

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE ZOOTECNIA

DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE CIENCIAS PECUARIAS



**CARBONO ALMACENADO EN TRES SISTEMAS
GANADEROS EN EL DISTRITO DE JOSÉ CRESPO Y
CASTILLO, AUCAYACU**

Tesis

Para optar el título de:

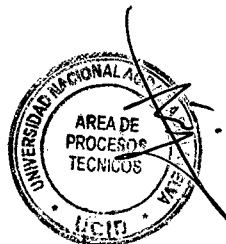
INGENIERO ZOOTECNISTA

Presentado por:

GEORGE GABRIEL HUAMANCAYO YSMINIO

TINGO MARÍA, PERÚ

2013



P01

H82

Huamancayo Ysminio, George Gabriel

Carbono almacenado en tres sistemas ganaderos en el distrito de José Crespo y Castillo Aucayacu – Tingo María, 2013

67 páginas; 06 cuadros; 11 figuras; 45 ref.; 30 cm.

Tesis (Ingeniero Zootecnista) Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María (Perú). Facultad de Zootecnia.

1. CARBONO

2. SILVOPASTORIL

3. AGUAJE

4. PASTURA

5. GANADERO

6. BIOMASA



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE ZOOTECNIA**

Av. Universitaria Km. 2 Teléfono: (062) 561280
TINGO MARÍA

Año de la Inversión para el Desarrollo Rural y la Seguridad Alimentaria

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 20 de Diciembre de 2012, a horas 6:00 p.m. para calificar la tesis titulada:

“CARBONO ALMACENADO EN TRES SISTEMAS GANADEROS EN EL DISTRITO DE JOSÉ CRESPO Y CASTILLO, AUCAYACU”

Presentada por el Bachiller **George Gabriel HUAMANCAYO YSMINIO**; después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara aprobado con el calificativo de **“MUY BUENO”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el **TÍTULO DE INGENIERO ZOOTECNISTA**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para la otorgación del título, de conformidad con lo establecido en el Artículo 95, inciso “i” del Estatuto de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Tingo María, 01 de abril de 2013


MSc. **EBER CÁRDENAS RIVERA**
Presidente




Sr. **JORGE RÍOS ALVARADO**
Miembro


M.Sc. **YTAVCLERH VARGAS CLEMENTE**
Miembro


M.Sc. **RAFAEL ROBLES RODRIGUEZ**
Miembro - Asesor

DEDICATORIA

Con amor y cariño

A Dios, por darme la oportunidad de vivir, por ser quien ha estado a mi lado en todo momento dándome las fuerzas necesarias para continuar y seguir adelante.

A mis queridos abuelos, Leonardo, Alberto, Gerarda y Manuela por sus sabios consejos.

A mis padres Pedro y Romelia, mis hermanas, Geraldine, Paola y Doris, por todo el apoyo y cariño que me dieron en mi formación profesional.

