

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

**FRACCIONAMIENTO DEL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN TRES TIPOS DE
USO DE LA TIERRA EN FINCAS GANADERAS DE SAN MIGUEL DE BARRANCA,
PUNTARENAS-COSTA RICA.**

**Tesis sometida a la 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 parcial para optar por el grado de**

MAGÍSTER SCIENTIAE

Por

Raúl Armando Ramos Veintimilla

CATIE



**Turrialba, Costa Rica
2003**

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

MAGÍSTER SCIENTIAE

Firmantes:

Tamara Benjamín, Ph. D.
Profesor Consejero

Mahammad Ibrahim, Ph. D.
Miembro del Comité Asesor

Tangaxuhan Llanderal, Estudiante Ph. D.
Miembro del Comité Asesor

Gloria Meléndez M.Sc.
Miembro del Comité Asesor

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

Raúl Armando Ramos Veintimilla
Candidato

DEDICATORIA

A Dios Padre y en su nombre a
SAN FELIPE SANTIAGO de Sibambe,
por prestarme la vida y apoyarme
en cada momento y cada lugar.

A mis Padres LUZMILA y WILSON
Por ser mí ejemplo de la vida y a quienes debo lo que soy.

A mis hermanos: Inés, Yolanda, Lupe, Mario, Wilson Jr. y Julio (JC):
para que juntos sigamos siendo una gran familia.

A JUANITO CORDOVA[†]
Ex-jefe y amigo, que desde el más allá
siempre me estará apoyando.

A las familias RAMOS RAMOS y MERCHAN VEINTIMILLA
por la confianza que me brindaron cuando inicié éste sueño.

AGRADECIMIENTO

Dejo constancia de mi sincero agradecimiento a todas las personas que de una u otra manera apoyaron para que culmine con éxito esta investigación y mis estudios de maestría en general. Agradezco en especial:

A mis profesores consejeros: la Dra. Tamara Benjamín, la Ing. MSc. Gloria Meléndez, el Dr. Muhammat Ibrahim y al Ing. MSc. Tangaxuhan Llanderal por su valiosa y oportuna asesoría en el desarrollo y culminación del trabajo de investigación.

A Rodrigo Granado Gamboa y Luis Quiroz Herrera asistentes de campo y a Francisco Casasola Investigador del proyecto GEF, por su apoyo y cooperación en el desarrollo de las actividades de campo.

A los productores de San Miguel de Barranca-Puntarenas y en especial a los hermanos Lobo, a Antonio López, a Isaías y Edder López por su apoyo oportuno y desinteresado en la ejecución de la fase de campo de ésta investigación.

Al Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP-Ecuador), al Programa de Modernización de los Servicios Agropecuarios (PROMSA-Ecuador) y al Proyecto GEF “Sistemas silvopastoriles” (Costa Rica) por el apoyo económico aportado para la ejecución de mis estudios y trabajo de investigación.

Al personal de la Escuela de Posgrado del CATIE, por su apoyo incondicional prestado en estos dos años.

A la señora Gladdys empleada de la cafetería y sus compañeros de trabajo por consentirme con sus deliciosas guarniciones.

A mis compatriotas, amigos y compañeros de la promoción, por su amistad y apoyo brindado durante todo éste tiempo.

RAMOS VEINTIMILLA, R.A. 2003. Fraccionamiento del carbono orgánico del suelo en tres tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. Tesis M.Sc. CATIE Turrialba, Costa Rica. 81p.

Palabras claves: Agroforestería, sistemas silvopastoriles, fincas ganaderas, pasturas mejoradas, pasturas degradadas, bosque secundario, biomasa, raíces finas, fraccionamiento de carbono en suelo, carbono orgánico pasivo.

RESUMEN

Con el propósito de determinar la influencia del cambio de uso de la tierra en el secuestro de carbono orgánico total (CO total) y la fracción de carbono orgánico pasivo (CO pasivo) en suelos, se realizó una investigación bajo pasturas mejoradas (*Brachiaria brizantha*) más árboles (PmA), pasturas degradadas (con especies nativas y naturalizadas) (Pd) y bosque secundario (Bs) a diferentes profundidades, en fincas ganaderas del sector San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. La precipitación media en el área de estudio fue de 2043 mm, temperatura promedio 27.2 °C y suelos Typic Rhodustalfs.

Se utilizó un diseño irrestricto al azar en parcelas divididas con cinco repeticiones, donde la parcela grande fue el sistema y la parcela pequeña la profundidad. Las variables evaluadas fueron: densidad aparente (DA), pedregosidad, fertilidad, textura, CO total y CO pasivo en suelo, biomasa de raíces finas (BMRF), biomasa de pastos e inventario de especies arbóreas y arbustivas.

Bosque secundario y pastura mejorada más árboles almacenaron la mayor cantidad de carbono orgánico en el sistema (180.41 y 173.09 t ha⁻¹, respectivamente) en comparación a pastura degradada que almacenó 134.71 t ha⁻¹. De éste carbono, más del 80% se encontró en el suelo en los tratamientos PmA y Pd y el 52% en el tratamiento bajo Bs. Alrededor del 50% del CO total secuestrado en el perfil de suelo se encontró a una profundidad mayor a 20 cm, lo cual hace que éste carbono se encuentre menos expuesto a procesos de oxidación y a pérdidas como gas efecto invernadero. En éste estudio se encontró además que una mayor concentración de carbono en el suelo esta asociado a un menor pH, menor concentración de Ca, menor CICE, menor cantidad de limo, menor pendiente, mayor concentración de arcilla y mayor biomasa de raíces finas. Bosque secundario presentó tres veces más BMAT que PmA y ésta 21 veces más que Pd, esto

indica que el potencial para almacenar carbono en los sistemas de bosque esta en la biomasa aérea y en los sistemas bajo pasturas esta en el suelo.

RAMOS VEINTIMILLA, R. A. 2003. Fractioning of soil organic carbon in three types of land uses on cattle farms in San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. M.Sc. Thesis. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 81 p.

Keywords: agroforestry, silvopastoral systems, cattle farms, improved pasture, secondary forest, biomass, fine roots, fractioning of soil carbon, passive organic carbon.

SUMMARY

A study was conducted to determine the influence of land use changes on total organic carbon sequestration and fractioning of passive organic carbon. The study was undertaken in three land use types on cattle farms situated in San Miguel de Barranca (Puntarenas, Costa Rica): improved pasture (*Brachiaria brizantha*) associated with trees, degraded pasture (with native and naturalized species) and secondary forest. Average precipitation in the area was 2043 mm and average temperature recorded was 27.2 °C during the period on the study. Soils in the study area were characterized as Typic Rhodustalfs.

Sampling was conducted in plots under a random sampling regime with five repetitions, where the large plot was the system and the small plot the depth. The following soil variables were evaluated: bulk density, soil fertility, texture, total soil organic carbon and passive organic carbon. Other variables that were studied included fine root biomass, pasture biomass, and an inventory of tree and shrub species.

Secondary forest and the improved pasture with more trees stored more amount of organic carbon in the system (180.41 y 173.09 t ha⁻¹, respectively) than the degraded pasture that stored 134.71 t ha⁻¹. More than 80% of this carbon was found in the soils of the PmA and Pd treatments whereas the 52% was found under the Bs treatment. Approximately, the 50% of the total OC sequestrated in the soil was found in depths greater than 20 cm –therefore, this organic carbon is less exposed to oxidation processes and losses in the form of greenhouse-effect-gases. In addition, this study found that greater concentration of carbon in soil is related to: lower pH, lower Ca concentration, lower CICE, lower amount of mud, less slope, greater clay concentration and greater thin-root biomass. The secondary forest presented three times more BMAT than PmA; and the later was 21 times greater than Pd. It implies that the forest systems potential to store carbon is located in the aerial biomass while the pasture systems potential is in the soil.

CONTENIDO

	<u>DEDICATORIA</u>	
	<u>AGRADECIMIENTO</u>	
	<u>RESUMEN</u>	
	<u>SUMMARY</u>	
	<u>CONTENIDO</u>	
	<u>LISTA DE CUADROS</u>	
	<u>LISTA DE FIGURAS</u>	
	<u>LISTA DE ANEXOS</u>	
	<u>1. Introducción</u>	
<u>1.1</u>	<u>Objetivos</u>	2
<u>1.1.1</u>	<u>Objetivo General</u>	2
<u>1.1.2</u>	<u>Objetivos Específicos</u>	2
<u>1.2</u>	<u>Hipótesis</u>	3
	<u>2. Revisión de literatura</u>	
<u>2.1</u>	<u>Ganadería en Latino América</u>	4
<u>2.2</u>	<u>Sistemas Silvopastoriles</u>	5
<u>2.3</u>	<u>Carbono</u>	6
<u>2.3.1</u>	<u>Carbono en el suelo</u>	7
<u>2.3.2</u>	<u>Secuestro de carbono en el suelo</u>	9
<u>2.3.3</u>	<u>Métodos de determinación de carbono orgánico en suelo</u>	10
	<u>3. Materiales y métodos</u>	
<u>3.1</u>	<u>Área de estudio</u>	12
<u>3.1.1</u>	<u>Localización</u>	12
<u>3.1.2</u>	<u>Suelo</u>	12
<u>3.1.3</u>	<u>Clima</u>	13
<u>3.1.4</u>	<u>Características biofísicas</u>	13
<u>3.1.5</u>	<u>Manejo de la finca y sistemas de producción</u>	13
<u>3.2</u>	<u>Definición de la población y la muestra.</u>	14
<u>3.3</u>	<u>Tratamientos</u>	14
<u>3.4</u>	<u>Diseño experimental</u>	15
<u>3.5</u>	<u>Muestreo y análisis de datos</u>	15
<u>3.5.1</u>	<u>Criterios para la selección de pasturas degradadas</u>	16
<u>3.5.2</u>	<u>Manejo y edad de los sistemas</u>	18
<u>3.5.3</u>	<u>Densidad aparente (DA)</u>	18
<u>3.5.4</u>	<u>Pedregosidad</u>	19
<u>3.5.5</u>	<u>Fertilidad</u>	19
<u>3.5.6</u>	<u>Textura</u>	20
<u>3.5.7</u>	<u>Biomasa de raíces finas</u>	20
<u>3.5.8</u>	<u>Biomasa de pastos y composición botánica</u>	22
<u>3.5.9</u>	<u>Inventario de especies leñosas</u>	23
<u>3.5.10</u>	<u>Estimación de biomasa aérea y carbono en el componente leñoso</u>	24
<u>3.5.11</u>	<u>Carbono orgánico en el suelo</u>	24
	<u>4. Resultados y discusión</u>	
<u>4.1</u>	<u>Descripción de los sistemas de uso de la tierra estudiados</u>	27
<u>4.1.1</u>	<u>Pastura mejorada más árboles (PmA).</u>	27
<u>4.1.2</u>	<u>Pastura degradada (Pd).</u>	28
<u>4.1.3</u>	<u>Bosque secundario (Bs).</u>	29

<u>4.2</u>	<u>Densidad aparente de suelo (DA)</u>	29
<u>4.3</u>	<u>Fertilidad de suelo</u>	30
<u>4.4</u>	<u>Textura de suelo</u>	34
<u>4.5</u>	<u>Biomasa de raíces finas</u>	37
<u>4.6</u>	<u>Composición del componente leñoso en Pasturas mejoradas con árboles (PmA) y Bosque secundario (Bs).</u>	38
<u>4.7</u>	<u>Biomasa aérea del componente leñoso y pastos</u>	41
<u>4.7.1</u>	<u>Componente leñoso</u>	41
<u>4.7.2</u>	<u>Componente Pastos</u>	43
<u>4.7.3</u>	<u>Biomasa total sobre el suelo</u>	44
<u>4.8</u>	<u>Carbono orgánico del suelo (COS)</u>	45
<u>4.9</u>	<u>Carbono orgánico total almacenado en Pastura mejorada más árboles, pasturas degradadas y bosque secundario.</u>	50
<u>4.10</u>	<u>Análisis Multivariado</u>	51
	<u>5. Conclusiones</u>	
	<u>6. Recomendaciones</u>	
	<u>7. Bibliografía</u>	
	<u>8. Anexos</u>	

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Fracciones conceptuales de C del suelo y tiempos promedios de residencia dentro de las fracciones para tres modelos de C orgánico del suelo (FAO 2000).	8
Cuadro 2. Asignación de valores para la calificación de la pastura con base coberturas y procesos erosivos. (Fuente: Camargo-Proyecto GEF SSP).	17
Cuadro 3. Grado de degradación de las pasturas de acuerdo a los valores asignados en coberturas y procesos erosivos. (Fuente: Camargo-Proyecto GEF SSP).	17
Cuadro 4. Promedios de variables de fertilidad de suelo en tres tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	32
Cuadro 5. Promedios y/o comparación múltiple de Duncan al 5% entre profundidades del suelo para variables de fertilidad en tres tipos de uso de la tierra de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003. (n=5).	33
Cuadro 6. Promedios de sistemas*nivel en contenido de arena, limo y arcilla de suelo bajo pasturas mejoradas con árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs) a tres profundidades. San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003. (n=5).	35
Cuadro 7. Comparación múltiple de Duncan al 5% para biomasa aérea del componente leñoso de las diferentes clases diamétricas, en pasturas mejoradas con árboles, pasturas degradadas y bosque secundario. San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	43
Cuadro 8. Variables usadas en análisis de componentes principales.	51
Cuadro 9. Valores propios de la matriz de correlación para seleccionar el número de componentes principales que entran al análisis de conglomerados, en la profundidad de 0-20 cm.	52

Cuadro 10.	Análisis de conglomerados de Pasturas mejoradas más árboles (PmA), Pasturas degradadas (Pd) y Bosque secundario (Bs) en la profundidad de 0-20 cm.	53
Cuadro 11.	Análisis de conglomerados de Pasturas mejoradas más árboles (PmA), Pasturas degradadas (Pd) y Bosque secundario (Bs) en la profundidad de 20-40 cm .	53
Cuadro 12.	Análisis de conglomerados de Pasturas mejoradas más árboles (PmA), Pasturas degradadas (Pd) y Bosque secundario (Bs) en la profundidad de 60-80 cm .	54
Cuadro 13.	Análisis univariado y prueba de Duncan al 5% de los grupos conformados en el análisis de conglomerados de la profundidad de 0-20 cm.	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa de ubicación de las fincas donde se realizó la investigación.	12
Figura 2.	Precipitación y temperatura promedio mensual desde 1937 al 2002. IMN Estación Barranca.	13
Figura 3.	Croquis de distribución de los puntos de muestreo en el campo.	16
Figura 4.	Extracción de raíces finas (< 2mm).	21
Figura 5.	Croquis de disposición de las parcelas de muestreo de especies leñosas en bosque secundario.	23
Figura 6.	Fraccionamiento del carbono orgánico de suelo basado en el tamaño de partículas.	25
Figura 7.	Densidad aparente de suelo a tres profundidades en tres tipos de uso de la tierra de fincas ganaderas. San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	30
Figura 8.	Biomasa de raíces finas (BMRF) a tres profundidades de suelo en pasturas mejoradas, pasturas degradadas y bosque secundario en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	38
Figura 9.	Diversidad y abundancia del componente leñoso en potreros con pasturas mejoradas en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE 2003.	39
Figura 10.	Distribución de las familias de acuerdo al número de especies encontradas en bosque secundario de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE 2003.	40
Figura 11.	Distribución de las familias de acuerdo al número de individuos encontradas en bosque secundario de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE 2003.	41
Figura 12.	Promedios de biomasa aérea del componente leñoso en pasturas mejoradas con árboles, pasturas degradadas y bosque secundario de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE 2003. ($p < 0.0001$)	42
Figura 13.	Promedios de la interacción Sistemas*Evaluación de biomasa de Rendimiento de materia seca de pastos en cuatro meses de	

	evaluación en dos tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	44
Figura 14.	Biomasa aérea total de pasturas mejoradas mas árboles, pasturas degradadas y bosque secundario en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	45
Figura 15.	Promedios de CO total y las fracciones de CO lento y CO pasivo en suelo bajo pasturas mejoradas mas árboles, pasturas degradadas y bosque secundario en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	47
Figura 16.	Afloramiento de raíces de árboles en bosque secundario por efecto de erosión laminar. fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	48
Figura 17.	Promedios de CO total y fraccionamiento de carbono orgánico en tres profundidades de suelo bajo tres tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	49
Figura 18.	Carbono orgánico total almacenado sobre y bajo el nivel de suelo en pasturas mejoradas mas árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs) en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	50

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1.	Ubicación de las calicatas centrales de muestreo de suelo en cada uno de los apartos evaluados en pasturas mejoradas con árboles, pasturas degradadas y bosque secundario en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	68
Anexo 2.	Encuesta para productores.	69
Anexo 3.	Análisis de varianza para densidad aparente de suelo a tres profundidades en tres tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	72
Anexo 4.	Análisis de varianza para variables de fertilidad a tres profundidades de suelo en pasturas mejoradas más árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs) de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	72
Anexo 5.	Análisis de varianza para variables de fertilidad a tres profundidades de suelo en pasturas mejoradas más árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs) de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003. (Continuación).	73
Anexo 6.	Análisis de varianza para textura de suelo a tres profundidades en tres tipos de uso de la tierra de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	73
Anexo 7.	Análisis de varianza para materia seca de raíces finas a tres profundidades de suelo en pasturas mejoradas más árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs) de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	74
Anexo 8.	Especies forestales en potreros con pasturas mejoradas (PmA), en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca,	

	Puntarenas-Costa Rica, CATIE 2003.	75
Anexo 9.	Especies forestales en el bosque secundario (Bs) de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE 2003.	76
Anexo 10.	Análisis de varianza para materia seca de pastos en dos tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	78
Anexo 11.	Análisis de varianza para carbono orgánico total y carbono orgánico pasivo a tres profundidades de suelo en pasturas mejoradas más árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs) de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.	78
Anexo 12.	Valores propios de la matriz de correlación para seleccionar el número de componentes principales que entran al análisis de conglomerados, en la profundidad de 20-40 cm.	79
Anexo 13.	Valores propios de la matriz de correlación para seleccionar el número de componentes principales que entran al análisis de conglomerados, en la profundidad de 60-80 cm.	79
Anexo 14.	Análisis univariado y prueba de Duncan al 5% de los grupos conformados en el análisis de conglomerados, en la profundidad de 20-40 cm.	80
Anexo 15.	Análisis univariado y prueba de Duncan al 5% de los grupos conformados en el análisis de conglomerados, en la profundidad de 60-80 cm.	81

1. Introducción

En América Latina durante las últimas décadas del siglo XX, los ecosistemas forestales fueron extensamente talados para promover el pastoreo de ganado. A escala global, desde 1950, 200 millones de hectáreas de bosque húmedo y su biodiversidad asociada se han perdido, aparentemente teniendo como causa principal, la expansión de la ganadería. (FAO, 2001; Szott *et al*, 2000).

Los sistemas de producción ganadero que prevalecen en estas áreas están basados principalmente en pastizales, con una escasa integración de cultivos (FAO, 2001; Rocha, 2002). La sustentabilidad de estos sistemas ha sido amenazada por diversos factores como la degradación de los pastizales (ligada al impacto en los suelos), la estacionalidad de la producción forrajera y las condiciones climáticas adversas. Las consecuencias inmediatas han sido la reducción de la productividad, el aumento de costos de producción y la degradación ambiental (FAO, 2001).

Ciesla (1996) y Abarca (1997) manifiestan que los sistemas ganaderos con pasturas tradicionales mal manejadas es uno de los usos del suelo que más aportan gases efecto invernadero (dióxido de carbono, metano y óxido nitroso) a la atmósfera. El CO₂ es un gas de mucha importancia desde el punto de vista del calentamiento global, debido al volumen producido todos los años, con un aumento en su concentración y por el tiempo de residencia en la atmósfera (Mora 2001). El CO₂ es responsable del 50% del calentamiento global a través de la absorción de la radiación térmica emitida por la superficie de la tierra (Veldkamp 1993).

Los sistemas agroforestales y entre ellos los silvopastoriles, son una opción apropiada para enfrentar los problemas anteriores, esto implica la presencia de árboles y/o arbustos forrajeros, maderables o multipropósito (Pezo e Ibrahim 1999). Estos sistemas tienen el potencial de conservar los recursos naturales y la biodiversidad controlando la erosión de los suelos, reduciendo los daños ocasionados por la variabilidad climática (heladas, sequías), aumentando la calidad del forraje y disminuyendo la estacionalidad de su producción (FAO 2001), además de producir servicios ambientales como la fijación de carbono.

Un ejemplo de este último beneficio es la captura y almacenamiento de carbono que puede lograrse en sistemas silvopastoriles y agropastoriles. En un estudio realizado en el corregimiento de Santa Elena, Medellín-Colombia, Giraldo, *et al.* (2003) encontró en un sistema silvopastoril (SSP) de *Acacia decurrens* con *Pennisetum clandestinum* 403.33 t ha⁻¹ de carbono orgánico total existente en el sistema (sobre y bajo el suelo), mientras que en los potreros sin árboles encontró 272.03 t C ha⁻¹, lo cual indica el potencial que tienen los SSP para contribuir a mitigar el efecto de las emisiones CO₂.

En los últimos años, avances conceptuales y metodológicos sugieren un concepto clave sobre el carbono orgánico en el suelo, entre ellos Parton *et al.* (1987) indican que existen tipos o fracciones de carbono en el suelo con diferentes tasas de recambio (1.5 a más de 1000 años) entre ellas tenemos: carbono orgánico activo, carbono orgánico lento y carbono orgánico pasivo.

La presente investigación aporta información sobre el potencial que brindan los sistemas silvopastoriles en el almacenamiento y fijación de carbono orgánico estable en el suelo, la misma que puede ser útil para implementación de pago por servicios ambientales (PSA) y orientar al uso de tecnologías de manejo sostenible del suelo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Determinar como influye el cambio de uso de la tierra en el secuestro de carbono orgánico en el suelo de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca Puntarenas, Costa Rica.

1.1.2 Objetivos Específicos

1.1.2.1 Describir los tipos de uso de la tierra en estudio en términos de manejo, composición florística, edad y rendimiento de la pastura y características físico-químicas del suelo.

1.1.2.2 Cuantificar la biomasa de raíces finas y biomasa aérea de los diferentes tipos de uso de la tierra.

- 1.1.2.3 Estimar el carbono orgánico total y la fracción pasivo en pasturas mejoradas con árboles, pasturas degradadas y bosque secundario a tres profundidades de suelo.
- 1.1.2.4 Determinar que tipo de uso de la tierra almacena mayor cantidad de carbono orgánico en el suelo en forma estable.

1.2 Hipótesis

- 1.2.1 Los sistemas de uso de la tierra con pasturas mejoradas y árboles aportan mayor cantidad de biomasa subterránea que los sistemas con pasturas degradadas.
- 1.2.2 Los sistemas de uso de la tierra con pasturas mejoradas y árboles almacenan significativamente mayores cantidades de carbono orgánico en el suelo en la fracción pasivo con respecto a sistemas con pasturas degradadas.
- 1.2.3 La profundidad del suelo es un factor determinante en la distribución porcentual de las fracciones de carbono orgánico.

