Kent St., Suite 600, Arlington, VA 22209, USA. 87 p.
- Mekonnen, K; Buresh, RJ; Jama, B. 1997z. Root and inorganic nitrogen distribution in *Sesbania* fallow, natural fallow and maize fields. *Planta Soil* 188: 319-327.
- Melendez, G. 1997. Transformaciones de carbono, nitrógeno y fósforo del suelo, en sistemas agroforestales, cultivos anuales y bosque natural. Tesis. Mag. Sc. San José, CR, UCR. 123p
- Montagnini, F; Nair, PKR. 2004. Carbon sequestration: An under exploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61: 281-295.
- Montenegro, J; Abarca, S. 1999. Fijación de Carbono, emisión de metano y de óxido nítrico en sistemas de producción bovina en Costa Rica. *In Seminario Internacional Intensificación de la Ganadería Centroamericana: Beneficios Económicos y Ambientales*. Turrialba, CR, FAO-CATIE. p 151-174.

- 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 Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 92 p.
- Moreno, FH; Lara, W. 2003. Variación del carbono orgánico del suelo en bosques primarios intervenidos y secundarios IN Orrego, SA; Del Valle, JI; Moreno, FH. Eds. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: contribuciones para la mitigación del cambio climático. Medellín, CO. 189-213.
- Mutuo, PK; Cadish, G; Albretch, A; Palm, CA; Verchot, L. 2005. Potential of agroforestry for carbon sequestration gas emissions from soils in the tropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 71: 43-54.
- Oelbermann, M. 2002. Linking carbon inputs to sustainable agriculture in Canadian and Costa Rican agroforestry Systems. Ph. D. Thesis. Guelph, Canada, University of Guelph. 208p
- Oelbermann, M; Voroney, RP; Kass, D; Schlönvoight, A. 2005. Above and below ground carbon inputs in 19-,10- and 4-year-old Costa Rican Alley cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 105: 163-172.
- Oelbermann, M; Voroney, RP;Gordon, AM. 2004. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*: 104: 359-377.
- Oliveira, MR; Van Noordwijk, M; Gaze, SR; Brouwer, G; Bona, S; Mosca, G; Hairiah, K. 2000. Auger sampling, Ingrowth cores and pinboard methods. In Smith, AL; Bengough, AG; Engels, C; Van Noordwijk, M; Pellerin, S; Van de Geijn, SC. Eds. *Root methods: a handbook*. Berlin, GE, Springer-verlag. 175-210p.
- Pandey, DN. 2002. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Climate Policy* 2: 367-377.
- Parton, WJ; Schimel, DS; Cole, CV ; Ojima, DS.1987. Analysis of factors controlling soil organic matters levels in great plain grasslands. *Soil Sci. Soc. Amb. J.* 51:1173-1179.
- Pezo, D. y Ibrahim, M. 1999. Sistemas silvopastoriles. Módulo de Enseñanza Agroforestal No. 2. Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ. Turrialba, Costa Rica. 275 p.

- Pfaff, ASP; Kerr, S; Flint, R; Liu, S; Sánchez, GA; Schimel, D; Tosi, J; Watson, V. 2000. The Kyoto protocol and payments for tropical forest: An interdisciplinary method for estimating carbon-offset supply and increasing the feasibility of a carbon market under the CDM. *Ecological Economics* 35:203-221.
- Pomareda, C. 1999a. Carbon sequestration through pasture intensification: technical, economic and management issues for the livestock and environment initiative. San José, CR. The World Bank/Fact 47p.
- Pomareda, C. 1999b. Perspectivas en los mercados y oportunidades para la inversión en la ganadería. *In* Seminario Internacional Intensificación de la Ganadería Centroamericana: Beneficios Económicos y Ambientales. Turrialba, CR, FAO-CATIE. p 55-74.
- Poveda, L.J.; Sánchez, P.E. 1999. Árboles, palmas y cactáceas arborescentes del Pacífico Norte de Costa Rica: Claves dendrológicas. 1^a. ed. San José, C.R. 186p
- 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. Mag Sc. Turrialba, CR, CATIE. 81p
- Roberts, S; Vertessy, R; Grayson, R. 2001. Transpiration from *Eucalyptus sieberi* (L Johnson) forests of different age. *Forest Ecology and Management* 143: 153-161.
- Roscoe, R; Buurman, P; Velthorst, EJ; Vasconcellos, CA. 2001. Soil organic matter dynamics in density and particle size fractions as revealed by the ¹³C/¹²C isotopic ratio in cerrado's oxisol. *Geoderma* 104: 185-202.
- Ruiz, A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguas, Ni. Tesis. Mag Sc. Turrialba, CR, CATIE. 106p
- Schroeder, P. 1992. Carbon storage potential of short rotational tropical tree plantations. *Forest Ecology and Management* 50: 31-41.
- Schroeder, P. 1994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry systems* 27:89-97.