AGRADECIMIENTO

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en especial a la Facultad de Zootecnia que contribuyeron a mi formación profesional.
- Al Ing. M.Sc. Rafael Robles Rodríguez, patrocinador del presente trabajo, por su valiosa colaboración y supervisión de la tesis.
- A los miembros del jurado de tesis, Ing. M.Sc. Eber Cárdenas Rivera, Dr. Jorge Ríos Alvarado e Ing. M.Sc. Ytavcleth Vargas Clemente, por su apoyo.
- A la Lic. Yessica Reyes Ayala por sus sabios consejos y su apoyo incondicional en los momentos difíciles de mi carrera.
- A mi familia por todo el apoyo incondicional que me brindaron para ser posible la realización del presente trabajo de investigación.
- A mis amigos, Milton Sevillanos Piña, Sergio Liberato Espinoza, Gabriel Olivera Ysminio, Wilmer Guisado Ccoñas, Romer Bustillos Venancio, Jairo Loayza Besares, Javier Robles Condori, Carlos Canchanya Loayza, Elar Farro Guevara, Max Del Castillo Pérez, con quienes compartí momentos inolvidables en mi formación académica y brindaron su apoyo en la realización del presente trabajo de investigación.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Generalidades del Carbono	4
2.2. Generalidades del dióxido de carbono	4
2.3. Secuestro y almacenamiento de carbono.....	5
2.4. Relación de la ganadería con el CO ₂	7
2.5. Inventarios y contabilidad de carbono	9
2.6. Monitoreo y evaluación de almacenamiento de carbono.....	11
2.7. Componentes del almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles	12
2.8. Estimaciones de almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles	14
2.9. Almacenamiento de carbono en plantas de aguaje	14
III. MATERIALES Y MÉTODOS	16
3.1. Lugar y fecha de ejecución	16
3.2. Materiales y equipos	17
3.2.1. Materiales	17
3.2.2. Equipos	17
3.3. Metodología	18
3.3.1. Selección de los sistemas ganaderos	18
3.3.2. Demarcación del área de estudio.....	19

3.3.3.	Determinación del carbono aéreo	20
3.3.4.	Determinación del carbono bajo suelo	26
3.3.5.	Estimación del almacenamiento del carbono total en los sistemas	31
3.4.	Variable independiente	31
3.5.	Variables dependientes	31
3.6.	Análisis estadístico	32
IV.	RESULTADOS	33
4.1.	Carbono de la biomasa aérea en tres sistemas ganaderos.....	33
4.2.	Carbono bajo suelo entre los sistemas evaluados.....	36
4.2.1.	Carbono radicular.....	36
4.2.2.	Carbono orgánico del suelo (COS)	38
4.2.3.	Carbono bajo suelo	42
4.3.	Reserva total de carbono en los sistemas ganaderos evaluados	43
4.4.	Relación entre carbono aéreo y carbono bajo suelo.....	45
V.	DISCUSIÓN	48
5.1.	Carbono de la biomasa aérea en tres sistemas ganaderos.....	48
5.2.	Carbono bajo suelo entre los sistemas evaluados.....	50
5.2.1.	Carbono radicular.....	50
5.2.2.	Carbono orgánico del suelo (COS)	52
5.2.3.	Carbono bajo suelo	53
5.3.	Carbono total de los sistemas de pasturas.....	54
5.4.	Relación entre carbono aéreo y bajo suelo.....	55
VI.	CONCLUSIONES	56

VII. RECOMENDACIONES	58
VIII. BIBLIOGRAFÍA	60

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Carbono de la biomasa aérea en tres sistemas ganaderos, expresadas en t.C.ha ⁻¹ (media ± error estándar).....	33
2. Biomasa radicular y carbono radicular por profundidad de horizonte entre los sistemas (Media ± error estándar).....	36
3. Materia orgánica, densidad aparente y COS por profundidad de horizonte en las pasturas (Media ± error estándar).....	39
4. Carbono bajo suelo en los sistemas ganaderos evaluados y expresadas en t C ha ⁻¹ (n=10; media ± error estándar).....	42
5. Carbono total en dos sistemas de pasturas, expresadas en t.C.ha ⁻¹ (n=10; media ± error estándar).....	44
6. Relación del contenido de carbono aéreo y carbono bajo suelo en tres sistemas ganaderos, expresadas en t C ha ⁻¹ (n=10; media ± error estándar).....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Plano de ubicación del módulo lechero de la Facultad de Zootecnia.....	16
2. Esquema de la parcela y sus medidas en estudio.	19
3. Gráfico de boxplot para el contenido de carbono aéreo entre sistemas ganaderos.	35
4. Contenido de carbono ($t.C.ha^{-1}$) por componentes herbáceo y hojarasca entre sistemas	35
5. Biomasa radicular ($g.m^{-2}$) por sistema evaluado (boxplot - a); biomasa radicular por estrato (b).	37
6. Carbono radicular ($t C ha^{-1}$) por sistema evaluado (boxplot (a); carbono radicular por estrato (b).	38
7. Materia orgánica (%) evaluada a tres profundidades (a); Densidad aparente a tres profundidades ($t ha^{-3}$) (b) en tres sistemas.....	40
8. Carbono orgánico del suelo ($t.ha^{-1}$) en tres profundidades (a); boxplot del carbono orgánico del suelo ($t.ha^{-1}$) en tres sistemas (b).....	41
9. Gráfico de boxplot para el contenido de carbono bajo suelo ($t. C.ha^{-1}$) entre sistemas.	43
10. Gráfico de boxplot para la reserva total de carbono ($t.C.ha^{-1}$) entre los sistemas evaluados.	45
11. Proporción del carbono aéreo y bajo suelo de los sistemas evaluados.	47