2. Revisión de literatura

2.1 Ganadería en Latino América

Se estima que en América Tropical existen alrededor de 548 millones de ha de tierras agrícolas, lo cual representa el 33% del territorio. De estas, un 77% son pasturas y sistemas agropastoriles y silvopastoriles, la mayor parte de ellos creados en áreas donde anteriormente existían bosques u otro tipo de vegetación nativa (FAO 2001). Se estima que cada año se deforesta entre 15 y 17 millones de hectáreas, para convertirlas en agricultura y/o pastos y plantaciones silvícolas (FAO 1993).

Cerca del 38% (94 millones de hectáreas) del área total de Centroamérica esta constituida por tierras de pastoreo. El uso de la tierra para sistemas de pastoreo se incrementó continuamente durante las últimas décadas, en algunos países como Costa Rica, Nicaragua y El Salvador se produjo una reducción dramática en el área boscosa (Steinfeld 1999; Mora 2001; Kanninen 2001). Por otro lado, la productividad ha disminuido como consecuencia de implementación de sistemas de producción más extensivos y de la incorporación de suelos de menor fertilidad (Pezo e Ibrahim 1996).

La ganadería, esta basada en recursos naturales tales como tierra, agua, aire y plantas. Los sistemas de producción ganadera tienen diferentes interfases con la naturaleza. En Centroamérica se observa además, una degradación inducida por la pobreza, relacionada con la baja productividad y que manifiesta en forma de deforestación y sobre pastoreo (Steinfeld 1999). El mismo autor indica que además existe contaminación y agotamiento nutricional, derivado de las grandes transferencias de nutrientes, asociadas con formas de producción ganadera sumamente intensivo.

La ganadería y los desechos ganaderos 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 oxido nitroso (NO₂) afectan la atmósfera causando el calentamiento global o efecto invernadero (Steinfeld 1999).

El metano es producido principalmente por rumiantes y por la digestión de subproductos alimenticios. En promedio, un 6% de la energía alimenticia se descompone en metano.

Las emisiones de metano son el resultado directo de la capacidad de los rumiantes de digerir grandes cantidades de pastos fibrosos y otros alimentos que no pueden usarse para el consumo humano. Las emisiones de metano por unidad de producto son mayores cuando la calidad de alimento y el nivel de producción es bajo, condiciones que prevalecen en el trópico húmedo y seco y en los subtropicos (Steinfeld 1999). Este potente gas contribuye con el 18% del calentamiento global antropogénico, superado por el CO₂ (Montenegro y Abarca 1999)

Los problemas enfrentados por el ganado y las preocupaciones sobre el ambiente sugieren que actualmente algunas áreas destinadas a pastura pueden ser liberadas para reforestación, contribuyendo así al almacenamiento de carbono. Esto no necesariamente podría ser cierto, ya que para muchos productores en Centroamérica, el ganado todavía tiene un valor importante. En éste sentido, la conciliación de los servicios de producción y del ambiente, en sistemas ganaderos, parece ser una buena alternativa (Kanninen 2001).

2.2 Sistemas Silvopastoriles

Un sistema silvopastoril (SSP) es una opción de producción pecuaria que involucra la presencia de leñosas perennes (árboles o arbustos) y de los componentes tradicionales (forrajeras herbáceas y animales), en donde todos ellos interactúan bajo un sistema de manejo integral (Somarriba 1992). Los sistemas silvopastoriles son practicas agroforestales que contribuyen con la economía y la sostenibilidad biótica del sistema de producción (Beer y Guevara 2000; Souza *et al.* 2000).

Algunos sistemas silvopastoriles mencionados en la literatura son: leñosas en callejones, pastoreo en plantaciones de árboles maderables o frutales, barreras vivas y cortinas rompe viento, cercas vivas, árboles y arbustos dispersos en potrero y bancos forrajeros (Nair 1993; Pezo e Ibrahim 1996).

Nair (1993) indica que en SSP la presencia de las leñosas perennes puede contribuir a mejorar la productividad del suelo, y por ende favorecer el estrato herbáceo. Entre los mecanismos más importantes esta la fijación de N, el reciclaje de nutrimentos, la mejora en la eficiencia del uso de nutrimentos, el mantenimiento de la materia orgánica y el control de la erosión.

El reciclaje de nutrientes en SSP ocurre a través de la senescencia de biomasa aérea y la muerte de raíces, tanto de las leñosas como del estrato herbáceo. Esto se da a través del material podado que es dejado en el campo, y por medio de las excretas que los animales depositan durante el pastoreo / ramoneo (Pezo e Ibrahim 1999).

El contenido de materia orgánica del suelo es un indicador clave de la calidad de éste, tanto en sus funciones agrícolas, como en sus funciones ambientales. También, es el principal determinante de su actividad biológica ya que la cantidad, la diversidad y la actividad de la fauna del suelo y de los microorganismos están directamente relacionadas con la materia orgánica (FAO 2000). La agregación y la estabilidad de la estructura del suelo aumentan con el contenido de materia orgánica, ésta a su vez, incrementa la tasa de infiltración y la capacidad de agua disponible en el suelo así como la resistencia contra la erosión hídrica y eólica. La materia orgánica del suelo también mejora la dinámica y la biodisponibilidad de los principales nutrientes de las plantas (Sánchez y Logan 1992; Robert 1996).

2.3 Carbono

El carbono (C) es la unidad principal de la vida en este planeta y su ciclo es fundamental para el desarrollo de todos los organismos. El carbono se acumula en compartimientos llamados depósitos y circula activamente entre ellos, de estos depósitos, los océanos son los que almacenan la mayor cantidad (38.000 Gt*), seguido por el suelo (15.000 Gt), la atmósfera (750 Gt) y las plantas (560 Gt) (FAO 2002).

Los océanos, las plantas y el suelo intercambian CO₂ con la atmósfera. Cualquier desequilibrio entre los flujos de entrada y salida se refleja un cambio en la concentración del CO₂ en la atmósfera. La absorción de CO₂ atmosférico por las plantas (120 Gt año⁻¹) a través de la fotosíntesis esta en equilibrio con la respiración de las plantas y el suelo (aproximadamente 60 Gt año⁻¹ cada uno) (Bolin y Sukumar 2000).

En 1990, el uso de combustibles fósiles liberó 5 Gt año⁻¹ (mas de 6 Gt año⁻¹ actualmente) y la destrucción de la vegetación, principalmente por la conversión de tierra a agricultura

* Gt = gigantón = mil millones de toneladas

en los trópicos, algo más de 2 Gt año⁻¹. Los océanos tienen una absorción aproximada de 2 Gt año⁻¹, por tanto hay un desequilibrio de aproximadamente 5 Gt año⁻¹ a la atmósfera (IGBP 1998; FAO 2002). La concentración de CO₂ en la atmósfera aumentó de 250 partes por millón por volumen (pPmAv) en tiempos pre-industriales a más de 360 pPmAv en la actualidad. Sin embargo, la concentración de CO₂ en la atmósfera no está aumentando como muestra ese desequilibrio, por lo que se cree que hay un sumidero terrestre, aunque no se sabe cuál ni dónde está (Bolin y Sukumar 2000).

Las actividades agronómicas que liberan C a partir de la vegetación y del suelo a la atmósfera son la deforestación, la quema de la biomasa y la agricultura que incluye el manejo de los residuos de la producción de arroz inundable y la aplicación de fertilizantes FAO (2000). El avance en la agricultura mecanizada en las últimas décadas del siglo XIX produjo drásticas pérdidas de Materia Orgánica (MO) en los suelos cultivados. Normalmente de 20 a 49 % de la MO nativa del suelo se pierde cuando un suelo virgen es intervenido para convertirlo a la agricultura. Estas pérdidas son mayores en los primeros años y disminuyen después de aproximadamente 20 años de cultivo (Robert 2002).

Las plantas fijan carbono a través del proceso de fotosíntesis realizado por las hojas y otras partes verdes, que capturan el CO₂ de la atmósfera, producen carbohidratos, liberan oxígeno y dejan carbono que se utiliza para formar la biomasa de la planta. En este sentido, los bosques y plantaciones tropicales, las prácticas agroforestales y en general aquellas actividades que lleven a la ampliación de una cobertura vegetal permanente, pueden cumplir la función de sumideros de carbono (Cuellar *et al*, 1999).

2.3.1 Carbono en el suelo

El carbono en el suelo se encuentra en forma orgánica e inorgánica; la forma orgánica representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera y se estima en cerca de 1.500 Pg* de C a un metro de profundidad y cerca de 2.456 Pg a dos metros de profundidad. El carbono inorgánico representa cerca de 1.700 Pg pero es capturado en formas más estables tales como el carbonato de calcio (Robert 2002). La vegetación (650 Pg) y la atmósfera (750 Pg) almacenan considerablemente menos cantidades de carbono

* 1 Pg = 10¹⁵ g = 1 Gt = gigantón; 1 gigantón = mil millones de toneladas

que los suelos. Esta es la razón por la cual los cambios en estos depósitos, pueden tener un impacto en el equilibrio global (Kanninen 2001).

El carbono orgánico presente en los suelos naturales representa un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (mineralización). En condiciones aeróbicas del suelo, gran parte del carbono que ingresa al mismo es lábil y solo una pequeña fracción (1%) del que ingresa (55 Pg año^{-1}) se acumula en la fracción humica estable ($0,4 \text{ Pg año}^{-1}$) (Robert 2002). Los diferentes reservorios de carbono que existen en el suelo tienen distintos tiempos de residencia (Cuadro 1), dependiendo de su composición bioquímica. Por ejemplo, la lignina es más estable que la celulosa y su tiempo de residencia son décadas o a más de 1.000 años (fracción estable). También hay alguna conexión con su composición, pero principalmente con el tipo de protección o el tipo de uniones químicas (Puget *et al.* 1995; Balesdent *et al.* 2000).

Cuadro 1. Fracciones conceptuales de C del suelo y tiempos promedios de residencia dentro de las fracciones para tres modelos de C orgánico del suelo (FAO 2000).

Modelo de Rothamsted	Modelo a largo plazo de C orgánico	Modelo CENTURY
<ul style="list-style-type: none"> • Residuos que se descomponen fácilmente, 0.24 años. • Residuos resistentes, 3.33 años. • Biomasa, 2.44 años • Biomasa físicamente estabilizada, 72 años. • Biomasa químicamente estabilizada, 2857 años. 	<ul style="list-style-type: none"> • Residuos que se descomponen fácilmente, 1 a 2 semanas (0.019 a 0.038 años). • Residuos lignificados, 0.3 años. • Biomasa, 0.5 años. • Fracción activa protegida, 29 años. • Fracción vieja, Mayor a 3000 años. 	<ul style="list-style-type: none"> • Residuos metabólicos, 0.5 años. • Residuos estructurales 3 años. • Fracción activa 1.5 a 10 años. • Fracción lenta 25 a 50 años. • Fracción pasiva 1000 a 1500 años.

FAO (2000), indica que los modelos conceptuales y de simulación separan la materia orgánica del suelo en fracciones que son fácilmente descompuestas y resistentes, que se caracterizan por bajas tasa de recambio. Parton *et al.* (1987) dividen a la materia orgánica

del suelo en tres fracciones: 1) fracción activa, que consta de microorganismos vivos y productos microbianos, corresponde al 4% del carbono orgánico total (Theng *et al.* 1989), y el tiempo de recambio esta entre 2 a 4 años; 2) fracción lenta, que es más resistente a descomposición (tiempo de recambio 20-50 años) como resultado de la protección física y química. 3) fracción pasiva, que es físicamente protegida o químicamente resistente y tiene un tiempo de recambio más prolongado (800 a 1200 años); estas dos últimas fracciones representan entre el 96 % del carbono orgánico total (Theng *et al.*, 1989).

2.3.2 Secuestro de carbono en el suelo

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

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

Un buen sistema agropecuario es el que secuestra mas carbono del que emite (Mora 2001). Las pasturas con base en gramíneas mejoradas secuestran mas carbono en partes profundas del perfil del suelo, generalmente debajo de la capa arable (10-15 cm). Esta característica hace que este carbono este menos expuesto a los procesos de oxidación y por tanto su pérdida como gas invernadero (Fisher *et al.* 1994).

En pasturas bien manejadas donde antes fueron bosques, los sistemas radicales de los pastos pueden redistribuir el carbono en las capas más profundas del suelo (Nepstad *et*

al. 1991), donde se almacena en formas más estables y es menos susceptible a oxidación (Batjes y Sombroek 1997). Muestreos repetidos en sitios cultivados que habían sido convertidos a pasturas mostraron incrementos en carbono orgánico de suelo durante varias décadas. Las altas tasas de producción de raíces de los pastos pueden explicar la alta capacidad de acumulación de carbono por parte de las pasturas (Cerri *et al.*, 1991; Brown *et al.* 1992).

Estudios realizados demuestran que el cambio de uso de la tierra de las áreas de pastura hacia sistemas silvopastoriles contribuye a mejorar la calidad de los suelos, a mejorar la productividad de las fincas y a beneficiar el medio ambiente. López *et al.* (1999) demuestran la importancia que tiene el suelo y los árboles bajo sistemas silvopastoriles en el secuestro de carbono. En su trabajo medido a una profundidad de 0.5 m y con una cobertura de pasto Guinea (*Panicum maximum*), el carbono orgánico del suelo fue de 233 tC ha⁻¹, mientras que en suelo ligeramente menos fértil con *Panicum maximum* y *Cordia alliodora*, de menos de 10 años de edad, se almacenaron entre 180 y 200 tC ha⁻¹.

2.3.3 Métodos de determinación de carbono orgánico en suelo

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

Los métodos de separación física tales como el fraccionamiento según el tamaño de las partículas, la densidad de las fracciones o las fracciones por tamaño de los agregados permiten la separación de fracciones cinéticas significativas (Jenkinson *et al.* 1987; Parton *et al.* 1987; Balesdent 1996). La fracción de tamaños que van desde 53 a 2000µm, da una estimación precisa de la fracción lenta, mientras que fracciones menores que 53µm, dan una estimación exacta de la fracción pasiva (Cambardella y Elliot 1992). Entre estas fracciones, las partículas de materia orgánica son muy sensibles a los cambios en el uso de la tierra (Cambardella 1998; Gregorich *et al.* 1996).

Existen algunos métodos directos para determinar la biomasa microbiana, la cual representa de uno a cinco por ciento del total de la materia orgánica del suelo y es una fuente de reserva de nutrientes (N, P). Esta es una fracción muy lábil que fluctúa con la estación y que también responde rápidamente a los cambios de manejo del suelo (Tiessen *et al.* 1984; Robert 2002).

3. Materiales y métodos

3.1 Área de estudio

3.1.1 Localización

Esta investigación se realizó en el sector San Miguel de Barranca perteneciente a la provincia Puntarenas, Costa Rica (Figura 1). Las fincas estudiadas se encuentran ubicadas a $10^{\circ} 09'$ de latitud norte y $84^{\circ} 42'$ de longitud oeste, con una altitud que va desde 150 a 200 m.s.n.m. La zona pertenece a Bosque Sub-húmedo Tropical (bh-T), el relieve es quebrado con fuertes pendientes (23-55%).



Figura 1. Mapa de ubicación de las fincas donde se realizó la investigación.

3.1.2 Suelo

Este estudio se realizó en un suelo Typic Rhodustalfs que pertenece al orden de los Alfisoles (Mapa de suelos de Costa Rica). Los suelos en la zona son superficiales compactados, arcillosos y baja conductividad hidráulica (Camargo 1999).

3.1.3 Clima

La precipitación media anual en la zona es de 2043 mm distribuida en dos épocas, lluviosa (mayo-noviembre) y seca (diciembre-abril). La temperatura promedio es de 27.2 °C (Chinchilla 1987; IMN Barranca) Figura 2.

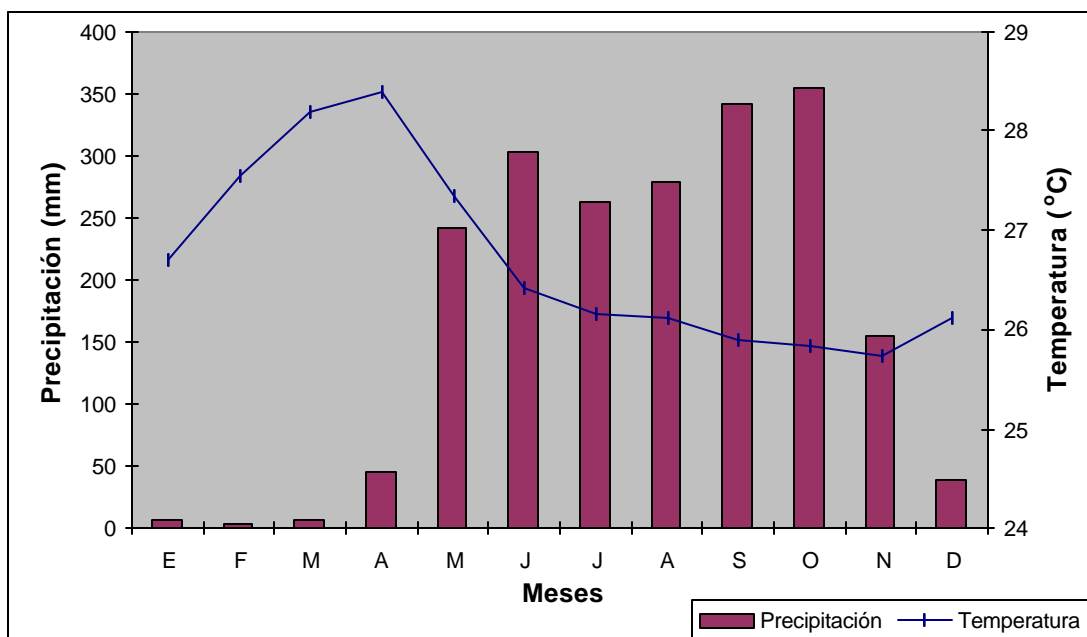


Figura 2. Precipitación y temperatura promedio mensual desde 1937 al 2002. IMN Estación Barranca.

3.1.4 Características biofísicas

El área de influencia del proyecto “Enfoques integrados silvopastoriles para el manejo de ecosistemas” esta entre 0 y 600 m.s.n.m., las fincas en estudio se encuentran de 150 y 200 m.s.n.m, con topografía irregular y fuertes pendientes.

3.1.5 Manejo de la finca y sistemas de producción

“El 53% de los productores contratan mano de obra para control de malezas, arreglo de cercas y suplementación al ganado. En control de malezas el 83% combinan métodos de chapia y aplicación de herbicidas; las quemadas son importantes, el 60% de fincas las a tenido alguna vez. Los sistemas de producción son predominantemente ganadería, el

33% de los finqueros se dedican a la cría de ganado, el 30% a ganadería de doble propósito, un 8% ganadería de engorde, 10% ganadería de leche y 19% de las fincas se arriendan. El 63% de las fincas tiene escasez de pasto durante el año, 50% suplementa el ganado y 85% solo tiene pastos no mejorados” (Camargo 1999).

Los sistemas de producción son ganadería (33%) predominantemente de doble propósito, del 30% de las fincas

3.2 Definición de la población y la muestra.

La población fue compuesta por fincas de productores ganaderos que manejan los sistemas de uso de la tierra con al menos una de las tres formas de uso en estudio.

La selección de las parcelas a evaluar se realizó considerando los siguientes criterios:

1. Que las fincas a evaluar se encuentren en un rango de altitud máximo de 100 m.
2. Que en las fincas se practique el mismo tipo de explotación ganadera.
3. Que las parcelas a estudiar se encuentren en un mismo orden de suelo.
4. Que las parcelas no hayan sufrido quemas durante los últimos 15 años.
5. Que el manejo de la pastura en términos de especie, edad, fertilización, malezas, carga animal, tiempos de utilización y recuperación de la pastura sean lo más parecidos posibles.
6. Que el bosque secundario (comparador) tenga al menos 15 años.

La ubicación de las fincas se realizó con apoyo de información (base de datos, mapas y fotografías aéreas 1:40000) disponible en el proyecto antes mencionado e información secundaria (mapa de clasificación de suelos, Atlas de Costa Rica generado por la UNA).

3.3 Tratamientos

Los tratamientos estudiados fueron pasturas mejoradas más árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs).

Las pasturas mejoradas más árboles fueron apartos o potreros con *Brachiaria brizantha* de 3 años de edad y varias especies leñosas dispersas. Las pasturas degradadas fueron

apartos que tenían como pasto principal jaragua (*Hyparrhenia rufa* Stapf.) y varias gramíneas nativas, presentaron una población de árboles muy baja, a demás se observó un alto porcentaje de arvenses y de suelo descubierto. El bosque secundario en las tres fincas estudiadas está estimado en una edad entre 15 y 25 años.

3.4 Diseño experimental

Se utilizó un diseño Irrestricto al azar con parcelas divididas con muestreo, donde la parcela grande estaba conformada por el tipo de uso de la tierra y la parcela pequeña por la profundidad del suelo. Las repeticiones fueron cinco.

3.5 Muestreo y análisis de datos

En cada repetición del sistema de uso de la tierra evaluado se hicieron nueve puntos de muestreo, tres calicatas (hoyos de 1x1x1 m) que se ubicaron en la parte central del apto distribuidas equidistantemente a 20 m entre ellas y en dirección a la pendiente del terreno y seis minicalicatas (hoyos de 0.5x0.5x0.5 m) distribuidas en forma paralela a 20 m de distancia de las calicatas, igualmente en sentido de la pendiente (Figura 3). La distancia entre el borde del apto y los puntos de muestreo fue de al menos 15 m con el fin de evitar ruidos en los datos provocados por efecto de borde.

En cada punto de muestreo y a tres profundidades de suelo 0-20 cm, 20-40 cm y 60-80 cm, se midieron las siguientes variables: densidad aparente, pedregosidad, fertilidad, textura, biomasa de raíces finas y carbono orgánico; a demás de las variables de suelo se evaluó la biomasa y composición botánica de pastos, inventario y biomasa de especies arbóreas y arbustivas presentes en los apartos y en el bosque secundario.

Los datos obtenidos se analizaron con la ayuda de Statistical Analysis Systems para Windows V8 (SAS V8). El nivel de significancia utilizado en las pruebas estadísticas realizadas fue 95% ($\alpha=0.05$). Para comparar las medias de las variables se realizaron pruebas de rangos múltiples de Duncan.

Además del análisis univariado se realizó análisis de Componentes Principales y análisis de Conglomerados. El Análisis de Componentes Principales se realizó primero y los componentes principales con los mayores valores propios fueron

seleccionados y analizados mediante el Análisis de Conglomerados. Posteriormente, el procedimiento GLM de SAS se usó para caracterizar los conglomerados y ver en qué variables eran diferentes.