- Schroth, G; Vanlauwe, B; Lehman, J. 2003. Soil organic Matter. *In* Schroth, G; Sinclair, F. eds. Trees, crops and soil fertility: concepts and research methods. Wallingford, UK, CABI International. 77-91p
- Segura, M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costaricensis*, en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Tesis. Lic. For. Heredia, CR, UNA. 127p.
- Segura, M. 1999. Valoración del servicio de almacenamiento y fijación de carbono en bosques privados en el Área de Conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 119 p.
- Segura, M; Kanninen, M. 2002. Inventarios para estimar carbono en ecosistemas forestales tropicales. *In* Orozco, L; Brumer, C eds. Inventarios Forestales para Bosques Latifoliados en América Central. Turrialba, CR, CATIE. p 202-216.
- Segura, M; Kanninen, M. 2005. Allometric models for tree volume and total aboveground biomasa in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica* 37(1):2-8.
- Sharrow, SH; Ismail, S. 2004. Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in western Oregon, USA. *Agroforestry Systems* 60: 123-130.
- Sierra, C; Del Valle, JI; Orrego, SA. 2003. Ecuaciones de biomasa de raíces en bosques primario intervenidos y secundarios. *In* Orrego, S; Del Valle, JI; Moreno, FH. Eds. Medida de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia. Medellín, CO, Universidad Nacional de Colombia. 313p
- Sims, PL; Bradford, JA. 2001. Carbon dioxide fluxes in a southern plains prairie. *Agricultural and Forest Meteorology* 109: 117-134.
- Six, J; Conant, RT; Paul, EA; Paustian, PK. 2002. Stabilization mechanism of soil organic matter: implications for C saturation of soils. *Plant and Soil* 241: 155-176.
- Skerman, P.J. y Riveros, F. 1992. Gramíneas tropicales. Colección FAO: Producción y protección vegetal. Roma. 849 p.
- Soegaard, H; Jensen, NO; Boegh, E; Hasager, CB; Schelde, K; Thomsen, A. 2003. Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modeling. *Agriculture and Forest Meteorology* 114: 153-173.

- Steinfeld, H. 1999. Producción animal y el medio ambiente en Centroamérica. *In* Pomareda, C; Steinfeld, H eds. Intensificación de la Ganadería en CentroAmerica: Beneficios Económicos y Ambientales. Turrialba,CR, FAO-CATIE. p 17-53.
- Suarez, D. 2002. Cuantificación y valoración económica del servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café en la comarca Yassica Sur, Matagalpa, Nicaragua. Tesis. Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 117p
- Szott, L; Ibrahim, M; Beer, J. 2000. The hamburger connection hangover: cattle, pasture land degradation and alternative land use in Central America. CATIE, CR . 71p
- Upadhyay, TP; Sankhayan, PL; Solberg, B. 2005. A review of carbon sequestration dynamics in the Hymalayan region as a function of land-use change and foret/soil degradation with special reference to Nepal. *Agriculture, Ecosystems an Environment* 105: 449-465.
- Vågen, TG; Lal, R; Singh, BR. 2005. Soil carbon sequestration in sub-saharan Africa: a review. *Land Degradation & Development* 16: 53-71.
- Van Kanten, R. 2003. Competitive interactions between *Coffea Arabica* L. and fast-growing timber shade trees. Thesis. Ph. D. Bangor, UK, University of wales Bangor. 162p
- Veldkamp. E. 1993. Soil organic carbon dynamic in pastures established after deforestation in the humid tropic of Costa Rica. Ph. D Thesis. Wageningen, The Netherlands, Wageningen Agricultural University. P
- Veldkamp, E. 1994. Organic Carbon Turnover in three Tropical soils under pasture after deforestation. *Soil Science Ambiental Journal* 58:175-180.
- 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. *Agroforesteria en las Ameritas* 9(35-36): 69-74.
- Young, A. 1989. *Agroforestry for soil conservation*. Wallingford, UK, CAB International. 276p.
- Young, A. 1997. *Agroforestry for soil management*. Wallingford, UK, CAB International. 276p

- Walkley, A; Black, C. A. 1938. An examination of the Degtjareff's method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.
- Whitehead, D; Beadle, CH. 2004. Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review. *Forest Ecology and Management* 193; 113-140.
- Zuluaga, JJ. 2004. Dinámica de la materia orgánica del suelo en sistemas agroforestales de café con Eritrina poeppigiana (Walpers) OT Cook en Costa Rica. Tesis MSc. Turrialba, CR, CATIE: 119p