RESUMEN

Los objetivos del trabajo fueron determinar las reservas de carbono almacenado en la biomasa aérea, en el suelo y carbono orgánico del suelo de tres diferentes sistemas ganaderos; comparar los tres sistemas ganaderos para estimar el mayor potencial de almacenamiento de carbono. El ensayo se realizó en el módulo lechero de la Facultad de Zootecnia- UNAS, ubicado en el Distrito de José Crespo y Castillo (Aucayacu) con los siguientes Sistemas S1: Sistema silvopastorilmultiestrato (SSP1), S2: Sistema silvopastoril con aguaje (SSP2) y S3: Sistema tradicional con pastura natural (ST), el S1 estuvo establecida con *B. decumbens*, *C. spruceanum*, y *E. fusca*, el S2 con *P. plicatum*, y *M. flexuosa* y el tercer sistema con *Axonopus compressus* y *Paspalum conjugatum*, para ello fue utilizado el diseño Completamente al Azar (DCA) , cada sistema con diez repeticiones y cada repetición con un área de 10 x 10 m. Los resultados del presente trabajo indican diferencias estadísticas en las cantidades de carbono almacenado en los componentes aéreos, siendo mayor para SS1, seguido de SS2 y el más bajo para ST; asimismo, la cantidad de carbono depositado bajo el suelo en los tres sistemas indican que los SS1 y SS2 tuvieron menos cantidad de carbono en relación al ST, entretanto. Se concluye que las reservas de carbono total en los tres sistemas estudiados son semejantes.

Palabras clave: Almacenamiento de carbono, componente aéreo, sistema radicular y sistema silvopastoril.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático inducido por las actividades humanas es un problema mundial que afecta de forma negativa los procesos ecológicos, económicos y sociales que rigen el planeta (IPCC, 2001). El cambio climático se debe principalmente por gases de efecto invernadero como el metano, el óxido nitroso y el dióxido de carbono, entre otros, los cuales provocan el incremento de la temperatura del planeta. En lo que respecta a los contenidos de carbono atmosférico, estos se han incrementado principalmente por el cambio de uso de tierras y la combustión de restos fósiles (LAL y KIMBLE, 1998).

En América Latina, uno de los principales cambios del uso de la tierra ha sido la deforestación de bosques para establecer pasturas para la ganadería (HARVEY *et al.*, 2005). El incremento de las áreas de pasturas hace que sea urgente tomar medidas a escalas tanto locales como regionales para buscar estrategias de mitigación de los niveles de dióxido de carbono (CO₂) en la atmosfera por parte de los sistemas ganaderos. En este sentido, se han propuesto una serie de acciones que se puedan aplicar en fincas de pequeños y medianos productores. Estas acciones consisten en promover los sistemas silvopastoriles en las fincas mediante la incorporación de árboles aislados en potreros, el establecimiento de cercas vivas y el de pasturas mejoradas, así

como incentivar la regeneración natural de la vegetación y la conservación de los bosques (BEER *et al.*, 2003).