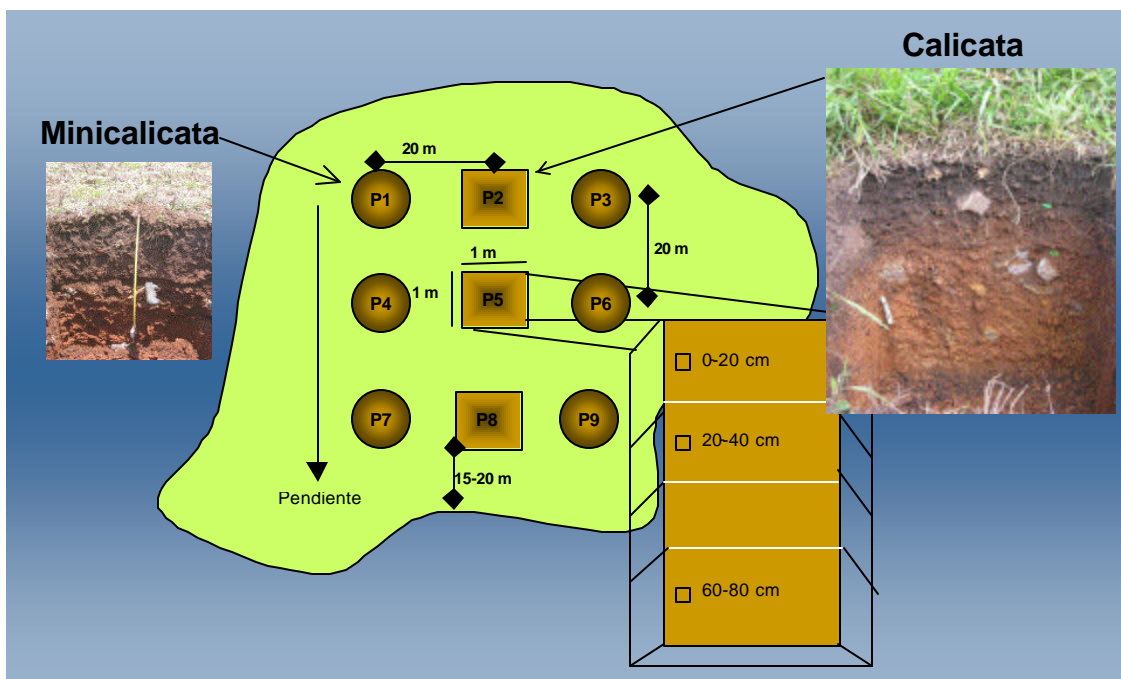


Figura 3. Croquis de distribución de los puntos de muestreo en el campo

3.5.1 Criterios para la selección de pasturas degradadas

Una pastura degradada está definida como un cambio negativo en la condición de la pastura, asociado con cambios negativos ecológicos y ambientales, o simplemente como una reducción en la calidad del pasto que conduce a una disminución de la productividad animal. La degradación está ligada con la reducción en la cobertura vegetal, pérdida de fertilidad de suelo, disminución de la capacidad de infiltración de agua, erosión, pérdida de especies deseables o la invasión de las especies indeseables Szott *et. al.* (2000).

Los criterios utilizados en la selección de pasturas degradadas fueron los presentados por Camargo (1999). Donde considera tres elementos que fueron evaluados directamente en el campo con la ayuda del productor:

1. % de cobertura de las especies deseadas (cd).- Predominancia de pasturas, árboles maderables, frutales, forrajeros respecto a arvenses y otras especies que no generan beneficios sino problemas.
2. % de cobertura del suelo (cs).- Superficie del suelo que posee cobertura.
3. Procesos erosivos (pe).- 1= Ligera o no hay (no perceptible), 2= Moderada o laminar (áreas con decoloración e indicios de pérdida del horizonte A), 3= Severa o en surcos (canículos y surcos), 4= Muy severa cárcavas (cárcavas o movimientos en masa).

Cuadro 2. Asignación de valores para la calificación de la pastura con base coberturas y procesos erosivos. (Fuente: Camargo-Proyecto GEF SSP).

% cobertura deseada				% cobertura del suelo				Procesos erosivos			
>90	90-70	70-40	<40	>90	90-70	70-40	<40	1	2	3	4
10	7	4	1	10	7	4	1	20	14	7	1

Luego de asignar los valores para cada uno de los elementos considerados, se realizó una sumatoria de éstos por sitio evaluado, con el fin de establecer el grado de degradación de la pastura.

Cuadro 3. Grado de degradación de las pasturas de acuerdo a los valores asignados en coberturas y procesos erosivos. (Fuente: Camargo-Proyecto GEF SSP).

Valor obtenido	Grado de degradación	Código
>36	Muy leve o no hay	1
28-36	Leve	2
20-27	Moderado	3
16-20	Severo	4
<16	Muy severo	5

3.5.2 Manejo y edad de los sistemas

Mediante entrevista directa al productor se obtuvo la siguiente información: historia del terreno en los últimos 15 años (vegetación, quemadas, utilización, etc), fertilización de la pastura (frecuencia, producto y cantidad), abonaduras (tipo de materia orgánica, cantidad y frecuencia), manejo de arvenses, periodo de utilización de la pastura, periodo de descanso de la pastura y carga animal utilizada en el ramoneo (Anexo 2).

3.5.3 Densidad aparente (DA)

La densidad aparente del suelo se evaluó por el método del cilindro (Forsythe 1975). En los nueve puntos de muestreo (Figura 3), con un barrenado de cilindro de volumen conocido, se tomaron muestras de suelo sin disturbar a tres profundidades (0-20, 20-40 y 60-80 cm), ubicando el cilindro muestreador en el tercio medio de cada profundidad, luego el suelo se pasó a una bolsa plástica bien etiquetada para llevar al laboratorio; donde se secaron las muestras en una estufa de aire forzado a una temperatura de 105 °C por 24 horas, luego de lo cual se puso en desecadores para enfriar la muestra y pesarla.

El volumen del cilindro se calculó con la siguiente fórmula $V = \pi r^2 x h$. La división entre la masa del suelo seco (M_s) y el volumen del cilindro (v total) corresponde a la densidad aparente (g/cm^3) del suelo.

$$D_a = M_s/v \text{ total}$$

Para analizar el efecto de tratamientos se utilizó un análisis de varianza (ANDEVA) de parcelas divididas con muestreo, el modelo estadístico fue:

$$Y_{ijkl} = \mu + \tilde{A}_i + \tilde{a}_{k(i)} + P_j + \tilde{A}P_{ij} + e_{k(ij)} + \tilde{a}_{ijkl}$$

i = Tratamiento

j = Profundidad

k = Repetición

l = Muestra

$e_{k(i)}$ = Error de tratamiento

$e_{k(ij)}$ = Error de profundidad

\ddot{a}_{ijkl} = Error de muestreo

3.5.4 Pedregosidad

En cada uno de los puntos de muestreo (Figura 3) luego de delimitar las profundidades en estudio (0-20, 20-40 y 60-80 cm) dentro del perfil, el porcentaje de pedregosidad se evaluó por observación directa y con una regla se midió el tamaño máximo y mínimo de las piedras presentes.

3.5.5 Fertilidad

El muestreo para fertilidad de suelo se realizó en cada uno de los puntos a evaluar en los tratamientos (Figura 3) y a las tres profundidades en estudio (0-20, 20-40 y 60-80 cm). En los perfiles observables (calicatas) con ayuda de un cuchillo se delimitó el área a evaluar y se raspó hasta obtener una muestra de 400g, tratando que ésta sea representativa. En las minicalicatas la tercera profundidad se muestreó con barreno ubicando éste en el tercio medio de la profundidad en estudio. La muestra se recogió en una bolsa plástica bien etiquetada.

Las muestras tomadas en cada unidad experimental (n=9) se unieron por profundidad para formar muestras compuestas (n=45), las mismas que se enviaron al Laboratorio de Suelos del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica para realizar análisis de fertilidad: pH, Ca, Mg, K, Acidez, CICE, P, Cu, Fe, Mn y Zn.

Para analizar el efecto de tratamientos se utilizó un análisis de varianza (ANDEVA) de parcela dividida con el siguiente modelo estadístico.

$$Y_{ijk} = \mu + \tilde{A}_i + \dot{a}_{k(i)} + P_j + \tilde{A}P_{ij} + e_{k(ij)}$$

i = Tratamiento

j = Profundidad

k =Repetición

$e_{k(i)}$ = Error de tratamiento

$e_{k(ij)}$ = Error de profundidad

3.5.6 Textura

El muestreo para textura de suelo se realizó en cada uno de los puntos a evaluar (Figura 3) en los tratamientos y a las tres profundidades en estudio (0-20, 20-40 y 60-80 cm). En los perfiles observables con ayuda de un cuchillo se delimitó el área a evaluar y se raspó hasta obtener una muestra de 300g, tratando que esta sea representativa. En las minicalcatas la tercera profundidad se muestreó con barreno ubicando este en el tercio medio de la profundidad en estudio. La muestra se recogió en una bolsa plástica bien etiquetada.

Las muestras tomadas en cada unidad experimental se unieron por nivel y profundidad para formar muestras compuestas (n=135), las mismas que se etiquetó y envió al Laboratorio de Suelos del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica a realizar su respectivo análisis. Los niveles corresponden a las partes superior (NS), media (NM) y baja (NB) de los puntos de muestreo dentro del aparcamiento.

3.5.7 Biomasa de raíces finas

Debido a las características muy diferentes de crecimiento, mortalidad y función de las raíces es muy importante realizar una clasificación diamétrica en muy finas (<0.5 mm), finas (0.5-2.0 mm), pequeñas (2.0-5.0 mm), medias (5.0-10 mm), gruesas (10-20 mm), y muy gruesas (>20 mm) (Schlönvoigt *et al.* 2000).

El procedimiento utilizado para la cuantificación de biomasa de raíces finas fue el propuesto por Schlönvoigt *et al.* (2000). Este es un método directo destructivo que se basa en muestreo por área, donde con la ayuda del barreno "Goettingen" de 8 cm de diámetro por 25 cm de longitud se tomaron muestras de suelo a 20 cm del borde superior de las calicatas (1m³) a tres profundidades (0-20, 20-40 y 60-80 cm), ubicando el barreno en el tercio medio de la altura en estudio, luego estas muestras se pasaron a bolsas plásticas bien identificadas y se mantuvieron bajo refrigeración (4-7 °C) hasta realizar la extracción en el laboratorio.



Figura 4. Extracción de raíces finas (< 2mm diámetro).

Para la extracción de raíces finas en el laboratorio (Figura 4), las muestras traídas de campo se colocaron en una bandeja plástica y se homogenizaron independientemente, rompiendo todos los terrones y extrayendo las raíces gruesas y las piedras presentes en la muestra.

Del material homogenizado se tomó una submuestra de 250 a 300g (25% de la muestra total) y se colocó en un recipiente con agua durante una noche, luego al día siguiente se movió con los dedos tratando de romper todos los terrones y así dejar libres las raíces y luego se decantó por tamices de 1 y 0.5 mm, esto se realizó varias veces hasta que ya no se encontraron raíces en el suelo restante; con la ayuda de una pizeta con agua se pasaron todas las raíces de los tamices a un vaso de precipitación de 300 ml y posteriormente se separó el agua de las raíces con la ayuda de papel filtro. Las raíces se secaron en una estufa de aire forzado a 60°C hasta obtener peso constante, luego se realizaron los respectivos cálculos para reportar en toneladas por hectárea de materia seca de raíces ($t\ ha^{-1}$).

Para analizar el efecto de tratamientos se utilizó un análisis de varianza (ANDEVA) de parcelas divididas con muestreo, el modelo estadístico fue:

$$Y_{ijkl} = \mu + \tilde{A}_i + \hat{a}_{k(i)} + P_j + \tilde{A}P_{ij} + e_{k(ij)} + \hat{a}_{ijkl}$$

i = Tratamiento

j = Profundidad

k = Repetición

l = Muestra

$e_{k(i)}$ = Error de tratamiento

$e_{k(j)}$ = Error de profundidad

\ddot{a}_{ijkl} = Error de muestreo

3.5.8 Biomasa de pastos y composición botánica

Esta variable se estimó por el método de doble muestreo. Donde inicialmente se delimitó el área del aparcadero en evaluación, luego se observó la distribución del follaje en el potrero tomando en cuenta atributos como: altura, vigor, densidad de la pastura y composición de especies. Se seleccionó escalas de producción de 1 a 5 considerando 1 a los sitios con niveles de menor producción y 5 a los sitios con niveles de mayor producción. Con la ayuda de un cuadrante de 50 x 50 cm se realizaron 85 observaciones visuales en cada aparcadero. Para realizar los cálculos de biomasa de pastos se tomaron tres muestras destructivas por cada punto de la escala (15 muestras por aparcadero) y se determinó individualmente la biomasa real. Esta evaluación se realizó una por mes durante cuatro meses. Además para la composición botánica de las pasturas, se registró en cada cuadrante una evaluación de las especies existentes y el porcentaje de cobertura de éstas.

En las muestras destructivas de pasto, tomadas con el cuadrante en cada escala de calificación se registró el peso fresco, luego se tomó una submuestra representativa de aproximadamente 200 gr y se puso a secar en una estufa de aire forzado a 60 °C hasta obtener peso constante y luego se tomó el peso seco. Con los promedios de producción de materia seca de cada escala real y las cinco escalas visuales se corrió una regresión para realizar los cálculos respectivos y reportar esta variable en $t\ ha^{-1}$.

Para analizar el efecto de tratamientos se utilizó un análisis de varianza (ANDEVA) de parcela dividida con el siguiente modelo estadístico.

$$Y_{ijk} = \mu + \tilde{A}_i + \hat{a}_{k(i)} + P_j + \tilde{A}P_{ij} + e_{k(ij)}$$

i = Tratamiento

j = Cosecha

k =Repetición

$e_{k(i)}$ = Error de tratamiento

$e_{k(ij)}$ = Error de profundidad

3.5.9 Inventario de especies leñosas

En el bosque secundario la evaluación de las especies leñosas se realizó siguiendo la recomendación de Louman (2002), en parcelas rectangulares anidadas (Figura 5) de: 250m² (25 x 10 m) para fustales (árboles y palmas de 5 m de altura y DAP>10 cm), 100 m² (10 x 10 m) para latizales altos (árboles de 5 a 9.9 cm de DAP), 25 m² (5 x 5 m) para latizales bajos (a 1.5 m de altura y un DAP hasta 4.9 cm) y 4 m² (2 x 2 m) para brinzales (plántulas de 0.3-1.5 m). Se montaron tres parcelas por repetición considerando el punto central de la parcela una calicata de 1 m³.

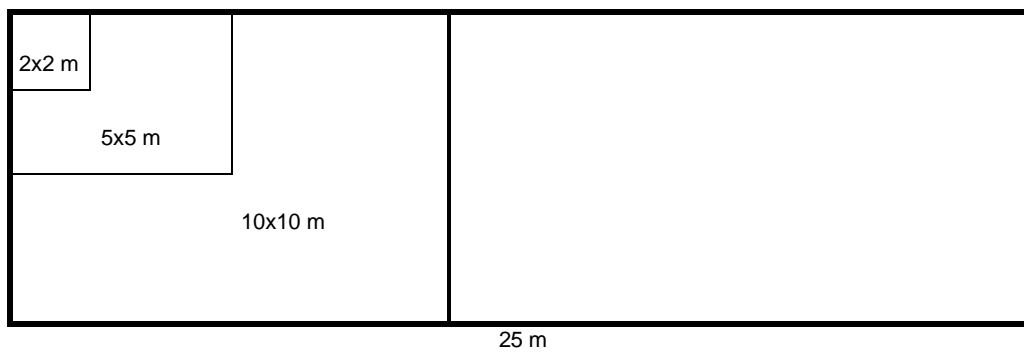


Figura 5. Croquis de disposición de las parcelas de muestreo de especies leñosas en bosque secundario.

En cada una de las parcelas se midió altura total y DAP, excepto en la parcela de brinzales que se midió únicamente altura.

En las parcelas del tratamiento pasturas mejoradas más árboles (PmA) y pasturas degradadas (Pd) se registraron todas las especies leñosas presentes en el aparto o potrero en estudio, a las que se les midió el DAP, altura del fuste, altura total, altura de la copa y área de la copa.

3.5.10 Estimación de biomasa aérea y carbono en el componente leñoso

Para estimar la biomasa aérea de las especies leñosas presentes en los tipos de uso de la tierra en estudio, se utilizaron los modelos alométricos recomendados por Ruiz (2002) para árboles en potreros (PmA y Pd) y Ferreira (2001) para bosque secundario. Luego de revisar la literatura se prefirió utilizar estos modelos ya que los autores, en la generación de sus modelos, utilizaron varias especies de las encontradas en este estudio y climáticamente las condiciones de los sitios son los que más se asemejan con nuestra zona de estudio.

Modelo alométrico para árboles en potreros Ruiz (2002):

$$LBt = -2.18062 + 0.08012(D) - 0.0006244(D^2)$$

Donde:

LBt= Logaritmo base 10 de la biomasa total ($t\ ha^{-1}$ de materia seca).

D= Diámetro a la altura del pecho (cm).

Modelo alométrico para bosque secundario Ferreira (2001):

$$\log_{10} Y = -4.4661 + 2.707 \log_{10} DAP$$

Donde:

Y = Biomasa aérea total ($t\ ha^{-1}$ de materia seca).

DAP= Diámetro a la altura del pecho (cm).

El carbono almacenado en las especies leñosas se estimó multiplicando la biomasa aérea por 0.43 para árboles en potreros, recomendado por Ruiz (2002), y 0.46 para bosque secundario recomendado por varios autores y Ferreira (2001).

3.5.11 Carbono orgánico en el suelo

En los nueve puntos de muestreo con la ayuda de un barreno se tomaron muestras de suelo sin disturbar a tres profundidades (0-20, 20-40 y 60-80 cm) (Figura 3), ubicando el cilindro muestreador en el tercio medio de cada profundidad en estudio, luego el suelo se

pasó a una bolsa plástica bien etiquetada y se llevó al Laboratorio de Suelos del CATIE a realizar el respectivo análisis.

En el laboratorio las muestras de suelo fresco fueron pasadas por un tamiz de 2 mm y se dividió en tres submuestras. En una submuestra se determinó la humedad, secando el suelo a una temperatura de 105°C durante 24 horas en una estufa de aire forzado. Otra submuestra fue secada al aire libre y se analizó carbono orgánico total por el analizador de carbono y nitrógeno y en la tercera submuestra se realizó el fraccionamiento y análisis del carbón pasivo como se explica a continuación.

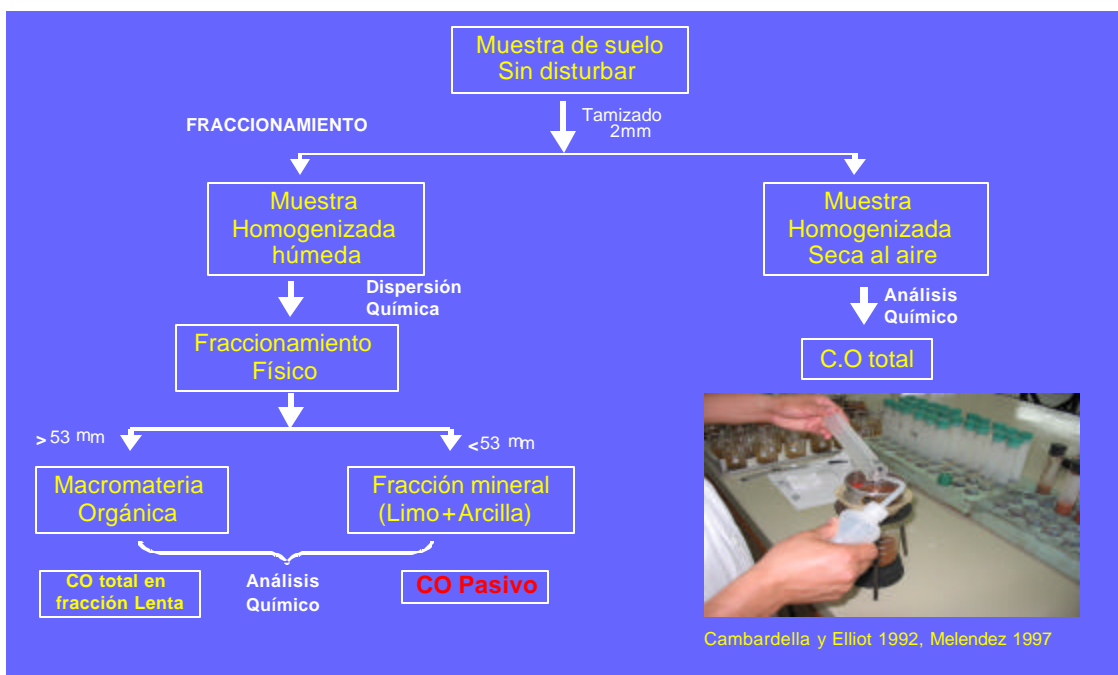


Figura 6. Fraccionamiento del carbono orgánico de suelo basado en el tamaño de partículas.

El fraccionamiento del carbono orgánico (Figura 6) se realizó combinando un método de dispersión química de suelo seguido de una separación física basada en el tamaño de partículas (Cambardella y Elliot 1992 modificado por Laboratorio de suelos CATIE).

De cada submuestra se pesó 10 gr de suelo fresco en tubos plásticos de agitación de 100 ml, luego se adicionó 30ml de solución de hexametáfosfato de sodio $\text{Na}(\text{PO}_3)_6$ de concentración 5g L^{-1} y se agitó durante 1 hora en un agitador horizontal a una velocidad de 120 rPmA. Luego del periodo de agitación se pasó la suspensión por un tamiz de 53

μm , pasando todas las partículas del tubo al tamiz; utilizando una pizeta y con pequeñas alícuotas de agua se lavaron las partículas de suelo adheridas al tubo y con una espátula de hule se desprendieron ligeramente los agregados que quedaron encima del tamiz.

La fracción de arena más la macro materia orgánica retenida sobre el tamiz de $>53 \mu\text{m}$ (carbón lento) y la fracción de materia orgánica $<53 \mu\text{m}$ (carbón pasivo) asociada a limos y arcillas, fueron recolectados en vasos de precipitación prepesados, luego se puso a secar ambas fracciones a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta obtener el peso seco. Cuando los vasos estaban secos se determinaron las cantidades de material en cada uno de ellos (Cambardella y Elliot 1992). La fracción de suelo $<53 \mu\text{m}$ fue morterizada, tamizada a $250 \mu\text{m}$ y finalmente se analizó el carbono orgánico total en un autoanalizador modelo Flash EA 1112. El funcionamiento de éste equipo se basa en una oxidación completa de la muestra dentro de un reactor de alta temperatura (aproximadamente 1800°C), transformando la muestra en una mezcla de gases. Los gases se separan a través de una columna cromatográfica la misma que está conectada a un detector de conductividad térmica (TERMO QUEST).

Para analizar el efecto de tratamientos se utilizó un análisis de varianza (ANDEVA) de parcelas divididas con muestreo, el modelo estadístico fue:

$$Y_{ijkl} = \mu + \tilde{A}_i + \hat{a}_{k(i)} + P_j + \tilde{A}P_{ij} + e_{k(ij)} + \tilde{a}_{ijkl}$$

i = Tratamiento

j = Profundidad

k = Repetición

l = Muestra

$e_{k(i)}$ = Error de tratamiento

$e_{k(ij)}$ = Error de profundidad

\tilde{a}_{ijkl} = Error de muestreo

4. Resultados y discusión

4.1 Descripción de los sistemas de uso de la tierra estudiados

Los datos que se describen a continuación son producto del análisis de la información recopilada a los productores dueños de las fincas de San Miguel de Barranca, Puntarenas a través de una encuesta (Anexo 2).