Existen evidencias que los sistemas silvopastoriles contribuyen a la mitigación del calentamiento global mediante la conservación, captura y almacenamiento de carbono (C) en la biomasa y en el suelo; pero a pesar que se conoce la capacidad que tienen los bosques y sistemas forestales para almacenar carbono, aún falta información acerca del potencial de secuestro de carbono en suelo y en la biomasa arbórea en los sistemas ganaderos.

Investigaciones realizadas afirman que los aguajales son los más grandes almacenes de carbono entre los ecosistemas terrestres amazónicos, el carbono es almacenado en la biomasa de los aguajales, pero principalmente en el suelo debido a las bajas tasas de descomposición de la materia orgánica. Por todo ello, se tiene como problema de investigación: ¿Cuál de los tres sistemas ganaderos; el sistema silvopastoril multiestrato (*Bracharia decumbens*, *Calycophyllum spruceanum* [Benth.] K. Schum., *Erythrina fusca*), el sistema silvopastoril con aguaje (*Paspalum plicatulum*, *Mauritia flexuosa* L. f.) y el sistema tradicional con pastura natural (*Axonopus compressus* y *Paspalum conjugatum*), almacena mayor cantidad de carbono? para ello, formulamos la siguiente hipótesis: que el sistema silvopastoril con aguaje (*Paspalum plicatulum* y *Mauritia flexuosa* L. f.) almacena mayor cantidad de carbono que los otros dos sistemas.

Para lo cual planteamos como objetivos:

Objetivo General

Evaluar las reservas de carbono total, almacenado en tres sistemas ganaderos (Sistema silvopastoril multiestrato: *Brachiaria decumbens*, *Calycophyllum spruceanum* [Benth.] K. Schum., *Erythrina fusca*; Sistema silvopastoril con aguaje: *Paspalum plicatulum*, *Mauritia flexuosa* L. f; y un Sistema tradicional con pastura natural (*Axonopus compressus*, *Paspalum conjugatum*) en el distrito de José Crespo y Castillo.

Objetivos Específicos

- Determinar las reservas de carbono almacenado en la biomasa aérea (arbóreo, herbáceo, y hojarasca) en los tres sistemas ganaderos.
- Determinar las reservas de carbono almacenado bajo suelo (sistemas radiculares y carbono orgánico del suelo) en los tres sistemas ganaderos.
- Comparar los tres sistemas ganaderos para estimar el mayor potencial de almacenamiento de carbono.
- Estimar la relación de carbono total, almacenado en los tres sistemas ganaderos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Generalidades del Carbono

El carbono es el elemento químico fundamental de los compuestos orgánicos, que circula por los océanos, la atmósfera, el suelo y el subsuelo. Estos son considerados depósitos (reservorios) de carbono. Está relacionado con la sustentabilidad de los sistemas agrícolas afectando las propiedades del suelo relacionadas con el rendimiento sostenido de los cultivos (MARTINEZ *et al.*, 2008).

El carbono, un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, se obtiene de la atmósfera por medio de la fotosíntesis. Sin embargo, cuando las plantas mueren, sus tejidos ricos en carbono vuelven al suelo y son descompuestos por los organismos vivos. El carbono del suelo no se acumula para siempre, se libera del suelo cuando la materia orgánica es descompuesta por varios tipos de organismos aerobios que usan el carbono para su propio crecimiento (LESSARD *et al.*, 2009).

2.2. Generalidades del dióxido de carbono

El dióxido de carbono, es un gas de efecto invernadero que se encuentra en la atmósfera, producto de las actividades humanas, como la

quemado de combustibles fósiles y otros procesos, aumentan significativamente su concentración en la atmósfera contribuyendo al calentamiento global del planeta. De acuerdo con los estudios realizados por universidades y organizaciones, el incremento del CO₂ atmosférico en los últimos 200 años es significativamente mayor que el evaluado para toda la vida del hombre sobre la tierra, previo a la industrialización, pasando de un promedio de 280 ppm a casi 380 ppm en 2005 (AGUINACO, 2008).