4.1.1 Pastura mejorada más árboles (PmA).

Los potreros con sistema silvopastoril (SSP) de pastura mejorada mas árboles se encontraron en una altitud entre 150 y 195 m.s.n.m, con una pendiente promedio de 30.5%, la superficie estaba entre 0.5 y 1 ha. En los últimos 15 años en estos lotes no se han producido quemadas, hasta hace tres años que se estableció la pastura mejorada *Barchiaría brizantha* estos potreros estuvieron cubiertos principalmente con gramíneas naturalizadas y nativas como: Jaragua (*Hyparrhenia rufa* Stapf.), zacate burro (*Sporobolus poiretii* Roem & Schult), jengibre (*Eleusine indica* L.), zacate violeta (*Panicum trichoides* Swartz.), zacate guacimo (*Digitaria ciliaris* Retzius Koeler), etc.

Dentro de los potreros evaluados se encontraron especies leñosas dispersas en una densidad de 113 árboles ha⁻¹, siendo estos maderables y productores de fruta y sombra para los animales, las especies mas frecuentes fueron *Cordia alliodora* y *Cordia* sp. (Boraginaceae), *Acrocomia aculeata* (Arecaceae), *Diphysa americana* (Fabaceae), *Clethra* sp. (Cletraceae), *Psidium guajaba* (Mirtaceae) y *Guazuma umbifolia* (Sterculiaceae).

El establecimiento de la pastura (*Barchiaría brizantha*) lo realizaron a inicio del invierno aplicando herbicida (Glifosato) de 30 a 40 días antes de la siembra, la misma que lo hicieron a voleo sin ningún tipo de movimiento de suelo y fertilización. Cien días después de la siembra realizaron el primer pastoreo utilizando animales pequeños y con un tiempo de utilización promedio de dos días. La fertilización de mantenimiento de la pastura realizan con Urea (46% N) en dosis de 45 Kg ha⁻¹ año⁻¹. El control de arvenses lo hacen con herbicida o en forma manual (chapia) una por año.

Debido a que en la zona se dan dos estaciones (seca y lluviosa) muy marcadas los productores dan diferente manejo a la pastura en términos de utilización, recuperación y carga animal utilizada. En la época lluviosa las pasturas son manejadas bajo pastoreo rotativo con un tiempo de utilización de 8 a 10 días y 15 a 22 días de recuperación, utilizando una carga animal de 10 - 12 animales ($1.8-2 \text{ UA ha}^{-1}$). Mientras que en la época seca las pasturas son utilizadas continuamente, los potreros no se cierran, es decir los animales van a voluntad a los diferentes potreros, la carga animal utilizada es de 6 a 8 animales ($1.3-1.5 \text{ UA ha}^{-1}$). Los animales pastoreados son bovinos mestizos de doble propósito.

4.1.2 Pastura degradada (Pd).

Los potreros con pastura degradada evaluados se encontraron en una altitud entre 160 y 195 m.s.n.m, con una pendiente promedio de 28%, la superficie estaba entre 0.5 y 2 ha. En los últimos 15 años en estos lotes no se han producido quemadas. Durante este tiempo los potreros han permanecido cubiertos con gramíneas nativas y naturalizadas, principalmente jaragua (*Hyparrhenia rufa* Stapf.), zacate burro (*Sporobolus poiretii* Roem & Schult), jengibre (*Eleusine indica* L.), zacate violeta (*Panicum trichoides* Swartz.), zacate guacimo (*Digitaria ciliaris* Retzius Koeler), etc. En estos lotes se encontraron muy pocas especies leñosas dentro del potrero ($3 \text{ individuos ha}^{-1}$), las especies encontradas fueron *Psidium guajaba* (Mirtaceae), *Acrocomia aculeata* (Arecaceae), *Guazuma umbifolia* (Sterculiaceae).

Al igual que en el sistema de PmA, el manejo a la pastura en términos de utilización, recuperación y carga animal utilizada fueron manejados en la época lluviosa bajo pastoreo rotativo con un tiempo de utilización de 18 a 20 días y 30-35 días de recuperación de la pastura utilizando una carga animal de 12 animales (1.8 UA ha^{-1}). Mientras que en la época seca los potreros no se cierran, la carga animal utilizada es de 3-5 animales (1.2 UA ha^{-1}). La producción de forraje en esta época es muy baja, y en ésta época suplementan con bancos de energía y proteína.

En este sistema no se aplica fertilizante químico y el control de arvenses se realiza en forma manual cada 2 años. La cobertura del suelo al momento de la selección (marzo 2003) de las parcelas a evaluar fue del 50-60%, el 40% restante estaba descubierto

observándose rasgos de erosión hídrica y eólica de suelo; Se observó además un alto porcentaje de arvenses (30-40%). Estas características hicieron que lo consideremos como pasturas degradadas.

4.1.3 Bosque secundario (Bs).

El bosque secundario estudiado se encontró entre 160 y 200 m.s.n.m, con una pendiente de 23 a 55%, la edad aproximada estaba entre 15 y 25 años, durante este tiempo no se han producido quemadas. Las familias encontradas con mayor frecuencia fueron Fabaceae, Rubiaceae, Flacourtiaceae, Bignoniaceae y Myrtaceae. No existe pastoreo dentro del bosque y se observa rasgos de erosión de suelo de tipo laminar.

4.2 Densidad aparente de suelo (DA)

En estudios de carbono en suelo es muy importante conocer la densidad aparente (DA) de éste ya que una de las formas de reportar el contenido de carbono es por unidad de volumen. En el análisis realizado se encontró diferencias estadísticas significativas únicamente para profundidad ($p < 0.0001$ y un F de 67.06). Sistema y la interacción sistemas*profundidad no presentaron diferencias estadísticas (Anexo 3).

A pesar de no haber encontrado diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre sistemas de uso de la tierra, la Figura 7 muestra la tendencia de DA del suelo en estos sistemas. Se observa que en las profundidades 0-20 y 20-40 cm el suelo bajo bosque secundario (Bs) presentó la menor densidad, mientras que el sistema bajo pastura degradada (Pd) presentó la densidad mayor en las tres profundidades y el sistema con pastura mejorada más árboles (PmA) expuso una densidad intermedia entre los dos sistemas anteriores. Esto posiblemente se debe a la disminución del contenido de materia orgánica y el contenido de raíces finas a lo largo del perfil de suelo. Estos datos se relacionan con los contenidos de biomasa de raíces finas encontrados a lo largo del perfil de suelo en éste estudio (Figura 8, pg 38).

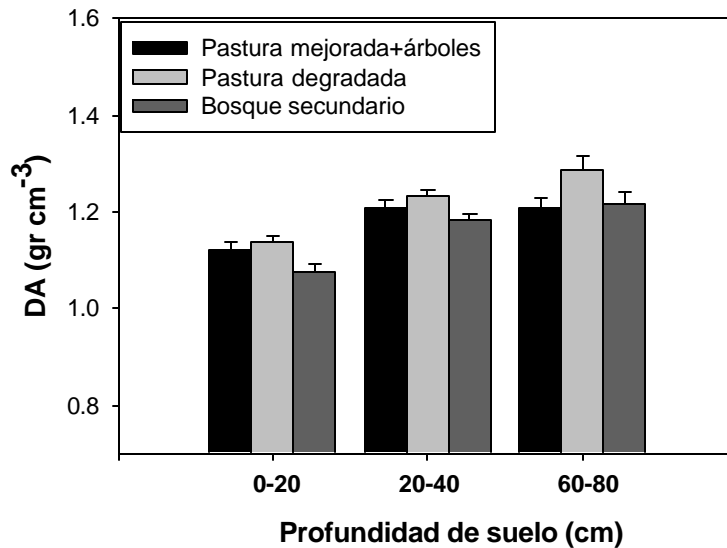


Figura 7. Densidad aparente de suelo a tres profundidades en tres tipos de uso de la tierra de fincas ganaderas. San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.

El incremento de materia orgánica tiende a disminuir la densidad aparente del suelo, debido a que sus componentes son menos densos que los componentes minerales (Henríquez 1999), con estos resultados encontrados se espera que haya una relación inversamente proporcional entre el contenido de carbono y la profundidad.

4.3 Fertilidad de suelo

Existen 16 nutrimentos que se consideran esenciales para el desarrollo vegetal, estos se encuentran tanto en el aire como en el suelo y su disponibilidad es muy importante para el desarrollo de las plantas.

El pH del suelo en los tres tipos de uso de la tierra en estudio presentó un promedio de 5.28 valor considerado bajo para suelos de Costa Rica. Estos datos se encuentran dentro de los rangos observados por Berstch (1995) para suelos tropicales de Centroamérica. El ANOVA realizado encontró que el tipo de uso de la tierra con Bs difiere estadísticamente ($p < 0.001$) de PmA y Pd (Anexo 4), presentando estos últimos un menor grado de pH (Cuadro 4). Esto posiblemente se debe a la producción constante de iones ácidos generados por los exudados radicales y la mineralización de la materia orgánica (Bertsch

1995) presente en los sistemas bajo pastura y además a una probable lixiviación de bases por efecto de las fuertes lluvias caídas en la zona.

Se encontró también diferencias estadísticas ($p < 0.001$) entre profundidades de suelo, presentando la capa superficial de suelo (0-20 cm) el menor grado de pH (5.11), mientras que las capas inferiores (20-40 y 60-80 cm) son estadísticamente parecidas (Cuadro 5). Estos datos refuerzan a lo indicado anteriormente sobre la posible mayor concentración de exudados radicales en la capa superficial del suelo debido a la presencia de una mayor cantidad de raíces finas (Figura 8b, Pg 38).

A pesar de presentar éstos suelos un pH bajo, el grado de acidez se encuentra dentro de un rango que para los suelos de Costa Rica es considerado bajo (0.2 cmol L^{-1}), lo cual indica que posiblemente el material parental de éste es de origen calcáreo.

El Calcio (Ca) la literatura indica que una concentración entre $4-20 \text{ cmol L}^{-1}$ de (Ca) es adecuada para suelos de Costa Rica; en nuestro estudio las concentraciones de éste elemento son altas, probablemente el materia parental de estos suelos es de origen calcáreo. El Ca en éste estudio fue estadísticamente diferente ($p < 0.001$) entre los sistemas de uso de la tierra (Anexo 4). La mayor concentración presentó el suelo bajo el sistema Bs, luego se encontraron los sistemas Pd y PmA presentando 36 y 44% menos Ca (Cuadro 4). Esta disminución de la concentración de Ca en el suelo bajo los sistemas de pasturas se debe posiblemente a las pérdidas ocasionadas por el intemperismo ya que el suelo en estos sistemas se encuentra muy poco protegido y al ser el Ca uno de los elementos muy sensibles a pérdidas por percolación o lixiviación, las posibilidades de pérdidas es muy alta. Bertsch (1995) manifiesta que en un estudio realizado en Colombia obtuvieron pérdidas de Ca mayores de $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en suelos desnudos y de aproximadamente $0.66 - 0.75 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en tierras con coberturas vegetales.

Cuadro 4. Promedios de variables de fertilidad de suelo en tres tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.

Sistemas	pH	Ca	CICE	Cu	Fe
		cmol(+)L		mg L ⁻¹	
PmA	5.10 ± 0.16 b	20.13 ± 4.29 b	30.99 ± 9.75 b	15.68 ± 5.36a	70.28 ± 38.66 a
Pd	5.26 ± 0.28 b	23.22 ± 7.08 b	33.65 ± 10.40 b	12.42 ± 2.58a	49.97 ± 35.31ab
Bs	5.48 ± 0.19 a	36.25 ± 7.30 a	49.68 ± 6.84a	7.04 ± 2.59 b	26.64 ± 18.89 b

± Desviación estándar.

Medias con igual letra no difieren significativamente (Duncan $p < 0.05$)

PmA = Pastura mejorada más árboles.

Pd = Pastura degradada.

Bs = Bosque secundario.

Se encontró diferencias estadísticas significativas ($p < 0.001$) para la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) de los suelos en los tres tipos de uso de la tierra en estudio (Anexo 4). El sistema Bs presentó el mayor promedio (49.676 cmol (+) L⁻¹), lo cual le hizo diferente de PmA y Pd que presentaron 37.6 y 32 % menos CICE (Cuadro 4). A pesar de esta diferencia encontrada los promedios de los tres sistemas se encuentran en un nivel alto de acuerdo a la guía de interpretación de resultados utilizada por el departamento de Suelos del CATIE y Bertsch (1995). Una CICE alta es un indicador de buena fertilidad de suelo cuando únicamente cuando sus bases están balanceadas. Esto es importante cuando hablamos de captura de carbono ya que al existir una buena disponibilidad de nutrientes en el suelo las plantas van a crecer vigorosas con una buena área foliar, van a fotosintetizar al máximo de su potencial y de esta forma capturarán mayor cantidad de carbono en sus tejidos.

Los niveles de Potasio (K) adecuados para los suelos de Costa Rica esta entre 0.2 a 0.6 cmol(+)L⁻¹ (Bertsch, 1995), en este estudio se encontraron contenidos bajos. La concentración de K en el suelo no fue estadísticamente diferente entre sistemas de uso de la tierra, pero sí presentó diferencias estadísticas entre profundidades (Anexo 4). En la profundidad superficial (0-20 cm) se encontró el mayor promedio (0.110 cmol (+) L⁻¹), lo cual hace diferente estadísticamente de las profundidades 20-40 y 60-80 cm (Cuadro 5). Esto posiblemente se encontró por la mayor cantidad de restos vegetales en descomposición presentes en la capa superficial del suelo, ya que la concentración del K

en la solución de suelo depende de la cantidad de restos vegetales presentes, debido a que el K está altamente concentrado en los tejidos de las plantas (Bertsch, 1995).

El fósforo (P), al igual que el K, en el suelo, no presentó diferencias estadísticas significativas entre sistemas de uso de la tierra (Anexo 4), pero sí entre profundidades de suelo. La profundidad superficial 0-20 cm presentó la mitad de concentración de éste nutrimento ($p < 0.001$) con relación a las profundidades 20-40 y 60-80 cm (Cuadro 5). Esta disminución posiblemente se deba a la extracción del nutrimento ocasionado por las raíces finas (Figura 8, pg 38) que se desarrollaron en esa capa de suelo y también por un efecto combinado entre la pendiente ($> 30\%$) y las fuertes lluvias caídas en la época de invierno, lo cual ocasionaron una fuerte erosión de los suelos.

Cuadro 5. Promedios y/o comparación múltiple de Duncan al 5% entre profundidades del suelo para variables de fertilidad en tres tipos de uso de la tierra de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003. (n=5).

Tratamiento * profundidad	pH	K	P	Cu	Fe
		cmol(+)L	mg L ⁻¹		
PmA 0-20 cm	4.97 ± 0.18	0.12 ± 0.07	2.92 ± 0.93	11.84 ± 3.98	73.40 ± 46.74
Pd 0-20 cm	4.95 ± 0.16	0.09 ± 0.06	2.60 ± 0.93	9.66 ± 0.85	45.06 ± 43.12
Bs 0-20 cm	5.41 ± 0.20	0.11 ± 0.03	2.58 ± 0.54	5.26 ± 1.46	9.74 ± 1.33
Prom 0-20 cm	5.11 ± 0.28 b	0.11 ± 0.05 a	2.70 ± 0.78 b	8.92 ± 3.66 b	42.73 ± 43.39 b
PmA 20-40 cm	5.14 ± 0.12	0.08 ± 0.06	6.04 ± 2.68	17.26 ± 5.69	90.98 ± 40.32
Pd 20-40 cm	5.39 ± 0.12	0.08 ± 0.01	5.22 ± 2.88	13.60 ± 1.27	57.64 ± 34.85
Bs 20-40 cm	5.49 ± 0.09	0.10 ± 0.04	4.20 ± 1.32	8.28 ± 3.02	41.62 ± 23.91
Prom 20-40 cm	5.34 ± 0.18 a	0.09 ± 0.04 b	5.15 ± 2.35 a	13.05 ± 5.19 a	63.41 ± 37.79 a
PmA 60-80 cm	5.18 ± 0.11	0.08 ± 0.06	5.10 ± 1.18	17.94 ± 4.93	46.46 ± 12.78
Pd 60-80 cm	5.44 ± 0.24	0.08 ± 0.04	5.38 ± 1.75	14.00 ± 2.53	47.20 ± 34.28
Bs 60-80 cm	5.55 ± 0.24	0.08 ± 0.03	5.30 ± 0.97	7.58 ± 2.46	28.56 ± 5.81
Prom 60-80 cm	5.39 ± 0.25 a	0.08 ± 0.04 b	5.26 ± 1.25 a	13.17 ± 5.49 a	40.74 ± 21.72 b

Letras iguales dentro de la columna no difieren significativamente (Duncan $p < 0.05$).

± = Desviación estándar.

PmA = Pastura mejorada mas árboles.

Pd = Pastura degradada.

Bs = Bosque secundario.

Prom = Promedio.

El contenido de cobre (Cu) en el suelo no difiere estadísticamente en los tipos de uso de la tierra bajo pasturas (PmA y Pd), pero sí al comparar con Bs. Existe también un efecto de la profundidad de suelo (Anexo 5), encontrando la mayor concentración en las capas inferiores (20-40 y 40 a 100 cm) y la menor concentración en la capa superficial (Cuadro 5). Esto posiblemente se debe por un efecto de una mayor cantidad de materia orgánica presente en el Bs y en la capa superficial de suelo, ya que existe menor disponibilidad del Cu en suelos con alto contenido de materia orgánica (Kass 1996).

El hierro (Fe) presentó diferencias estadísticas tanto en sistemas de uso de la tierra como en profundidades (Anexo 5). El suelo del sistema bajo PmA (70.28 mg L^{-1}) es diferente estadísticamente al suelo de Bs (26.64 mg L^{-1}), mientras que el suelo bajo Pd (49.97 mg L^{-1}) no difiere de los dos anteriores. En cuanto a profundidades, la intermedia de 20-40 cm presentó el mayor promedio (63.413 mg L^{-1}) en comparación con la profundidad superficial (0-20 cm) y la de 60-80 cm. Estas variaciones se debe a que la disponibilidad del Fe esta muy relacionado con el pH y la aireación del suelo, es decir cuando un suelo tiene grado de aireación y el pH alto la disponibilidad de Fe es menor (Kass 1996). Situación que coincide con nuestros datos (Cuadro 5). A pesar de los rasgos de erosión laminar que se observó en el suelo bajo Bs éste presentó los promedios mas altos en la mayoría de las variables de fertilidad, lo cual hace que presente una mejor fertilidad en comparación con PmA y Pd.

4.4 Textura de suelo

Conocer la granulometría del suelo es esencial en estudios de carbono orgánico en suelo ya que la fracción pasiva de carbono se encuentra asociada a la parte mineral del suelo (limo y arcilla) (Cambardella y Elliot 1992). En la presente investigación se evaluó el efecto del sistema de uso de la tierra sobre los contenidos de arena, limo y arcilla en términos de profundidad y nivel (superior, medio e inferior) ubicados en sentido de la pendiente.

El contenido de arena (50-200 micras) no fue estadísticamente diferente para sistemas de uso de la tierra en ninguno de los niveles de muestreo y profundidades, a excepto del nivel inferior (NI) a la profundidad de 60-80 cm que presentó diferencias estadísticas significativas, PmA presentó el menor contenido (21.28%) en comparación a Pd (36.55 %)

y Bs (39.95%) que no fueron diferentes entre ellos (Cuadro 6). Esto posiblemente se dio a que los suelos bajo Pd y Bs sufrieron pérdida por erosión de parte del perfil superficial, lo cual hizo que las muestras se tomen a una mayor profundidad dentro y probablemente a ésta altura se encuentra partículas gruesas del material parental.

Cuadro 6. Promedios de sistemas*nivel en contenido de arena, limo y arcilla de suelo bajo pasturas mejoradas más árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs) a tres profundidades. San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003. (n=5).

Nivel	Sistema	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase de textura
0-20 cm					
NS	PmA	46.73 ± 18.31 a	21.83 ± 8.74 a	31.44 ± 11.01 a	Franco arcillo arenoso
	Pd	31.20 ± 15.55 a	31.50 ± 5.15 a	37.75 ± 11.80 a	Franco arcilloso
	Bs	35.23 ± 8.11 a	28.70 ± 4.39 a	36.07 ± 8.12 a	Franco arcilloso
NM	PmA	42.65 ± 17.00 a	23.33 ± 11.97 a	34.02 ± 8.71 a	Franco arcillo arenoso
	Pd	35.28 ± 15.81 a	30.48 ± 3.21 a	34.24 ± 12.74 a	Franco arcilloso
	Bs	29.73 ± 9.56 a	29.70 ± 3.25 a	40.57 ± 8.06 a	Arcilloso
NI	PmA	51.80 ± 23.13 a	19.18 ± 8.97 b	29.02 ± 16.65 a	Franco arcillo arenoso
	Pd	46.20 ± 6.86 a	25.55 ± 2.97 ab	28.24 ± 5.66 a	Franco arcilloso
	Bs	39.15 ± 5.20 a	30.78 ± 4.07 a	30.07 ± 6.4 1 a	Franco arcilloso
20-40 cm					
NS	PmA	43.00 ± 12.71 a	15.40 ± 8.38 b	41.60 ± 9.00 a	Arcilloso
	Pd	31.20 ± 9.95 a	24.55 ± 4.87 a	44.24 ± 10.31 a	Arcilloso
	Bs	33.65 ± 11.68 a	27.28 ± 3.67 a	39.07 ± 9.92 a	Franco arcilloso
NM	PmA	37.35 ± 15.22 a	17.55 ± 7.55 b	45.10 ± 9.49 a	Arcilloso
	Pd	35.35 ± 9.15 a	27.90 ± 5.81 a	36.74 ± 9.43 a	Franco arcilloso
	Bs	30.45 ± 4.47 a	27.55 ± 2.25 a	42.00 ± 2.43 a	Arcilloso
NI	PmA	36.35 ± 18.36 a	16.48 ± 10.13 b	47.17 ± 11.27 a	Arcilloso
	Pd	33.48 ± 10.60 a	29.05 ± 5.16 a	37.47 ± 7.58 a	Franco arcilloso
	Bs	36.38 ± 11.53 a	27.20 ± 3.24 a	36.42 ± 9.81 a	Franco arcilloso
60-80 cm					
NS	PmA	31.93 ± 13.62 a	22.48 ± 5.19 a	45.59 ± 16.98 a	Arcilloso
	Pd	28.63 ± 11.78 a	23.48 ± 20.48 a	47.89 ± 15.53 a	Arcilloso
	Bs	34.38 ± 15.15 a	27.20 ± 4.78 a	38.42 ± 14.26 a	Franco arcilloso
NM	PmA	32.43 ± 17.55 a	15.33 ± 7.83 b	52.24 ± 18.05 a	Arcilloso
	Pd	20.48 ± 9.08 a	21.40 ± 4.35 ab	58.12 ± 10.44 a	Arcilloso
	Bs	40.38 ± 13.66 a	25.70 ± 2.10 a	33.92 ± 14.04 a	Franco arcilloso
NI	PmA	21.28 ± 5.04 b	23.98 ± 6.73 a	54.74 ± 8.96 a	Arcilloso
	Pd	36.55 ± 13.70 a	22.48 ± 5.68 a	40.97 ± 17.21 a	Arcilloso
	Bs	39.95 ± 8.56 a	23.55 ± 4.22 a	36.49 ± 7.25 a	Franco arcilloso

N(S,M,I) = Nivel (superior, medio e inferior) del aparto según la dirección de la pendiente.

± = Desviación estándar.

Letras iguales dentro de la columna en cada nivel no difieren significativamente (Duncan p<0.05).

El contenido de limo (2-50 micras) presentó diferencias estadísticas significativas entre sistemas de uso de la tierra en el nivel inferior (NI) de la profundidad 0-20 cm presentando la mayor concentración el sistema Bs (30.78%) y el menor contenido el sistema PmA (19.18%); el sistema Pd se encontró en un rango intermedio entre los sistemas anteriores (Cuadro 6). En la profundidad de 20-40 cm en los tres niveles evaluados, PmA presentó los menores promedios y es estadísticamente diferente a Pd y Bs, presentando éstos los mayores promedios (Cuadro 6). Estos datos nos rebelan una posible pérdida del horizonte superficial por erosión, en los tratamientos Pd y Bs ya que al perder partículas gruesas de la parte superficial del suelo existe una mayor concentración de partículas finas (limos y arcillas).

En el caso del contenido de arcilla (< 2 micras) en el suelo, el análisis estadístico no encontró diferencias significativas para tipos de uso de la tierra en los diferentes niveles evaluados. La clase textural de los suelos de los sistemas estudiados se observa una transición de Franco arcilloso arenosos a Franco arcilloso en la profundidad superficial (0-20 cm), esta transición puede estar dada por efecto de erosión de la capa superficial del perfil. Y en las profundidades de 20-40 y 60-80 cm predomina una textura arcillosa (Cuadro 6).

Es importante indicar que a pesar que no se observan diferencias estadísticas significativas entre sistemas de uso de la tierra en los niveles evaluados, estos como tal indican un efecto de la pendiente del suelo en la primera profundidad ya que la tendencia de los contenidos de arcilla va decreciendo de un nivel superior hacia el nivel inferior. Además es importante indicar que los contenidos de arcilla presentan una tendencia directamente proporcional con la profundidad, debido a la traslocación de las partículas de arcilla desde la parte superficial hacia las partes bajas del perfil de suelo, éste comportamiento es normal en suelos tropicales.

La textura del suelo es una propiedad muy importante ya que esta relacionada en forma directa con la mayoría de las propiedades físicas del suelo y tiene una influencia muy grande por medio de su componente arcilla sobre el carbono orgánico, propiedades químicas y biológicas del suelo. La captura de carbono estable en suelo se da a través de una protección física, es decir, un encapsulado de los fragmentos de la materia orgánica por las partículas de arcilla y una protección química o por uniones especiales de la

materia orgánica con otros constituyentes el suelo (coloides o arcillas) (Balesdent *et al.* 2000).

4.5 Biomasa de raíces finas

La estimación de biomasa de raíces es importante en proyectos de fijación de carbono, ya que éstas representa entre un 10 y 40% de la biomasa total de la planta (MacDiken 1997). En la mayoría de los protocolos de monitoreo de fijación de carbono en proyectos forestales, se considera las raíces finas como las de diámetro menor a 2.0 mm, siendo éstas las más estudiadas por su cambio permanente y de intensidad periódica que aporta materia orgánica al suelo (MacDiken 1997; Snowdon *et al.* 2001).

En la presente investigación se evaluó biomasa de raíces finas (BMRF) por el método destructivo. Posteriormente se hizo un análisis de varianza para un diseño de parcelas divididas con muestreo, donde la parcela grande fue el sistema y la parcela pequeña las profundidades; en éste análisis se encontró diferencias estadísticas significativas únicamente para profundidades ($p < 0.0001$ y un F de 53.14), mientras que sistemas y la interacción sistemas*profundidad no fueron diferentes estadísticamente (Anexo 7).

Dado que no se encontró diferencias estadística significativas para sistemas de uso del suelo con el modelo anterior, se corrió un análisis para sistemas dentro de cada profundidad; éste igualmente no encontró diferencias estadísticas. Lo cual nos indica que los tres sistemas de uso del suelo contienen cantidades parecidas de BMRF (Figura 8a). Se puede decir que las diferencias encontradas no son suficientes para rechazar la hipótesis en estudio, esto se debe a la alta variabilidad de los datos existentes posiblemente por el bajo número de repeticiones ($n=5$), o también puede deberse a la época de muestreo (inicio de la época lluviosa), lo cual estimuló una reacción fenológica del sistema radicular. Dado que de las plantas al encontrar bajos contenidos de humedad en el suelo, hay un estímulo en el desarrollo de raíces finas (Van Kanten, 2003).

La comparación múltiple de Duncan con un α del 5% para la variable profundidad de suelo (Figura 8b), encontró que de 0-20 cm ($1863.5 \text{ kg ha}^{-1}$) es significativamente mayor a las profundidades 20-40 y 40-60 cm (685.2 y 652.6 kg ha^{-1}) y éstas últimas son estadísticamente iguales. Esto indica que el 58.2% de las raíces finas evaluadas se encontraron en la

profundidad superficial (0-20 cm), el 21.4% en la segunda profundidad (20-40 cm) y el 20.3% de las raíces evaluadas se encontraron en la profundidad de 40 a 60 cm. Este estudio reveló que la concentración de mayor densidad de raíces finas ocurre en las capas superficiales del suelo, con una tendencia de disminución exponencial conforme se profundiza en el suelo (Hughes y Gandar, citado por Morales 1997), estos datos son parecidos a los reportados en la literatura (Persson 1983; Nepstad, *et. al*, 1994; Morales, 1997; Kent, 2000, Schaller 2001) para especies arbóreas, arbustivas y pastos. Seguramente en la capa superficial de suelo existe una mayor disponibilidad de nutrimentos para la nutrición de las plantas en comparación con las capas mas profundas, es importante también tomar en cuenta que Pd presentó la mayor densidad aparente de suelo, aunque no es significativa puede estar afectando el desarrollo de raíces finas.

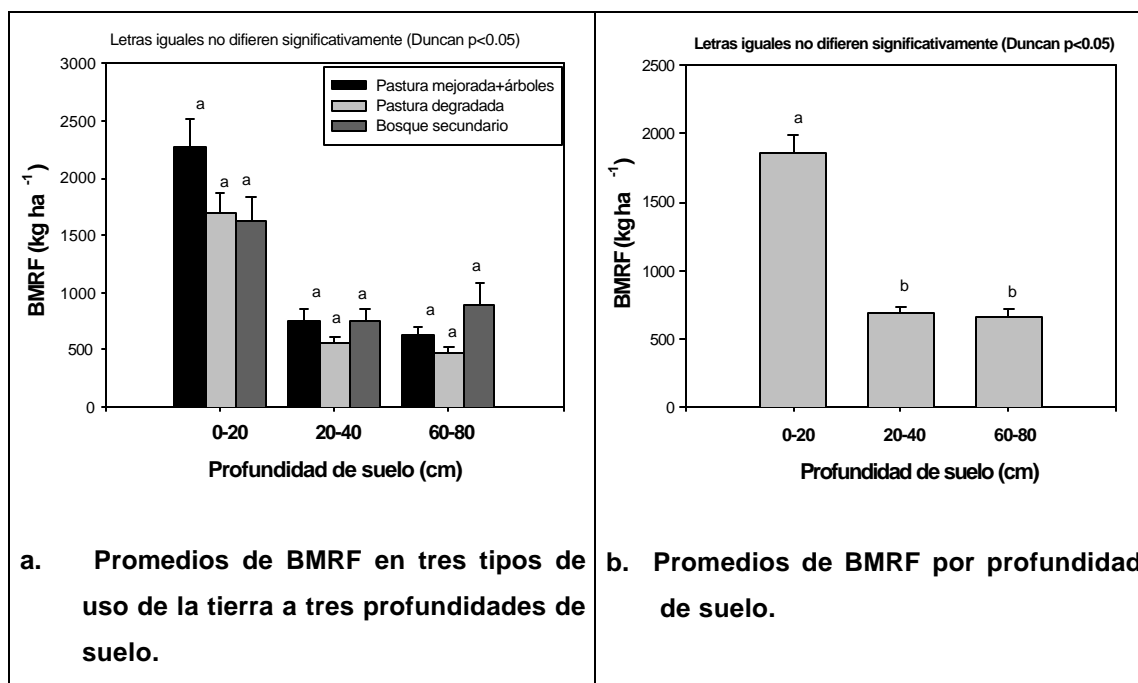


Figura 8. Biomasa de raíces finas (BMRF) a tres profundidades de suelo en pasturas mejoradas, pasturas degradadas y bosque secundario en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.

4.6 Composición del componente leñoso en Pasturas mejoradas con árboles (PmA) y Bosque secundario (Bs).

Se realizó un censo de las especies forestales presentes dentro de los potreros o apartos con pasturas mejoradas (PmA). En los cinco potreros inventariados se contabilizaron 23

especies diferentes de 13 familias (Anexo 8). En términos de diversidad de especies las familias mejor representadas fueron: Fabaceae (7), Bignonaceae (3), Boraginaceae (2) y Anacardiaceae (2), las familias restantes presentaron una sola especie (Figura 9).

En términos de abundancia las especies de mayor frecuencia en los potreros fueron laurel (*Cordia alliodora*) y muñeco (*Cordia collococa*) de la familia Boraginaceae que representaron el 23% del total de individuos encontrados (Figura 9), coyol (*Acrocomia aculeata*- Arecaceae) 19%, guachipelin (*Diphysa americana*- Fabaceae) 17%, nance (*Clethra* sp.- Cletraceae) 13%, guayabo (*Psidium guajaba* - Mirtaceae) 5%, guácimo (*Guazuma umbifolia* - Sterculiaceae) 4% y el restante 19% lo conformaron las 17 especies restantes. La densidad promedio fue de 108 fustales (>10 cm DAP), 8 latizales altos (5 - 9.9 cm DAP) y 1 latizal bajo (2-4.9 cm DAP) con un total de 117 árboles ha⁻¹.

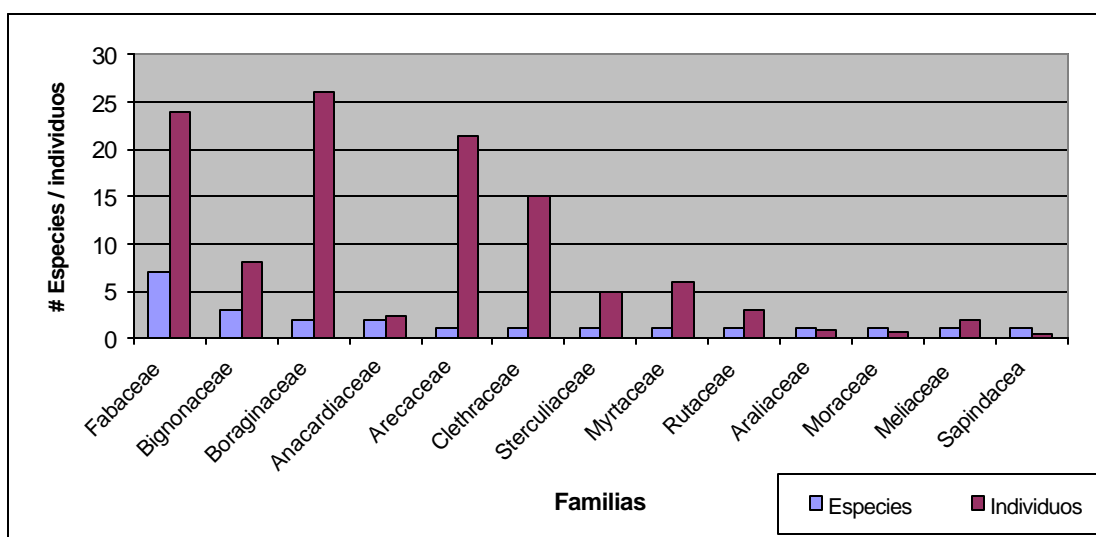


Figura 9. Diversidad y abundancia del componente leñoso en potreros con pasturas mejoradas en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE 2003.

Aunque Fabaceae y Bignoceae presentaron la mayor diversidad de especies en los potreros, la familia de mayor frecuencia fue Boraginaceae con su principal representante *Cordia alliodora*. Esto nos indica la relevancia que tiene el componente arbóreo dentro de la finca, el 40% de la cobertura son especies maderables, las mismas que son muy importantes en la generación de ingresos adicionales y el 60 % restante son especies

utilizadas como fuente de leña, frutos y sombra para el ganado (Harvey y Haber 1999; Stokes 2001).

La estructura del bosque secundario (Bs) fue muestreada en parcelas anidadas divididas en 3 estratos. Se encontró un total de 52 especies diferentes pertenecientes a 25 familias (Anexo 9). El mayor número de especies presentó Fabacea (11), seguido de la Rubiaceae (5), Flacourtiaceae (4), Bignonaceae, Myrtaceae, Anacardiaceae, Apocynaceae, Aricaceae, Boraginaceae, Sapindaceae y Anonaceae (2), las 14 familias restantes presentaron una sola especie (Figura 10).

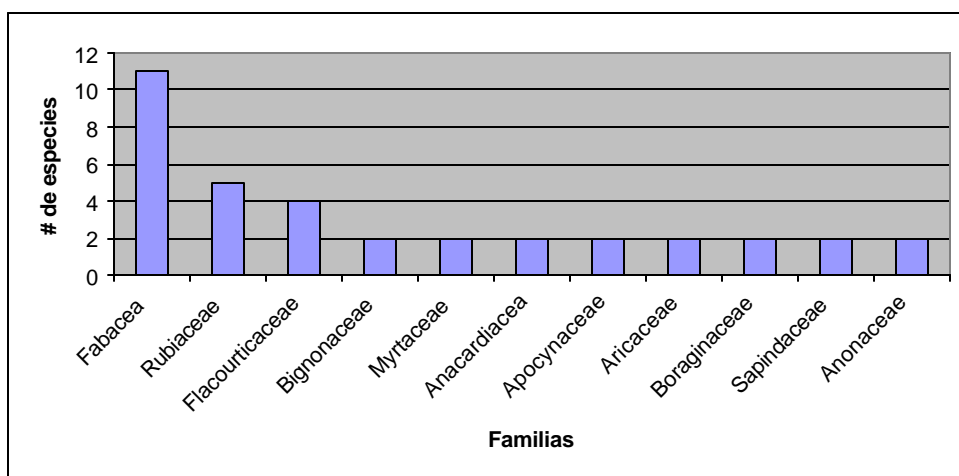


Figura 10. Distribución de las familias de acuerdo al número de especies encontradas en bosque secundario de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE 2003.

En cuanto a abundancia, el 77% del total de individuos encontrados pertenecieron a 6 familias y el 23% de los individuos correspondieron a 20 familias. Fabaceae fue la de mayor abundancia cubriendo el 33% del total de individuos observados, seguido de Boraginaceae 12%, Sapindaceae 11%, Rubiaceae 8% y Sterculiaceae 7%. El resto de familias presentaron pocos individuos, menor al 5% del total (Figura 11). La densidad promedio fue de 552 fustales (>10 cm DAP), 840 latizales altos (5-9.9 cm DAP) y 2160 latizales bajos (2-4.9 cm de DAP).

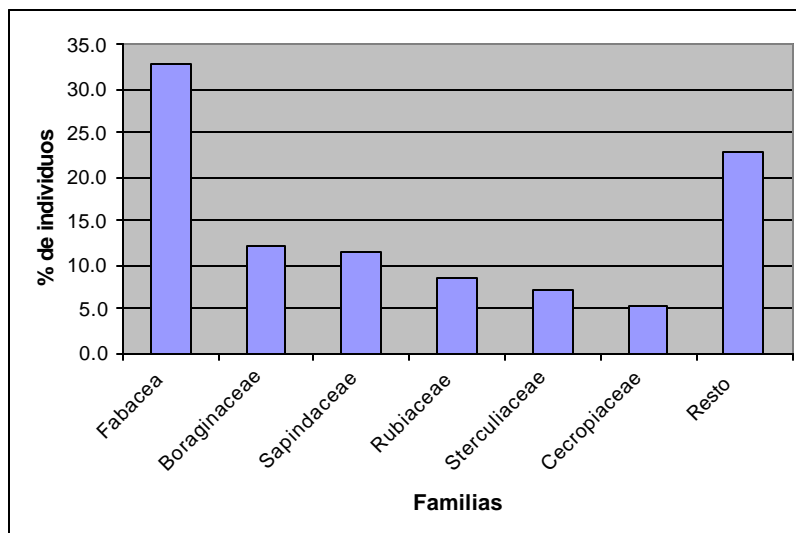


Figura 11. Distribución de las familias de acuerdo al número de individuos encontradas en bosque secundario de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE 2003.

4.7 Biomasa aérea del componente leñoso y pastos

4.7.1 Componente leñoso

La biomasa aérea es uno de los centros principales de almacenamiento de carbono, donde se encuentra por diferentes periodos. Para estimar la biomasa aérea en los sistemas de uso del suelo, en estudio, se utilizaron modelos alométricos; posteriormente se hicieron análisis de varianza para un diseño irrestrictamente al azar (DIA). Donde se encontró que los sistemas de uso de la tierra son estadísticamente diferentes ($p < 0.0001$), donde PmA presentó tres veces menos biomasa aérea que Bs y 49 veces más que Pd (Figura 12). Esta diferencia en el contenido de biomasa aérea esta muy relacionada con el número de individuos presentes en cada sistema; en Pd se encontró la menor cantidad de biomasa aérea del componente leñoso posiblemente por el tiempo que está la tierra con éste tipo de uso y por el poco cuidado que tiene los productores con estos lotes ya que cuando necesitan madera o leña prefieren utilizar los árboles existentes en potreros con Pd. Además la mayoría de las Pd se encuentran en lotes que anteriormente hacían agricultura.

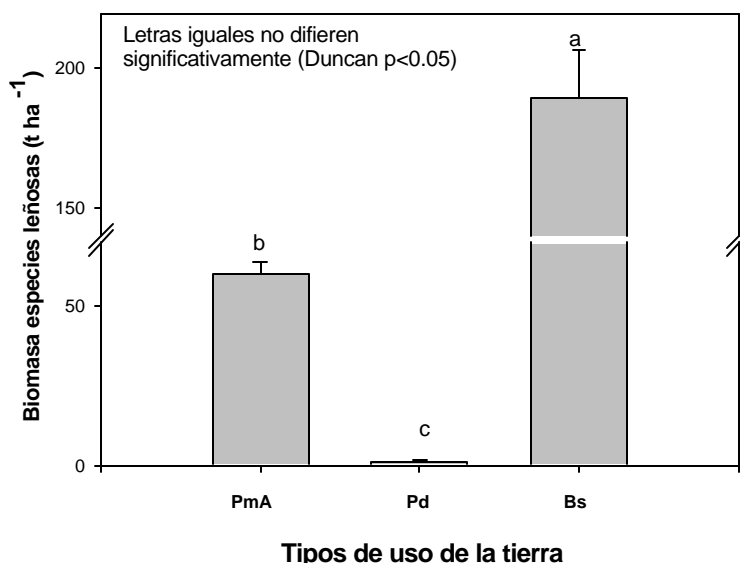


Figura 12. Promedios de biomasa aérea del componente leñoso en pasturas mejoradas con árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs) de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE 2003. (Duncan $p < 0.05$)

Los datos de Bs fueron superiores a los reportados por Ferreira (2001) en zonas parecidas, pero están dentro de los rangos encontrados por Brown (1989), Alves *et. al.* (1997) y López *et. al.* (2001). De igual forma, los promedios de biomasa arbórea en PmA es superior a los reportados por Andrade (1999), Mora (2001) y Ruiz (2002) en estudios realizados en sistemas silvopastoriles, esto posiblemente se da por la presencia de un alto porcentaje (92%) de fustales (>10 cm DAP) dentro del potrero, cosa que no sucede en los trabajos antes mencionados.

En el Cuadro 7 se presentan los promedios de biomasa aérea del componente leñoso de cada una de las clases diamétricas evaluadas. Donde se puede observar que sobre el 97% de biomasa total se encontró en fustales; y los sistemas que presentaron el mayor promedio fueron Bs y PmA. Luego se encontraron los latizales altos 1% en PmA y 2.6% en Bs y finalmente la biomasa encontrada en los latizales bajos es menor al 1%. Estos datos nos indican el potencial que tienen los sistemas silvopastoriles para secuestrar carbono en su componente leñoso, aunque no en las mismas cantidades que lo hace un bosque secundario pero sí muy superior a pasturas degradadas.

Considerando que entre el 45 y 50% de la biomasa de éstos sistemas es carbono, es muy importante pensar sobre el tiempo que permanecerá secuestrado el carbono en éste tipo de sistemas ya que como podemos observar en el Cuadro 7, un alto porcentaje de biomasa (92%) se encuentra representada en la clase diamétrica fustales, siendo éstos árboles que ya se pueden aprovechar para uso dentro de la misma finca o venta de madera para cubrir necesidades de los productores, y si esto sucede el tiempo de almacenamiento de carbono sería muy corto ya que luego de la tumba de los árboles éste regresa nuevamente a la atmósfera. Por lo cual es muy importante pensar en una sustitución de éste ingreso, por venta de madera, que pueda evitar la corta de los árboles. Una de ellas puede ser pago por servicios ambientales (PSA) a los dueños de estas fincas, con esto se puede asegurar posiblemente que el carbono esté almacenado por un mayor tiempo.

Cuadro 7. Comparación múltiple de Duncan al 5% para biomasa aérea del componente leñoso de las diferentes clases diamétricas, en pasturas mejoradas con árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs). San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.

Clase diamétrica	Biomasa t ha ⁻¹		
	PmA	Pd	Bs
Fustales (> 10 cm DAP)	59.87 ± 8.31 a	1.21 ± 0.65	182.76 ± 42.77 a
Latizales altos (5-9.9 cm DAP)	0.43 ± 0.84 b	0.00	5.04 ± 2.73 b
Latizales bajos (2-4.9 cm DAP)	0.02 ± 0.03 b	0.00	1.41 ± 0.87 b

± = Desviación estándar.

Letras iguales dentro de la columna no difieren significativamente (Duncan p<0.05).

4.7.2 Componente Pastos

La biomasa aérea de pastos se estimó utilizando la técnica de doble muestreo (evaluación directa y destructiva de la muestra) con cuadrante de 50 x 50 cm. posteriormente se realizó un análisis de varianza para un diseño de parcelas divididas donde la parcela grande es el sistema y la parcela pequeña las evaluaciones de biomasa. Este análisis encontró diferencias estadísticas significativas para la evaluación de biomasa (p<0.0001) y la interacción Sistema*Evaluación de biomasa (p> 0.0045) (Anexo 10).

El sistema de uso de suelo con pastura mejorada de *Brachiaria brizantha* mas árboles (PmA) presentó en las tres evaluaciones los mayores promedios de materia seca (Figura 13), superando en un 45 y 55 % a los rendimientos del sistema bajo pasturas degradadas. Es importante indicar que *Brachiaria brizantha* es tolerante a periodos de sequía, además se observó un incremento de los rendimientos de materia seca en los dos sistemas principalmente en la última evaluación asociado a que en estos meses inició la época lluviosa en la zona (Figura 2, pg 13).