Una forma de mitigar los problemas del dióxido de carbono (CO₂) además de reducir las emisiones, es "secuestrarlo", es decir, capturarlo y mantenerlo el mayor tiempo posible en la biosfera, en el suelo y los océanos. En el primero; se logra a través de la fotosíntesis y en el segundo a través de la descomposición y mineralización de la materia orgánica. Los bosques son el principal sumidero de CO₂, sin embargo, según algunos estudios la capacidad de absorción y almacenamiento de carbono varía de un bosque a otro, principalmente por la influencia de factores como: temperatura, precipitación, densidad de masa, tipo de suelo, pendiente, altura, condiciones topográficas, índices de crecimiento y edad (ALBRECHT y KANDJI, 2003).

2.3. Secuestro y almacenamiento de carbono

Las fincas ganaderas pueden aportar al secuestro de carbono mediante la implementación de sistemas agroforestales; los bosques remanentes, áreas de vegetación secundaria en regeneración, pasturas arboladas y otros usos de la tierra dedicados a labores agrícolas pueden fungir

como sumideros de carbono atmosférico (POST y KWON, 2000; RUIZ, 2002; FISHER *et al.*, 2004). Los principales componentes de almacenamiento de carbono en el uso de la tierra son el carbono orgánico del suelo (COS) y en la biomasa arriba del suelo. Se ha estimado que el carbono (C) en la biomasa de los bosques primarios y secundarios varía entre 60 y 230 y entre 25 y 190 t C ha⁻¹ respectivamente (BROWN, 1997), y que el C en el suelo puede variar entre 60 y 115 t C ha⁻¹.

Datos reportados de pasturas tropicales en Latinoamérica muestran cómo el establecimiento de pasturas mejoradas logra aumentar los niveles de carbono bajo el suelo. En Brasil, el establecimiento de pasturas mejoradas en áreas deforestadas provocó incrementos en la acumulación de carbono orgánico (DE CAMARGO *et al.*, 1999). El potencial de los sistemas agroforestales (suelo y biomasa) para almacenar carbono puede variar entre 20 y 204 t C ha⁻¹, estando la mayoría de este carbono almacenado en los suelos, pudiendo incluso tener incrementos de C anual que pueden variar entre 1,8 y 5,2 t C ha⁻¹ (IBRAHIM *et al.*, 2005).

El ciclo del carbono comienza con la fijación del anhídrido carbónico (CO₂) atmosférico a través de los procesos de la fotosíntesis realizados por las plantas y ciertos microorganismos. En este proceso, el CO₂ y el agua reaccionan para formar carbohidratos y liberar oxígeno a la atmósfera. Parte del carbohidrato se consume directamente para suministrar energía a la planta y el CO₂ así formado, se libera a través de sus hojas o de sus raíces. Otra parte es consumida por los animales que también respiran y liberan CO₂.

Las plantas y los animales mueren y son finalmente descompuestos por microorganismos del suelo lo que da como resultados que el carbono de sus tejidos se oxide en CO_2 y regrese a la atmósfera (ORTIZ y RIASCOS, 2006).

Según SNOWDON *et al.* (2001), los agro ecosistemas acumulan carbono en cuatro grandes componentes: biomasa aérea (o biomasa sobre el suelo), hojarasca, sistema radicular y carbono orgánico del suelo. La influencia de la vegetación herbácea en el almacenamiento y fijación de carbono es muy baja, por lo que puede omitirse dentro de un estudio de Carbono. ORTIZ y RIASCOS (2006), afirman que durante el tiempo en que el dióxido de carbono (CO_2) se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol y hasta que es enviado nuevamente al suelo o a la atmósfera, se considera almacenado. En el momento de su liberación (ya sea por la descomposición de la materia orgánica y/o por la quema de la biomasa) el CO_2 fluye para regresar al ciclo del carbono. El CO_2 atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis. Este CO_2 participa en la composición de todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (follaje, ramas, raíces y tronco).