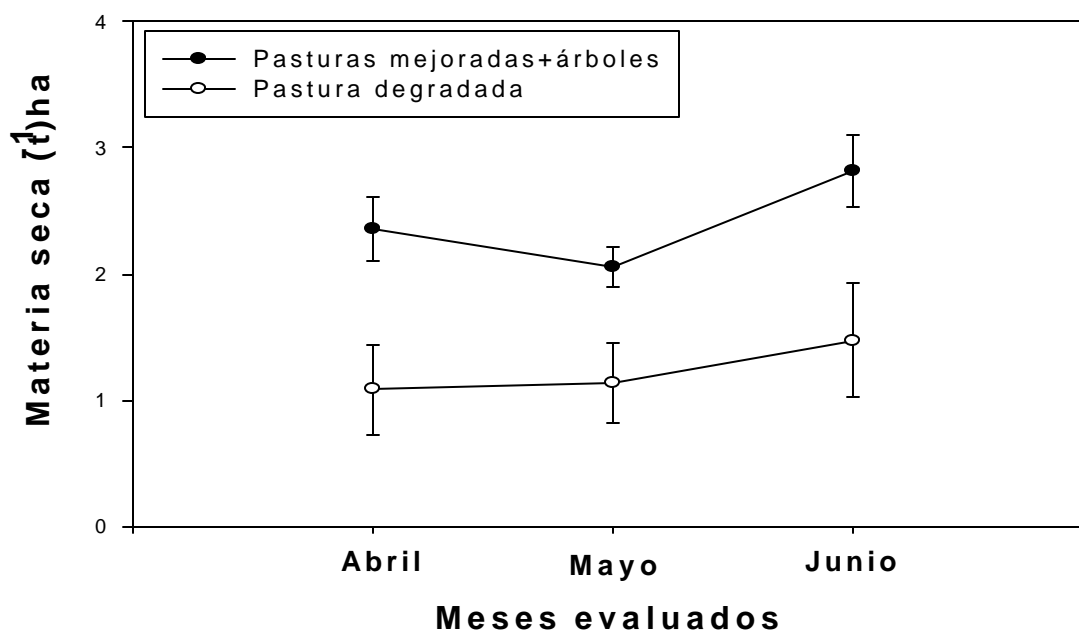


Figura 13. Promedios de la interacción sistemas*evaluación de biomasa de rendimiento de materia seca de pastos en tres meses de evaluación en dos tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.

4.7.3 Biomasa total sobre el suelo

Para evaluar esta variable se sumó la biomasa de todos los componentes evaluados en 4.6.1 y 4.6.2, posteriormente se realizó un análisis de varianza para un diseño irrestrictamente al azar (DIA). Este análisis detectó que la biomasa total sobre el suelo fue estadísticamente diferente ($p < 0.0001$) en los tres sistemas de uso de la tierra en estudio. Presentando el mayor promedio el sistema Bs con $189.21 \pm 39.77 \text{ t ha}^{-1}$, seguido por PmA

62.59 ± 8.65 t ha⁻¹ y finalmente Pd (2.98 ± 0.63 t ha⁻¹) presentó el menor promedio de biomasa aérea (Figura 14). En esta gráfica se puede observar también que del total de biomasa presente en la PmA, el 95.6% corresponde al componente leñoso (árboles y palmas) y únicamente un 4.4% al componente pastos, mientras que en el sistema Pd el componente leñoso aportó con el 41.9% y el componente pasto con el 58.1%. La gran diferencia en el aporte de biomasa entre los componentes de los sistemas de uso de la tierra en estudio depende principalmente de la población existente del componente leñoso en cada uno de éstos.

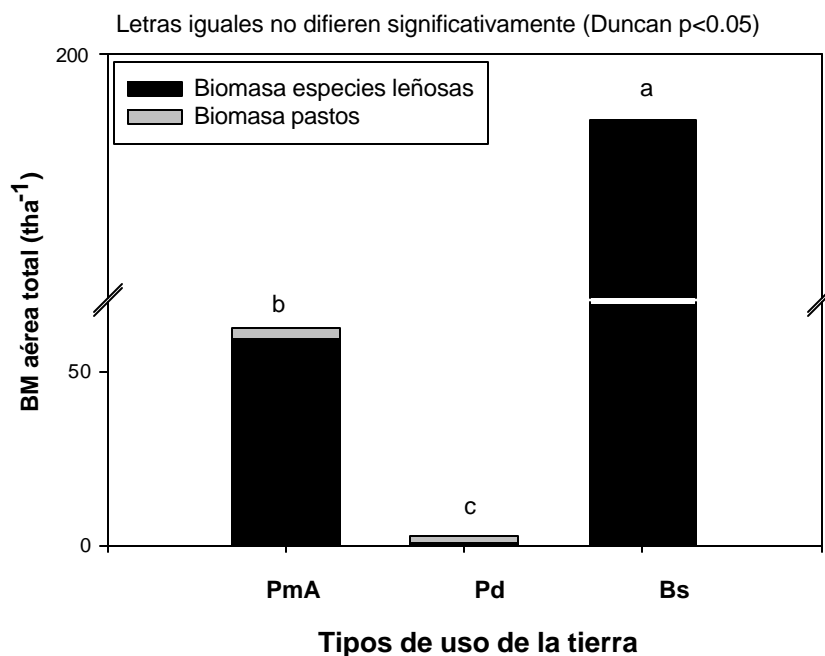


Figura 14. Biomasa aérea total de pasturas mejoradas mas árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs) en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.

4.8 Carbono orgánico del suelo (COS)

Varios investigadores (Groshgal 1991; Wardle 1992; Robertson 1994; Feigl y Sparling 1994; Meléndez 1997) indican que la dinámica del carbono en el suelo puede dividirse en tres fracciones: la fracción activa o carbono microbiano el cual representa entre 1-2% del carbono orgánico total (CO total), la fracción de carbono orgánico lento (CO lento) y el carbono orgánico pasivo (CO pasivo). En esta investigación con el fin de probar la hipótesis planteada se analizó únicamente la fracción de CO pasivo y el CO total. Los

datos de la fracción de carbono orgánico lento (CO lento) se estimaron por diferencia entre el CO total y el CO pasivo.

La evaluación de CO total y CO pasivo se realizó a través de un análisis de varianza para un diseño de parcelas divididas con muestreo, donde la parcela grande fue el sistema y la parcela pequeña las profundidades. En éste análisis se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.0001$) para sistemas y profundidades. No se encontró diferencias estadísticas para la interacción sistemas*profundidad (Anexo 11).

La comparación múltiple de Duncan con un α del 5% para sistemas de uso de la tierra en la variable contenido de CO total, encontró que PmA (64.44 t ha^{-1}) y Pd (63.11 t ha^{-1}) fueron significativamente mayores que Bs (41.41 t ha^{-1}) en la profundidad superficial de suelo (0-20 cm). En la profundidad de 20-40 cm, PmA superó un 15% a Pd y 49.15% a Bs. En la tercera profundidad 40-60 cm, PmA superó 11% a Pd y 35% a Bs y finalmente en la tercera profundidad (60-80 cm) PmA fue 15% mayor que Pd y 29.9% superior que Bs (Figura 15a). La fracción CO pasivo presentó una tendencia similar (Figura 15b).

Estas tendencias son parecidas a las reportadas por López (1998) y Ruiz (2002) en estudios de suelo bajo sistemas silvopastoriles. El comportamiento del CO total del suelo en las diferentes profundidades se relaciona con el comportamiento de biomasa de raíces finas (Figura 8a, pg 36). Es decir tiene una tendencia a disminuir con el incremento en profundidad lo cual era de esperarse ya que una de las principales entradas de carbono al suelo esta dado por la constante muerte de raíces finas indicado anteriormente (MacDiken 1997; Snowdon *et al.* 2001).

En la figura 15a se puede observar también que en la profundidad de suelo de 0-20 cm se encontró alrededor del 45% de carbono y en la profundidad de 20-80 cm se encontró alrededor del 55% del carbono secuestrado en el suelo. Estos datos muestran que en un perfil de 0.8 m de profundidad, en estas condiciones bioclimaticas, aproximadamente el 60% de carbono secuestrado se encontró en una profundidad mayor a los 0.2 m, ésta característica hace que éste carbono esté menos expuesto a procesos de oxidación y por tanto su perdida como gas efecto invernadero (Fisher *et al.* 1994).

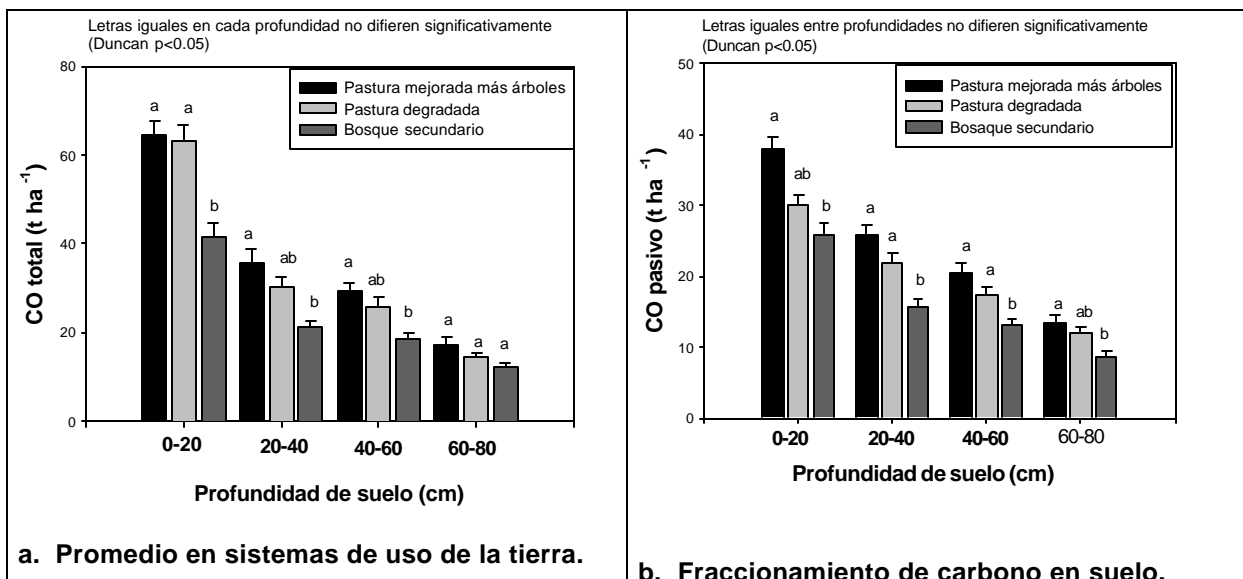


Figura 15. Promedios de CO total y la fracción CO pasivo en suelo bajo pasturas mejoradas más árboles, pasturas degradadas y bosque secundario en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.

El sistema de PmA presentó el mayor promedio de CO total almacenado en las tres profundidades de suelo, aunque no difiere estadísticamente con Pd pero sí con Bs. Estos promedios bajos, no esperados, de contenido de CO total en suelo de Bs con relación a PmA y Pd puede estar dado por que las pendientes de los bosques secundarios en estudio fueron mayores (23-55%) que en PmA y Pd (28-30%), este factor combinado con las fuertes precipitaciones provocan arrastre del material orgánico (hojas flores, frutos, ramas, etc.) depositado en el sistema como producto de la senescencia y muerte de órganos vegetales, por lo cual las entradas de carbono al sistema se ven disminuidas. Situación que no ocurre en PmA y Pd dado que una de las principales entradas de carbono al suelo es producido por el cambio permanente y de intensidad periódica de raíces de los pastos (MacDiken 1997; Snowdon *et al.* 2001) y que directamente se quedan atrapadas en el suelo. Además los bajos niveles de carbono orgánico en Bs puede estar relacionado a la baja presencia de regeneración natural y al observarse erosión de tipo laminar por el afloramiento de raíces de los árboles presentes (Figura 16).



Figura 16. Afloramiento de raíces de la vegetación de bosque secundario por efecto de erosión laminar. fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, Septiembre, 2003.

Es importante considerar también que los sistemas de bosque tienen la biomasa aérea como fuente principal de almacenamiento de carbono, además existe carbono almacenado en la biomasa radicular que va mucho más allá de la profundidad que se está evaluando en este estudio, por lo cual es necesario realizar la comparación en términos de sistema. Dixon *et al.* (1994) indican que la mitad del carbono almacenado por el sistema bosque se encuentra en la parte sobre el suelo. Por su parte Richter & Markewitz (2001) indican que encontraron en el Calhoun Forest, Carolina del Norte, un incremento de 165 t ha^{-1} de carbono, donde el 65% se acumuló en la biomasa y el 35% en la hojarasca, las raíces y el suelo.

Los porcentajes promedios de la fracción de CO pasivo encontrados en esta investigación fueron parecidos a los citados por Meléndez (1997) en su trabajo realizado en un Typic Humitropept de Turrialba-Costa Rica bajo diferentes sistemas de uso de la tierra. Esto se dio posiblemente porque la fracción mineral está menos sujeta a los cambios causados por el manejo debido a su complejidad química y/o a su protección física con las arcillas (Duxburg *et al.* 1989; Cambardella y Elliott 1992b, citados por Meléndez 1997).

La Figura 17 muestra el CO lento y CO pasivo en los tres tipos de uso de la tierra y a las cuatro profundidades en estudio. Aquí se puede observar una relación directa entre el

contenido de CO pasivo y la profundidad de suelo, aunque no muy clara en Bs. La baja tendencia en Bs puede estar dado por la posible erosión laminar que sufre el suelo bajo éste sistema, lo cual probablemente hizo que las muestras se hayan tomado a una profundidad mayor dentro del perfil y los cuatro puntos de evaluación se encuentren en un mismo horizonte.

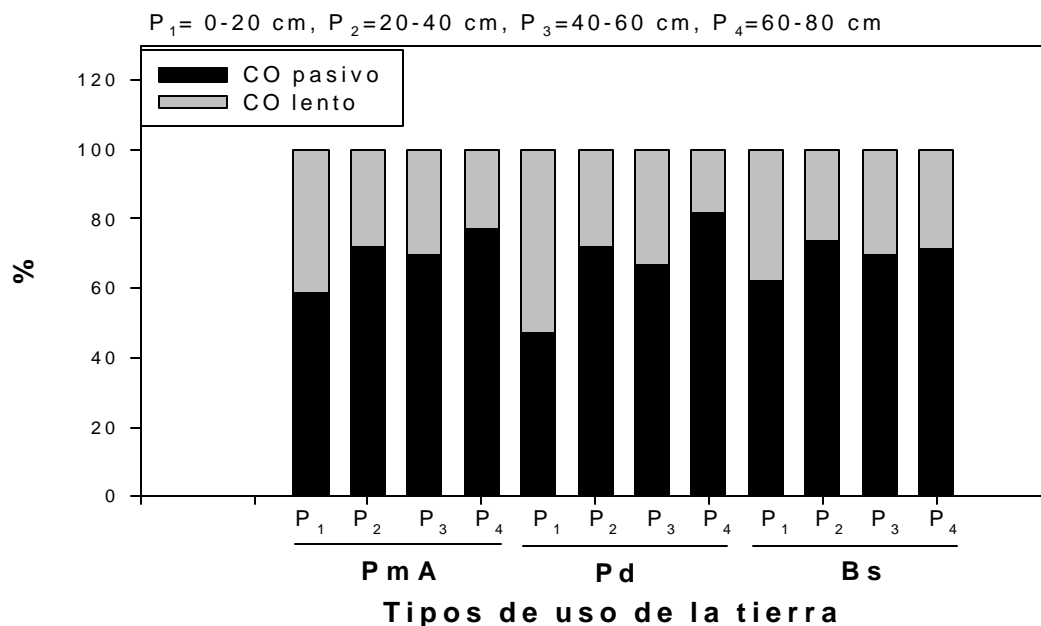


Figura 17. Fraccionamiento de carbono orgánico en cuatro profundidades de suelo, bajo pasturas mejoradas más árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs) en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.

La profundidad 0-20 cm tiene una tendencia a contener un mayor porcentaje de CO lento en comparación a las tres profundidades restantes (20-40, 40-60 y 60-80 cm), esto posiblemente se debe a una mayor cantidad de raíces, material vegetal en descomposición y probablemente una mayor cantidad de arenas en la parte superficial del perfil, aunque un poco mas acentuado en Pd que posiblemente al estar el suelo menos protegido hay una mayor acción de las variables climáticas lo que conlleva a una descomposición mas rápida de la materia orgánica (Figura 17). Es importante también indicar que las partículas con las cuales esta ligado éste tipo de carbono (arcilla y limo) principalmente la arcilla, tiene una relación directa con la profundidad, en los suelos tropicales.

4.9 Carbono orgánico total almacenado en Pastura mejorada más árboles, pasturas degradadas y bosque secundario.

Para evaluar esta variable se sumó el carbono orgánico total almacenado en los componentes evaluados en la parte aérea y bajo el suelo hasta 0.8 m de profundidad en cada uno de los sistemas, posteriormente se realizó un análisis de varianza para un diseño irrestrictamente al azar (DIA). Este análisis detectó que Bs (180.41 t ha^{-1}) y PmA (173.09 t ha^{-1}) y fueron estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) que Pd (134.71 t ha^{-1}) (Figura 18).

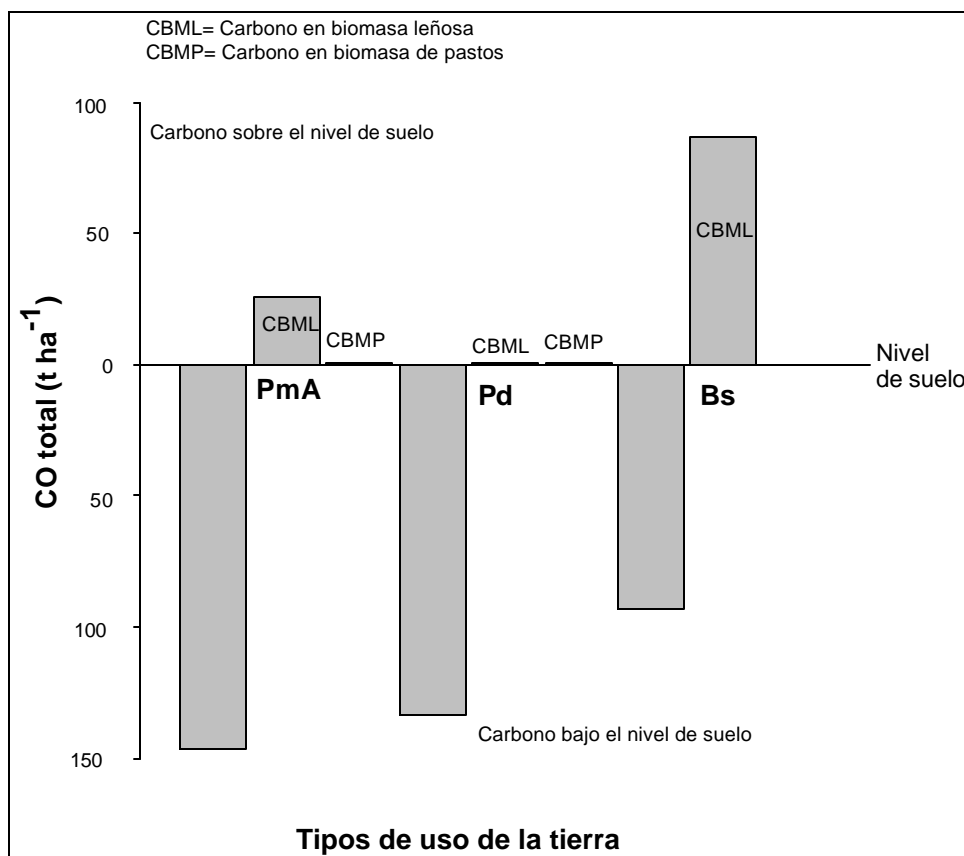


Figura 18. Carbono orgánico total almacenado sobre y bajo el nivel de suelo en pasturas mejoradas más árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs) en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.

En esta gráfica se puede observar también que el sistema PmA presenta el 15% del CO total en los componentes sobre el suelo, mientras que Bs lo tiene el 48% del CO total del

sistema sobre el suelo, esto hace que el sistema Bs presente una mayor vulnerabilidad para mantener el carbono secuestrado por mayor tiempo, dado que se puede producir un accidente como incendios forestal, que es muy común en la zona, o el productor puede cortar la biomasa del bosque y de ésta forma el carbono almacenado vuelve a la atmósfera como CO₂, mientras que en PmA el 85% del carbono se encuentra bajo el suelo, esto hace que el carbono esté menos expuesto a procesos de oxidación y por tanto su pérdida como CO₂. Varios autores entre ellos López *et. al.* (1998) y Ruiz (2002) manifiestan haber encontrado en estudios bajo sistemas silvopastoriles sobre el 80% del CO total en el suelo y el 20% en componentes sobre el suelo. Por otra parte Dixon *et. al.* (1994) indican que en un bosque o una plantación forestal, la mitad de CO total del sistema se encuentra en la parte aérea.

4.10 Análisis Multivariado

Para este análisis se usaron variables físicas, textura, fertilidad y contenido de carbono orgánico en el suelo y variables sobre el suelo (Cuadro 8). El análisis se realizó para cada una de las profundidades en estudio (0-20, 20- 40 y 60-80 cm).

Cuadro 8. Variables usadas en análisis de componentes principales.

Variables			
Físicas y textura de suelo	Fertilidad de suelo	Carbono en suelo	Sobre el suelo
Contenido de piedra (%). Densidad aparente (g cm ⁻³). Contenido de arena (%). Contenido de limo (%). Contenido de arcilla (%).	PH. Ca (cmol L ⁻¹). Mg (cmol L ⁻¹). K (cmol L ⁻¹). Acidez (cmol L ⁻¹). CICE. P (mg L ⁻¹). Cu (mg L ⁻¹). Fe (mg L ⁻¹). Mn (mg L ⁻¹). Zn (mg L ⁻¹).	Carbono orgánico total (t ha ⁻¹). Carbono orgánico pasivo (t ha ⁻¹).	Pendiente (%). # árboles ha ⁻¹ . Biomasa aérea total (t ha ⁻¹). Biomasa de raíces finas (t ha ⁻¹).

En el Cuadro 9 y Anexo 12 y 13 se presentan los valores propios de la matriz de correlación resultantes del Análisis de Componentes Principales realizado para cada una de las profundidades de suelo. Estos resultados indican el número de componentes principales (CP) que deben utilizarse para el análisis de conglomerados. En las tres profundidades en estudio siete componentes principales explican sobre más del 89% de

la variabilidad total del conjunto de variables analizadas y a partir de ésta variable los valores propios de los componentes principales siguientes son menores a 1.

Cuadro 9. Valores propios de la matriz de correlación para seleccionar el número de componentes principales que entran al análisis de conglomerados, en la profundidad de 0-20 cm.

CP	Valor propio	Diferencia	Proporción	Acumulativo
1	8.70081285	5.62164150	0.3955	0.3955
2	3.07917135	0.79832128	0.1400	0.5355
3	2.28085007	0.30910424	0.1037	0.6391
4	1.97174583	0.48329837	0.0896	0.7288
5	1.48844746	0.27779777	0.0677	0.7964
6	1.21064969	0.26703514	0.0550	0.8514
7	0.94361455	0.14286734	0.0429	0.8943

CP= Componente principal

En la profundidad de 0-20 cm, el CP1 esta explicado por las variables CICE, Ca, Fe, CO total, número de árboles por hectárea y pendiente. El CP2 se formó por arena, limo, arcilla y CO pasivo. El CP3 fue dominado por el Mn, Mg, biomasa aérea total y pH. En la profundidad de 20-40 cm el CP1 esta explicado por Ca, CICE, Cu, Fe, Mn, CO total, CO pasivo, el CP2 esta explicada por acidez, biomasa de raíces finas, Mg, K, pH, arena, limo. El CP3 esta explicado por arena, arcilla, Zn. Y en la profundidad de 60-80 cm el CP1 esta explicada por arcilla, CICE, Ca, arena , Fe y número de árboles ha⁻¹; el CP2 esta explicado por Mn, Mg, acidez y pH. El CP3 esta explicado por K, P, Fe, Zn.

Con siete CP, para cada profundidad de suelo, se corrió un análisis de conglomerados usando la distancia Euclideana. En la profundidad de 0-20 cm se encontró tres grupos de parcelas, ubicados en un primer grupo todas las parcelas de Bs, en un segundo grupo la mayoría de las parcelas de Pd y en un tercer grupo la mayoría de las parcelas de PmA. Esto significa que todas las observaciones del primer grupo (Bs) se parecen más entre ellas que entre los otros tratamientos, al igual que las parcelas del grupo 2, en el cual se encuentran el 80% de las parcelas de Pd y el 40% de las parcelas de PmA y el tercer grupo se encuentran conformado por el 60% de las parcelas de PmA y 20% de las parcelas de Pd (Cuadro 10).

Cuadro 10. Análisis de conglomerados de Pasturas mejoradas más árboles (PmA), Pasturas degradadas (Pd) y Bosque secundario (Bs) en la profundidad de 0-20 cm.

Observación	Grupo	Tratamiento
1	1	BsR1
2	1	BsR2
3	1	BsR3
4	1	BsR4
5	1	BsR5
6	2	PmAR2
7	2	PmAR5
8	2	PdR1
9	2	PdR2
10	2	PdR4
11	2	PdR5
12	3	PmAR1
13	3	PmAR3
14	3	PmAR4
15	3	PdR3

R(1-5) = Repetición.

En la profundidad de 20-40 cm el análisis encontró dos grupos, ubicando en un primer grupo al 80% de las parcelas de Bs y en un segundo grupo a las parcelas de PmA , Pd y al 20% de las parcelas de Bs. Esto significa que en esta profundidad son diferentes las parcelas de Bs de las parcelas bajo pastos (PmA y Pd) y entre pasturas son parecidas entre ellas (Cuadro 11).

Cuadro 11. Análisis de conglomerados de Pasturas mejoradas más árboles (PmA), Pasturas degradadas (Pd) y Bosque secundario (Bs) en la profundidad de 20-40 cm .

Observación	Grupo	Tratamiento
1	1	BsR2
2	1	BSR3
3	1	BsR4
4	1	BsR5
5	2	PmAR1
6	2	PmAR2
7	2	PmAR3
8	2	PmAR4
9	2	PmAR5
10	2	PdR1
11	2	PdR2
12	2	PdR3
13	2	PdR4
14	2	PdR5
15	2	BsR1

R(1-5) = Repetición.

En la profundidad de 60-80 cm al igual que en la profundidad superficial se encontró tres grupos de parcelas, ubicados en un primer grupo a la mayoría de parcelas de PmA, en un segundo grupo la mayoría de las parcelas de Pd y en un tercer grupo la mayoría de las parcelas de Bs.(Cuadro 12).

Cuadro 12. Análisis de conglomerados de Pasturas mejoradas más árboles (PmA), Pasturas degradadas (Pd) y Bosque secundario (Bs) en la profundidad de 60-80 cm .

Observación	Grupo	Tratamiento
1	1	PmAR1
2	1	PmAR2
3	1	PmAR4
4	1	PdR3
5	1	PdR5
6	2	PmAR3
7	2	PmAR5
8	2	PdR1
9	2	PdR2
10	2	PdR4
11	2	BsR1
12	3	BsR2
13	3	BsR3
14	3	BsR4
15	3	BsR5

R(1-5) = Repetición.

En el Cuadro 13 y Anexos 14 y 15 se presenta los resultados del ANOVA para cada una de las variables evaluadas y la prueba de medias (Duncan $p < 0.05$) entre los grupos. Donde se puede encontrar una tendencia similar a la encontrada con el análisis univariado, presentado en los capítulos anteriores, a excepción de CO total y CO pasivo que con éste análisis se encontró una mayor diferenciación entre los sistemas, observándose en la profundidad de 0-20 cm que el grupo 3 donde se encuentran la mayoría de las parcelas de PmA presentó el mayor promedio, mientras que el grupo 2 (mayoría de parcelas de Pd) y grupo 1 (parcelas de Bs) presentaron los menores promedios, siendo estadísticamente parecidos estos dos últimos grupos y diferentes a las parcelas del grupo 3 (mayoría de PmA) (Cuadro 13).

Cuadro 13. Análisis univariado y prueba de Duncan al 5% de los grupos conformados en el análisis de conglomerados de la profundidad de 0-20 cm.

Variable	Pr>F	CV (%)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Piedra (%)	0.4103 ns	73.93	8.600 a	10.720 a	16.330 a
DA (g cm ⁻³)	0.2712 ns	5.03	1.076 a	1.133 a	1.110 a
CO total t ha ⁻¹	0.0023 **	19.90	41.410 b	55.690 b	75.900 a
CO pasivo t ha ⁻¹	0.0275 *	21.15	25.880 b	30.190 b	39.620 a
pH	0.0016 **	3.43	5.410 a	4.990 b	4.910 b
Ca (cmol L ⁻¹).	0.0028 **	23.02	34.340 a	23.620 b	17.220 b
Mg (cmol L ⁻¹).	0.0657 ns	33.89	13.620 a	11.030 ab	7.150 b
K (cmol L ⁻¹).	0.1009 ns	43.25	0.112 a	0.080 a	0.152 a
Acidez (cmol L ⁻¹).	0.0288 *	27.02	0.124 b	0.135 b	0.202 a
CICE	0.0042 **	22.82	48.200 a	34.860 b	24.730 b
P (mg L ⁻¹).	0.5188 ns	29.48	2.580 a	2.530 a	3.100 a
Cu (mg L ⁻¹).	0.0090 **	29.89	5.260 b	11.050 a	10.300 a
Fe (mg L ⁻¹).	0.0013 **	63.16	9.740 b	34.130 b	96.880 a
Mn (mg L ⁻¹).	0.0421 *	48.22	9.000 b	23.600 a	21.370 a
Zn (mg L ⁻¹).	0.5367 ns	54.95	2.760 a	3.900 a	4.100 a
Arena (%)	0.0182 *	22.73	34.700 b	35.290 b	52.840 a
Limo (%)	0.0191 *	18.12	29.730 a	28.850 a	19.810 b
Arcilla (%)	0.0880 ns	17.57	35.570 a	35.860 a	27.340 a
Pendiente (%)	0.0183 *	22.84	42.670 a	31.055 b	26.160 b
# árboles ha ⁻¹	<0.0001**	31.55	562.600 a	43.330 b	85.500 b
Biomasa aérea t ha ⁻¹	0.0015 **	65.04	160.290 a	21.560 b	49.630 b
Biomasa de raíces t ha ⁻¹	0.4431 ns	35.66	1.620 a	1.840 a	2.200 a

Medias con igual letra dentro de las filas no difieren significativamente (Duncan p<0.05)

* = Significativo (P < 0.05).

** = Altamente significativo (P<0.001).

ns = No significativo.

5. Conclusiones

No se observó claramente que los sistemas de uso de la tierra con pasturas mejoradas más árboles aporten mayor cantidad de biomasa de raíces finas, a pesar que la tendencia fue $PmA > Pd > Bs$. Esta baja superioridad en la contribución de biomasa de raíces finas del sistemas PmA puede estar dada posiblemente por su corta edad (3 años), lo cual probablemente no es tiempo suficiente para que tengan una buena cobertura de raíces, puede estar influenciado además por la época de muestreo (inicio de invierno).

La profundidad del suelo fue un factor determinante en el contenido de biomasa de raíces finas. El patrón de comportamiento de ésta variable fue inversamente proporcional con la profundidad, es decir la mayor densidad de raíces finas (58.2%) se encontró en la capa superficial (0-20cm).

Existe un efecto muy marcado del tipo de uso de la tierra en la variable biomasa aérea (leñosas y pastos). PmA presentó 3 veces menos biomasa que Bs pero 49 veces más que Pd. El contenido de biomasa aérea esta muy relacionada con el número de individuos presentes en el sistema, el 97% de la biomasa aérea apporto la clase diamétrica fustales (>10 cm DAP).

El almacenamiento de carbono en el suelo presentó la misma tendencia que biomasa de raíces finas $PmA > Pd > Bs$. Lo cual sugiere la relación que existe entre estas variables en cada uno de los sistemas en estudio. La baja diferencia en almacenamiento de carbono entre los sistemas bajo pasturas, posiblemente se debe a que las parcelas de PmA son muy jóvenes (3 años).

Alrededor del 50% del CO secuestrado en el perfil de suelo se encontró a una profundidad mayor a 20 cm, ésta característica hace que éste carbono orgánico esté menos expuesto a procesos de oxidación y por tanto a perdida como gas efecto invernadero.

El CO pasivo presentó una relación directamente proporcional con la profundidad de suelo, probablemente por que éste tipo de carbono se encuentra en la parte mineral del suelo ligado a las partículas de arcilla y limo.

El análisis de componentes principales encontró que una mayor concentración de carbono en el suelo está asociada a un menor pH, menor concentración de Ca, menor CICE, menor cantidad de limo, menor pendiente, mayor concentración de arcilla y mayor biomasa de raíces finas.

6. Recomendaciones

Para futuros trabajos es importante realizar un reconocimiento exhaustivo de las parcelas a evaluar, incrementar el número de repeticiones (>5) y disminuir el número de muestras dentro de la parcela experimental. Dado a que se encontró alta variabilidad en los datos.

Debido a que el método de fraccionamiento de carbono en húmedo es muy sensible a manejo de pesos y ajuste de humedad, es importante realizar pruebas de fraccionamiento de carbono con muestra de suelo seco, con esto posiblemente se elimina los ruidos encontrados en los datos en este estudio.

Realizar estudios sobre el efecto de la edad de establecimiento de la pastura y las implicaciones en el secuestro COT y el fraccionamiento.

En este estudio el comparador (Bs), presentó menor cantidad de carbono orgánico en el suelo con relación a sistemas bajo pasturas, posiblemente porque sus entradas de carbono fueron afectadas por la erosión laminar de suelo, por ésta razón es importante realizar estudios de erosión de suelo y su impacto con el secuestro de carbono orgánico total y estable (CO pasivo).

Considerando que las raíces son una de las principales fuente de entrada de carbono al suelo en éstos sistemas, es necesario disponer de información sobre la dinámica de estas, la proporción entre raíces vivas y muertas, durante la estación seca y lluviosa.

Dado que ésta investigación se realizó en un solo tipo de suelo y en una área pequeña (4 fincas), para poder generalizar los resultados es necesario ampliar los estudios con otros tipos de suelo, que tengan una mayor cobertura y monitorear durante el tiempo, además sería importante incorporar sistemas de uso de la tierra como bosque natural y plantaciones forestales, de ésta forma se tendrá una información mas completa y de mayor utilidad.

En ocasiones la comparación entre tratamientos en fincas mediante análisis de varianza se ve limitada porque no se pueden controlar algunos factores como pendiente, pedregosidad, uso anterior del suelo, entre otros. En estos casos el uso de técnicas de análisis multivariado es una mejor alternativa para el análisis de la información.

7. Bibliografía

- Andrade, H. 1999. Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 83 p.
- Alves, D.S.; Soares, J.V.; Amaral, S.; Mello, E.M.K.; Almeida, S.A.S.; Silvia, O.F.; Silveira, A.M. 1997. Biomass of primary and secondary vegetation in Rondonia, Western Brazilian Amazon. *Global Change Biology* 3:451-461.
- Balesdent, J. 1996. Un point sur l'évolution des reserves organiques des sols de France. *Etude et Gestion des Sols* 3(4):245-260.
- Balesdent, J.; Arrouays, D.; Gaillard, J. 2000. MORGANE : un modèle de simulation des reserves organiques des sols et de la dynamique du carbone des sols. Submitted to *Agronomie*.
- Batjes, N.H. and W.G. Sombroek, 1997: Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. *Global Change Biology*, 3(2), 161-173.
- Beer, J.; Guevara, R. 2000. Priority themes in Tropical America for agricultural/forestry development: Importance of networking. XXI IUFRO World Congress 2000. Sub-plenary Sessions. Vol. 1. IUFRO, Kuala Lumpur, Malasia, p. 891-901
- Bertsch F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. 1 ed. San José, C.R. ACCS. 157 p.
- Brown, S.; Lugo, A.E.; Iverson, L.R. 1992. Processes and lands for sequestering carbon in the tropical forest landscapes. In Wisniewski j. y Lugo A.E. (eds.), 1992. Natural sinks of CO₂. *Water, air and soil pollution* 64: 139-155.

- Camargo, JC. 1999. Factores ecológicos y socioeconómicos que influyen en la regeneración natural de *Cordia alliodora* (Ruiz y Pavon) en sistemas silvopastoriles del trópico húmedo y subhúmedo de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 127 p.
- 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, C. 1998. Experimental verification of simulated soil organic matter pools. In Lal, L.; Kimble, JM.; Follett, RA.; Stewart, BA. eds. Soil processes and the Carbon Cycle. CRC Press, Boca Raton FL. p 519-526.
- Candoy W. 1991. Manual de laboratorio para el manejo físico de suelos. Universidad Autónoma de Chapingo.. México. 165 p. (Serie agronomía no. 22).
- Cerri, C. C., B. Volkoff, and F. Andreaux. 1991. Nature and behavior of organic matter in soils under natural forest, and after deforestation, burning and cultivation, near Manaus. Forest Ecology and Management 38:247-257.
- Chinchilla, V.E. 1987. Atlas Cantonal de Costa Rica. 1. ed. San José, C.R. Instituto de Fomento y Asesoría Municipal. 396 p.
- Ciesla, W.M. 1996. Cambio climático, bosques y ordenación forestal. Una visión de conjunto. Estudio FAO Montes No 126. 147 p.
- Cuéllar, N.; Rosa H.; Gonzales M. 1999. Los servicios ambientales del agro: El caso del café de sombra en el Salvador. PRISMA. No. 34:1-16.
- FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1993. Forest Resources Assessment 1990, Tropical Countries. FAO Forestry Paper 112. Roma.

- FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2000. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂. Informes sobre recursos mundiales de suelos No. 88. Roma 98 p.
- FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, EMBRAPA). 2001. Protección de los recursos naturales en sistemas ganaderos: Los sistemas agroforestales pecuarios en América Latina. Consulta de expertos FAO. (18-22 septiembre de 2000. Juiz de Flora, MG, Brasil).
- FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Basado en el trabajo de Michael Robert. Institut national de recherche agronomique. Raris, Francia 62 p.
- Ferrera, C.M. 2001. Almacenamiento de carbono en bosques secundarios en el municipio de San Carlos, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 100 p.
- Fisher, M.J.; Rao, I.M.; Ayarza, C.E.; Saenz, J.I.; Thomas, R.J.; Vera, R.R. 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 31:236-238.
- Forsythe, W. 1975. Física de suelos, manual de laboratorio. IICA, San José, Costa Rica. Serie de libros y materiales educativos No. 25. 212 p.
- Gregorich, E.G.; Drury, C.F.; Ellert, B.H.; Liang, B.C. 1996. Fertilization effects on physically protected light fraction organic matter. *Soil Sci Soc Am J* 60:472-476.
- Giraldo L.A.; Zapata M.; Naranjo J.F.; Sneider M.; Cuartas C.A.; Botero A.; Arias L. 2003. Estimación de las existencias de carbono en el sistema silvopastoril *Acacia decurrens* con *pennisetum clandestinum*. In *Medición de la captura de carbono*

en ecosistemas forestales tropicales de Colombia. Contribuciones para la mitigación del cambio climático. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Departamento de Ciencias forestales/Centro Andino para la economía en el medio ambiente. Colombia 314 p.

Harvey, C; Haber, WA. 1999. Remnant trees and the conservation of biodiversity in Costa Rican pastures. *Agroforestry System*. 44:37-68

Henríquez C.; Cabalceta G. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. Universidad de Costa Rica/ACCS. 1 ed. San José, C. R. 112 p.

Jenkinson, DS.; Hart, PSB.; Rayner, JH.; Pany, LC. 1987. Modelling the turnover of organic matter in long-term experiments of Rothamsted. *Intecol Bulletin* 15. New York. 18 p.

Kanninen, M. 2001. Sistemas silvopastoriles y almacenamiento de carbono: Potencial para América Latina. En conferencia electrónica en potencialidades de los sistemas silvopastoriles para la generación de servicios ambientales. LEAD-CATIE.

Kass D. 1996. Fertilidad de suelos. Núñez J. 1 ed. San José, C.R. EUNED. 272 p.

Kent P. 2000. Pruning effects on roots of nitrogen fixing trees in the humid tropics. Ph. D. CATIE. 39 p.

López, M.; Koning, F.; Paredes, H.; Benítez, P. 2002. Estimación de carbono en biomasa de bosques secundarios y plantaciones forestales en el noroccidente de Ecuador (en línea). Proyecto CO2-GTZ / University of Gottingen, Gottingen-Alemania. Consultado el 10 de oct. del 2003. Disponible en <http://www.gtz.de/toeb>

- Lopez, A.; Schlönvoigt, A., Ibrahim, M., Kleinn, C., Kanninen, M. 1999. Cuantificación del carbono almacenado en el suelo de un sistema silvopastoril en la zona Atlántica de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 6, p. 51-53
- Louman, B. 2002. Inventarios en bosques secundarios- Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central. Eds. Lorena Orozco, Celia Brumér. Turrialba, C.R. CATIE. 264 p.
- 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.
- Meléndez G. 1997. Transformaciones de carbono, nitrógeno y fósforo del suelo, en sistemas agroforestales, cultivos anuales y bosque natural. Tesis Mag. Sc. San José, Costa Rica. UCR. 123 p.
- Montenegro, J.; Abarca, S. 1999. Fijación de carbono, emisiones de metano y de oxido nitroso en sistemas de producción bovina en Costa Rica. *In* Intensificación de la ganadería en Centroamérica: Beneficios económicos y ambientales. Costa Rica. p 151-174.
- Morales E. 1997. Arquitectura y distribución espacial de raíces de *Eucalyptus deglupta* dentro de un sistemas agroforestal simultaneo con *Coffea arabica*. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 123 p.
- 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.
- Nair, P. 1993. An introduction to agroforestry. Dordrecht, Netherlands, Klumer Academic 499 p.

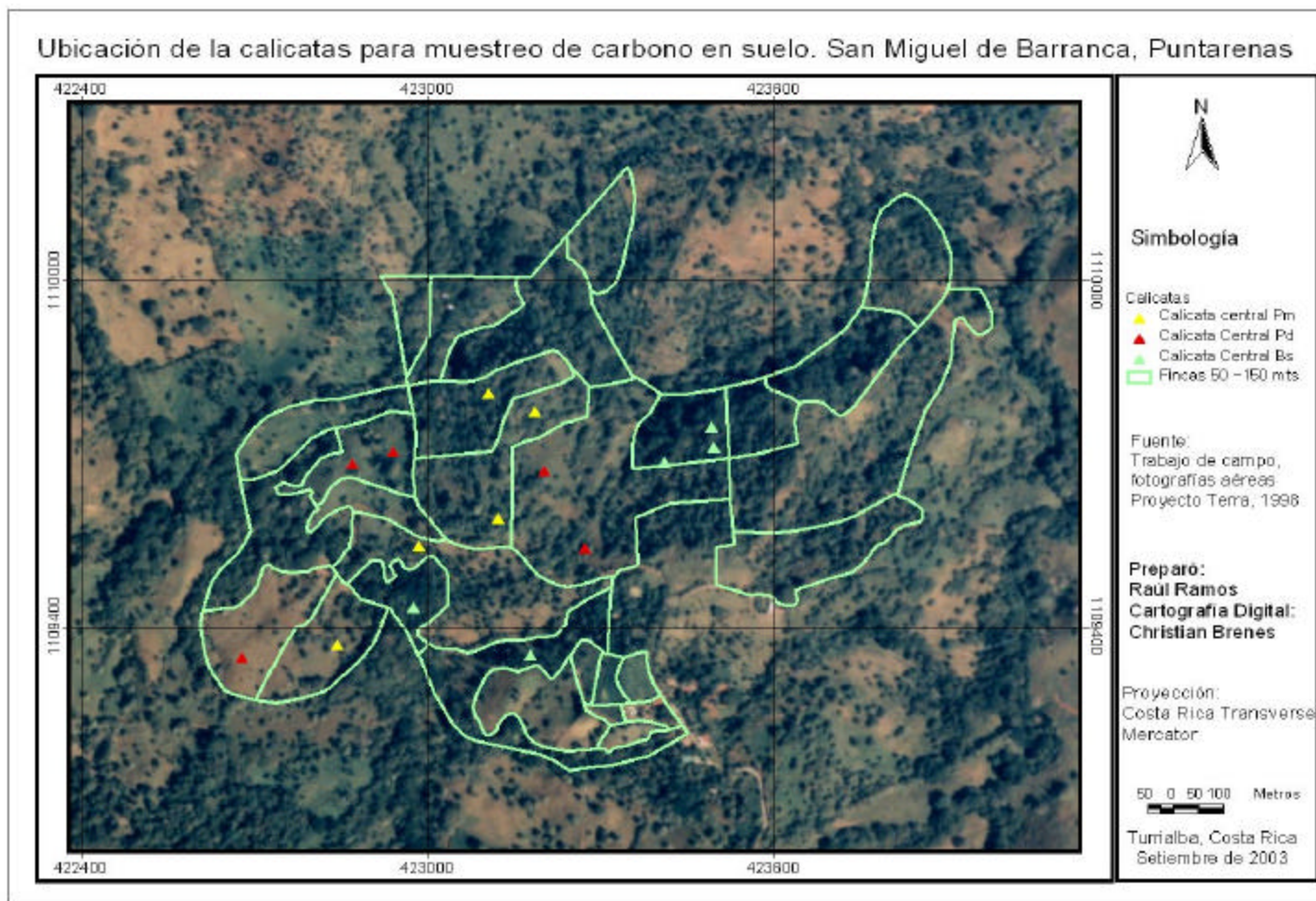
- Nepstad, D.C., Uhl, C., Serrao, E.A.S. 1991. Recuperation of a degraded Amazonian landscape: Forest recovery and agricultural restoration. *Ambio*. 20:248-255.
- Nepstad C.D.; De carvalho C.R.; Davidson E.A.; Jipp P.H.; Lefebvre P.A.; Negreiros G.H.; Da silva E.D.; Stone T.A.; Trumbores S.E.; and Viera S. 1994. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature* (372):666-669.
- Oades, J.M. 1988. The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry* 5:35-70.
- Parton, W.J.; Schimel D.S.; Cole C.V.; Ojima D.S. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1173-1179.
- Persson H.A. 1983. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. *Plant Soil* 71:87-101.
- Pezo, D.; Ibrahim, M. 1996. Sistemas silvopastoriles, una opción para el uso sostenible de la tierra en sistemas ganaderos. *In: Pastoreo Intensivo en Zonas Tropicales*. 1er. Foro Internacional. FIRA/Banco de Méjico. Veracruz. Méjico. 35p.
- Pezo, D.; Ibrahim, M. 1999. Sistemas silvopastoriles, Modulo de enseñanza agroforestal No. 2. 2 ed. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. CATIE/GTZ. Turrialba, Costa Rica 275 p.
- Puget, P.; Chenu, C.; Balesdent, J.; 1995. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *European Journal of Soil Science* 46: 449-459.
- Robert, M. 1996. *Le Sol: Interface Dans L'environnement, Ressource pour le Développement*. Dunod/Masson, Paris 240 p.

- Robert, M. 2002 . Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos no. 96. FAO. Roma, IT. 61 p.
- Rocha, R. 2002. Cambio en el uso del suelo y factores asociados a la degradación de pasturas en la cuenca del Río Bulbul, Matiguas, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 84 p.
- Ruiz, A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 106 p.
- Sanchez, PA.; Logan, TJ. 1992. Myths and science about the chemistry and fertility of soil in the tropics. In: Myths and Science of Soils of the Tropics. Lal, R. and PA. Sanchez (eds). Soil Science Society of America. Special Publication. 29:33-45. Madison, WI.
- Schaller, M. 2001. Quantification and management of root interactions between fast-growing timber tree species and Coffee in plantations in Central America. PhD Thesis, Bayreuther Bodenkundliche Berichte, Univ. of Bayreuth, Germany. 112
- Schlönvoigt, A.; Chesney, P.; Schaller, M.; Kanten, R. 2000. Estudios ecológicos de raíces en sistemas agroforestales: experiencias metodológicas en el CATIE. Versión No. 2.0. 36 p.
- Somarriba, E. 1992. Revisiting the past: an essay on agroforestry definition. Agroforestry systems 19:233-240.
- Souza de Abreu.; Ibrahim, M.; Havey, C.; Jiménez, F. 2000. Caracterización del componente arbóreo en los sistemas ganaderos de la Fortuna de san Carlos, Costa Rica. Agroforestería en las Américas 7(26):53-56.

- Steinfeld, H. 1999. Producción animal y el medio ambiente en Centroamérica *In* Intensificación de la ganadería en Centroamérica: Beneficios económicos y ambientales. Costa Rica. p 17-32.
- Stokes, K. 2001. Farmers' knowledge about the management and use of trees on livestock farms in the Cañas area of Costa Rica. MSc Thesis. Bangor, UK, University of Wales. 75 p.
- Szott, L.; Ibrahim M.; Beer, J. 2000. The hamburger connection hangover: Cattle, pasture land degradation and alternative land use in Central America. Turrialba, CR, CATIE.71 p.
- Theng, BKG.; Tate, KR.; Sollins, P. 1989. Constituents of organic matter in temperate and tropical soils. *In*: Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems. Coleman, DC.; Oades JM. And Uehara, G. (eds.). Niftal Project. Manoa, Hawaii. 5-31.
- Tiessen, H.; Stewart, JWB.; Cole, CV. 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. Soil Science Society of America Journal 48:853-858.
- Van Kanten R. 2003. Competitive interactions between *Coffe arabica* L. and Fast-growing timber shade trees. Ph. D. CATIE-School of Agricultural and Forestsciences, University of Wales Bangor, Bangor, Gwynedd, u.k., ll57 2uw . 162 p.
- Veldkamp, E. 1993. Soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropics of Costa Rica. Ph. D. Wageningen, Netherlands, Agriculture University of Wageningen. 117 p.

8. Anexos

- Anexo 1. Ubicación de las calicatas centrales de muestreo de suelo en cada uno de los apartos evaluados en pasturas mejoradas con árboles, pasturas degradadas y bosque secundario en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.



Anexo 2. Encuesta para productores.

Fraccionamiento del carbono orgánico del suelo en cuatro tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de Esparza, Costa Rica.	
Nombre del productor:	Nombre/número de finca:
Provincia/Cantón/Corregimiento:	Nombre del apartado:
Pluviometría:	Tipo de ganadería:
Georeferenciación de la unidad de muestreo dentro de la finca:	Pendiente promedio:
	Superficie aproximada del apartado (ha):
Especies de pasto:	Edad del potrero:
Altitud:	# árboles/arbustos/palmas en el potrero:
	/ /
<u>Croquis del apartado a evaluar</u>	

Continuación Anexo 2

Historia del lote en los últimos 15 años (vegetación, quemas, utilización, etc.)		
Manejo del potrero desde la siembra.		
Labores realizadas previo a la siembra:		
Tipo de semilla utilizada: Sexual Estolones		
Lugar de adquisición de la semilla: _____		
Tiempo que tardó desde la siembra al ingreso de animales a pastorear: _____		
Control de malezas / arvenses Chapeas Herbicida		
Frecuencia _____		
Producto _____		
Fertilización	Siembra	Orgánica Química Ninguna
		Productos: _____
	Mantenimiento	Cantidad: _____
		Productos: _____
		Cantidad: _____
		Frecuencia: _____
Período de utilización de la pastura Verano Invierno		

Período de descanso o recuperación de la pastura	Verano	Invierno
Carga animal en la utilización de la pastura	Verano	Invierno
Manejo de excretas en el potrero	Dispersión	Ninguna
Cobertura de la pastura		

Anexo 3. Análisis de varianza para densidad aparente de suelo a tres profundidades en tres tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.

Fuente de Variación	G.L	CM	F	Pr > F
Total	289			
Sistemas	2	0.07227692	1.35	0.2962 ns
Error a. (Repetición*Sistemas)	12	0.05357638		
Profundidad	2	0.39279151	67.06	< 0.0001 **
Sistema*Profundidad	4	0.00719249	1.23	0.3253 ns
Error b. (Repetición*Sistemas*Profundidad)	24	0.00585720		
Error de Muestreo	245	0.00691511		

R = Repetición.

S = Sistema.

P = Profundidad.

* = Significativo (P < 0.05).

** = Altamente significativo (P<0.001).

ns = No significativo.

Anexo 4. Análisis de varianza para variables de fertilidad a tres profundidades de suelo en pasturas mejoradas más árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs) de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.

Fuente de Variación	G.L	pH	Ca	K	CICE	P
Total	44					
Sistemas	2	0.5654 **	1097.7929 **	0.0007 ns	1532.8295 *	1.6229 ns
Error a. (R*S)	12	0.0421	126.3231	0.0050	249.9264	4.5433
Profundidad	2	0.3329 **	15.3549 ns	0.0043 *	27.6233 ns	31.4596 * *
Sistema*Profundidad	4	0.0613 ns	4.2062 ns	0.0005 ns	10.3965 ns	1.4459 ns
Error b. (R*S*P)	24	0.0225	4.6577	0.0009	16.7634	1.8443

R = Repetición.

S = Sistema.

P = Profundidad.

* = Significativo (P < 0.05).

** = Altamente significativo (P<0.001).

ns = No significativo.

Anexo 5. Análisis de varianza para variables de fertilidad a tres profundidades de suelo en pasturas mejoradas más árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs) de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003. (Continuación).

Fuente de Variación	G.L	Cu	Fe	Mn	Zn
Total	44				
Sistemas	2	285.5540 **	7153.0362 *	582.1936 **	2.2035 ns
Error a. (R*S)	12	23.4353	1782.8017	46.2743	1.5614
Profundidad	2	87.8407 **	2364.2896 *	506.2196 **	24.9029 **
Sistema*Profundidad	4	4.6467 ns	830.2596 ns	49.4716 ns	1.7849 ns
Error b. (R*S*P)	24	4.7505	580.3207	19.6737	1.0189

R = Repetición.
S = Sistema.
P = Profundidad.
* = Significativo (P < 0.05).
** = Altamente significativo (P<0.001).
ns = No significativo.

Anexo 6. Análisis de varianza para textura de suelo a tres profundidades en tres tipos de uso de la tierra de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.

Fuente de Variación	G.L	Arena (0.05-2 mm)	Limo (0.002-0.005 mm)	Arcilla (< 0.002 mm)
Total	134			
Sistemas de uso de suelo	2	283.511 ns	832.317 *	332.736 ns
Error a. (R*S)	12	596.035	166.654	369.769
Profundidad	2	723.608 *	189.096 *	1630.214 **
Tratamiento * Profundidad	4	481.100 *	78.441 ns	407.574 *
Error b. (R*S*P)	24	145.941	54.680	129.824
Error de Muestreo	90	117.497	30.015	90.081

R = Repetición.
S = Sistema.
P = Profundidad.
* = Significativo (P < 0.05).
** = Altamente significativo (P<0.001).
ns = No significativo.

Anexo 7. Análisis de varianza para materia seca de raíces finas a tres profundidades de suelo en pasturas mejoradas más árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs) de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.

Fuente de Variación	G.L	CM	F	Pr > F
---------------------	-----	----	---	--------

Total	132			
Sistemas	2	1098808.54	1.18	0.3404 ns
Error a. (Repetición*Sistemas)	12	930782.25		
Profundidad	2	21028680.02	53.14	< 0.0001 **
Sistema*Profundidad	4	799970.23	2.02	0.1234 ns
Error b. (Repetición*Sistemas*Profundidad)	24	395737.28		
Error de Muestreo	88	229024.09		

R = Repetición.

S = Sistema.

P = Profundidad.

* = Significativo (P < 0.05).

** = Altamente significativo (P<0.001).

ns = No significativo.

Anexo 8. Especies forestales en potreros con pasturas mejoradas (PmA), en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica, CATIE 2003.

#	Nombre común	Nombre científico	Familia
1	Marañón	<i>Anacardium occidentale</i>	Anacardiaceae
2	Jocote	<i>Spondias purpurea</i>	Anacardiaceae
3	Pavita	<i>Schefflera morototoni</i>	Araliaceae
4	Coyol	<i>Acrocomia aculeata</i>	Arecaceae
5	Jícara	<i>Anmphitecna latifolia</i>	Bignonaceae
6	Corteza amarillo	<i>Tabebuia ochracea</i>	Bignonaceae
7	Roble	<i>Tabebuia rosea</i>	Bignonaceae
8	Laurel	<i>Cordia alliodora</i>	Borraginaceae
9	Muñeco	<i>Cordia collococca</i>	Borraginaceae
10	Nance	<i>Clethra sp.</i>	Clethraceae
11	Almendro de montaña	<i>Andira inermis</i>	Fabacea
12	Carao	<i>Cassia grandis</i>	Fabaceae
13	Cocobolo	<i>Dalbergia retusa</i>	Fabaceae
14	Guachipelín	<i>Diphysa americana</i>	Fabaceae
15	Guanacaste	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	Fabaceae
16	Madero negro	<i>Gliricidia sepium</i>	Fabaceae
17	Gallinazo	<i>Schizolobium parahyba</i>	Fabaceae
18	Cedro	<i>Cedrella odorata</i>	Meliaceae
19	Higuerón, Chilamate	<i>Ficus trigonata</i>	Moraceae
20	Guayabo	<i>Psidium guajava</i>	Myrtaceae
21	Naranja	<i>Citrus sp.</i>	Rutaceae
22	Mamon	<i>Melicoccus bijugatus</i>	Sapindaceae
23	Guacimo	<i>Guazuma umbifolia</i>	Sterculiaceae

Anexo 9. Especies forestales en el bosque secundario (Bs) de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE 2003.

# Especie	Nombre común	Nombre científico	Familia
1	Coyol	<i>Acrocomia aculeata</i>	Arecaceae
2		<i>Albizia adinocephala</i>	Fabaceae
3	Huesillo	<i>Allophylus occidentalis</i>	Sapindaceae
4	Espavel	<i>Anacardium escelsum</i>	Anacardiaceae
5	Almendro de montaña	<i>Andira inermis</i>	Fabacea
6		<i>Annona purpurea</i>	Annonaceae
7		<i>Annona reticulata</i>	Annonaceae
8	Caña de mula	<i>Bauhinia unguolata</i>	cesalpinaceae
9	Indio pelado	<i>Bursera simarouba</i>	Burseraceae
10	Madroño	<i>Calycophyllum candidisimum</i>	Rubiaceae
11		<i>Casearea silvestris</i>	Flacourtiaceae
12		<i>Casearia aculeata</i>	Flacourtiaceae
13	Cafecillo	<i>Casearia corimbosa</i>	Flacourtiaceae
14	Guarumo	<i>Cecropia peltata</i>	Cecropiaceae
15		<i>Chomelia spinosa</i>	Rubiaceae
16	Poroporo	<i>Cochlospermum vitifolium</i>	Bixaceae
17	Laurel	<i>Cordia alliodora</i>	Boraginaceae
18	Cafecillo	<i>Cordia collcocha</i>	Boraginaceae
19		<i>Cupania guatemalensis</i>	Sapindaceae
20	Cocobolo	<i>Dalbergia retusa</i>	Fabaceae
21	Guachipelin	<i>Diphysa americana</i>	Fabaceae
22	Guanacaste	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	Fabaceae
23		<i>Eugenia salamensis</i>	Myrtaceae
24		<i>Eugenia sp.</i>	Myrtaceae
25		<i>Genipa americana</i>	Rubiacea
26	Guacimo	<i>Guazuma umbifolia</i>	Sterculiaceae
27	Chaperno	<i>Lonchocarpus costaricensis</i>	Fabaceae
28	Chaperno	<i>Lonchocarpus minimiflorus</i>	Fabaceae
29	Santa María	<i>Miconia argentea</i>	Melastomataceae
30		<i>Myriocarpa logipes</i>	Urticaceae
31		<i>Pelicurea sp</i>	

32	Panama	<i>Pseudobombax septenatum</i>	Bombacaceae
33	Guayaquil	<i>Pseusamanea guachapele</i>	Fabaceae
34		<i>Pterocarpus michelianus</i>	Fabaceae
35	Horquetillo	<i>Randia monantha</i>	Rubiaceae
36	Alcornoco	<i>Sapium glandulosum</i>	Euphorbiaceae
37	Pavita	<i>Schefflera morototoni</i>	Araliaceae
38	Gallinazo	<i>Schizolobium parahyba</i>	Fabaceae
39		<i>Sicotria sp.</i>	Rubiaceae
40		<i>Sideroxylon capiri</i>	Sapotaceae
41	Terciopelo	<i>Sloanea terniflora</i>	Elaeocarpaceae
42	Jobo	<i>Spondias mombin</i>	Anacardiaceae
43	Huevocaballo	<i>Stemmadenia donnell-smithii</i>	Apocynaceae
44		<i>Strychnos sp.</i>	Loganiaceae
45		<i>Swartzia simplex</i>	Fabaceae
46	Corteza	<i>Tabebuia ochracea</i>	Bignonaceae
47	Roble	<i>Tabebuia rosea</i>	Bignonaceae
48	Bijarro	<i>Taberaemontana alba</i>	Apocynaceae
49		<i>Trichilia martearna</i>	Meliaceae
50		<i>Xylosma intermedia</i>	Flacourtiaceae
51	Lagartillo	<i>Zanthoxylum fagara</i>	Rutaceae
52	Palma		Aricaceae

Anexo 10. Análisis de varianza para materia seca de pastos en dos tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.

Fuente de Variación	G.L	CM	F	Pr > F
Total	39			
Sistemas	1	9238025.94	5.04	0.0551 ns

Error a. (Repetición*Sistemas)	8	1834347.94	18.35	
Evaluación de biomasa	3	7714813.68	77.18	< 0.0001 **
Sistema*Evaluación de biomasa	3	564773.81	5.65	0.0045 **
Error b.	24	99955.83		

R = Repetición.

S = Sistema.

P = Profundidad.

* = Significativo (P < 0.05).

** = Altamente significativo (P<0.001).

ns = No significativo.

Anexo 11. Análisis de varianza para carbono orgánico total y carbono orgánico pasivo a tres profundidades de suelo en pasturas mejoradas más árboles (PmA), pasturas degradadas (Pd) y bosque secundario (Bs) de fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. CATIE, 2003.

Fuente de Variación	G.L	CO Total	CO Pasivo
Total	404		
Sistemas de uso de suelo	2	11259.950 *	4951.643 *
Error a. (R*S)	12	2420.556	793.183
Profundidad	2	25289.376 **	6304.835 **
Tratamiento * Profundidad	4	694.126 ns	133.240 ns
Error b. (R*S*P)	24	620.762	255.391
Error de Muestreo	360	449.960	160.391

R = Repetición.

S = Sistema.

P = Profundidad.

* = Significativo (P < 0.05).

** = Altamente significativo (P<0.001).

ns = No significativo.

Anexo 12. Valores propios de la matriz de correlación para seleccionar el número de componentes principales que entran al análisis de conglomerados, en la profundidad de 20-40 cm.

	<i>CP</i>	<i>Valor propio</i>	<i>Diferencia</i>	<i>Proporción</i>
		<i>Acumulativo</i>		
1	8.40588695	4.53240972	0.3821	0.3821
2	3.87347723	1.39671765	0.1761	0.5582
3	2.47675958	0.69429886	0.1126	0.6707
4	1.78246072	0.29330605	0.0810	0.7518
5	1.48915467	0.16070870	0.0677	0.8194
6	1.32844598	0.46295640	0.0604	0.8798
7	0.86548958	0.30361674	0.0393	0.9192

CP= Componente principal

Anexo 13. Valores propios de la matriz de correlación para seleccionar el número de componentes principales que entran al análisis de conglomerados, en la profundidad de 60-80 cm.

<i>CP</i>	<i>Valor propio</i>	<i>Diferencia</i>	<i>Proporción</i>	
<i>Acumulativo</i>				
1	8.68323292	5.09170319	0.3947	0.3947
2	3.59152974	1.01724798	0.1633	0.5579
3	2.57428176	0.74613660	0.1170	0.6750
4	1.82814516	0.35005898	0.0831	0.7581
5	1.47808618	0.34624282	0.0672	0.8252
6	1.13184336	0.17479558	0.0514	0.8767
7	0.95704778	0.34718951	0.0435	0.9202

CP= Componente principal

Anexo 14. Análisis univariado y prueba de Duncan al 5% de los grupos conformados en el análisis de conglomerados, en la profundidad de 20-40 cm.

Variable	Pr>F	CV (%)	Grupo 1	Grupo 2
Piedra (%)	0.5576 ns	89.19	10.833 a	15.242 a
DA (g cm ⁻³)	0.0553 ns	4.24	1.157 a	1.220 a
CO total t ha ⁻¹	0.0308 *	28.02	20.558 b	32.043 a
CO pasivo t ha ⁻¹	0.0091 **	21.58	15.069 b	23.177 a
pH	0.0312 *	2.77	5.522 a	5.274 b
Ca (cmol L ⁻¹).	<.0001 **	19.68	41.200 a	22.527 b
Mg (cmol L ⁻¹).	0.6531 ns	36.75	11.875 a	10.782 a
K (cmol L ⁻¹).	0.2986 ns	45.43	0.102 a	0.078 a
Acidez (cmol L ⁻¹).	0.3947 ns	92.44	0.122 a	0.211 a
CICE	0.0028 **	24.46	53.300 a	33.062 b
P (mg L ⁻¹).	0.1890 ns	44.24	3.800 a	5.645 a

Cu (mg L ⁻¹).	0.0038 **	29.55	7.250 b	15.155 a
Fe (mg L ⁻¹).	0.0566 ns	53.48	33.030 a	74.460 a
Mn (mg L ⁻¹).	0.0055 **	38.91	6.150 b	16.555 a
Zn (mg L ⁻¹).	0.4247 ns	31.30	1.275 a	1.490 a
Arena (%)	0.7902 ns	27.75	36.386 a	34.833 a
Limo (%)	0.3677 ns	30.68	26.565 a	22.609 a
Arcilla (%)	0.1763 ns	16.05	37.050 a	42.558 a
Pendiente (%)	0.0059 **	22.63	44.333 a	29.726 b
# árboles ha ⁻¹	0.0004 **	69.91	553.250 a	109.270 b
Biomasa aérea t ha ⁻¹	0.0024 **	74.22	165.370 a	42.530 b
Biomasa de raíces t ha ⁻¹	0.9197 ns	44.36	0.698 a	0.680 a

Medias con igual letra dentro de las filas no difieren significativamente (Duncan p<0.05)

* = Significativo (P < 0.05).

** = Altamente significativo (P<0.001).

ns = No significativo.

Anexo 15. Análisis univariado y prueba de Duncan al 5% de los grupos conformados en el análisis de conglomerados, en la profundidad de 60-80 cm.

Variable	Pr>F	CV (%)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Piedra (%)	0.2881ns	89.02	10.933 a	4.944 a	14.667 a
DA (g cm ⁻³)	0.0173 *	4.18	1.309 a	1.243 ab	1.191 b
CO total t ha ⁻¹	0.0407 *	24.15	18.258 a	13.433 ab	11.843 b
CO pasivo t ha ⁻¹	0.0055 **	20.63	14.578 a	10.457 b	8.418 b
pH	0.0642 ns	3.99	5.278 b	5.320 b	5.630 a
Ca (cmol L ⁻¹).	<.0001 **	18.23	17.240 c	25.950 b	38.275 a
Mg (cmol L ⁻¹).	0.0009 **	22.79	7.700 c	16.467 a	11.850 b
K (cmol L ⁻¹).	0.5963 ns	52.77	0.092 a	0.068 a	0.092 a
Acidez (cmol L ⁻¹).	0.1885 ns	92.05	0.192 a	0.395 a	0.120 a
CICE	<.0001 **	14.97	25.224 c	42.880 b	51.338 a
P (mg L ⁻¹).	0.0850 ns	20.86	6.140 a	4.500 b	5.300 ab
Cu (mg L ⁻¹).	0.0225 *	32.78	15.900 a	14.883 a	7.200 b
Fe (mg L ⁻¹).	0.0005 **	30.49	65.900 a	28.683 b	27.375 b
Mn (mg L ⁻¹).	0.1221 ns	43.50	6.920 a	8.150 a	4.000 a
Zn (mg L ⁻¹).	0.9493 ns	18.47	1.240 a	1.283 a	1.250 a
Arena (%)	0.0139 *	21.18	24.162 b	32.630 ab	40.022 a
Limo (%)	0.0316 *	20.91	17.544 b	25.913 a	24.868 a
Arcilla (%)	0.0012 **	16.32	58.294 a	41.457 b	35.110 b
Pendiente (%)	0.0260 *	23.52	29.198 b	30.167 b	44.333 a
# árboles ha ⁻¹	0.0015 **	70.34	60.800 b	149.700 b	553.300 a
Biomasa aérea t ha ⁻¹	0.0114 *	76.93	36.530 b	47.530 b	165.370 a
Biomasa de raíces t ha ⁻¹	0.3531 ns	65.95	0.457 a	0.874 a	0.791 a

Medias con igual letra dentro de las filas no difieren significativamente (Duncan p<0.05)

* = Significativo (P < 0.05).

** = Altamente significativo (P<0.001).

ns = No significativo.