2.4. Relación de la ganadería con el CO_2

La expansión e intensificación de la ganadería ha contribuido a problemas globales en el ambiente, sin embargo, también son parte de la solución (ROWLINSON, 2008). Si bien es reconocido que la ganadería trae consigo problemas ambientales, también se reconoce que el sistema sostenible

alberga un gran potencial de brindar servicios ecosistémicos y sustenta una importante porción de la economía de los países en vías de desarrollo (GAMMA, 2010).

La causa de este cambio climático global es el efecto invernadero, el cual ocurre como consecuencia de la emisión de los gases de efecto invernadero (GEI). Los ganaderos están involucrados en esta discusión porque la ganadería es la responsable de una parte importante de la emisión GEI (SMITH, 2008). Desde un punto de vista global, las actividades relacionadas con la ganadería contribuyen con un 18 % (en equivalentes de CO₂) de las emisiones de los GEI. Esto equivale incluso a un porcentaje más alto que las emisiones del sector del transporte, para revertir esta tendencia, los Sistemas Silvopastoriles (SSP) son una alternativa para el mejoramiento de la producción ganadera y el medio ambiente pues posee gran cantidad de beneficios ambientales; éstos sistemas bien manejados, permiten mejorar tanto la calidad ambiental como la productividad pecuaria (ROWLINSON, 2008).

Las prácticas agropecuarias tradicionales juegan un importante papel ya sea adicionando gases de efecto invernadero, resultado de las tecnologías de producción o, reduciéndolos mediante su captura en la biomasa. Durante el pastoreo una porción de pasto ofrecido no es consumido, parte de estos residuos son incorporados como materia orgánica en el suelo e incrementa la cantidad de carbono en el mismo. El suelo juega un rol importante en la acumulación del carbono, y es el resultado de la descomposición de la materia orgánica proveniente de la hojarasca, las raíces

de los pastos, los árboles, y el aporte de las excretas de los animales (GAMMA, 2010).

La mayor parte de trabajos para determinar carbono en SSP provienen de modelos ideados para bosques, lo que representa una limitante por las adaptaciones y modificaciones que deben realizarse de los mismos. Además, hasta el momento las investigaciones no han considerado el secuestro del carbono por parte del componente animal, que representa un eslabón muy importante dentro de SSP. Existe mucha discusión sobre los niveles de emisión y fijación de carbono en los sistemas agropecuarios, en muchos casos injustamente se promueve a la ganadería como una actividad emisora de gases de efecto invernadero, sin la mínima consideración que muchas fincas ganaderas fijan grandes cantidades de carbono, sea a través de la conservación de los bosques, reforestación, establecimiento de pasturas mejoradas, las cercas vivas, la producción de biogás a partir de excretas y otras técnicas más, que reducen y en muchos casos neutralizan los GEI emitidos (ROWLINSON, 2008).

2.5. Inventarios y contabilidad de carbono

Uno de los aspectos importantes de la captación y el almacenamiento de carbono (C) son el desarrollo y la aplicación de métodos para estimar y notificar las cantidades en que las emisiones de CO₂ son reducidas, evitadas o eliminadas de la atmósfera. Los dos elementos que forman parte de ello son, la estimación y notificación en sí de las emisiones

para los inventarios nacionales de los gases de efecto invernadero, y la contabilidad en relación con la captura y almacenamiento de carbono en el marco de los acuerdos internacionales para limitar las emisiones netas (IPCC, 2003).

Dada la falta de acuerdos internacionales vigentes, no está claro si las diversas formas de captación y almacenamiento de CO₂ serán tratados como reducciones de las emisiones o como eliminaciones de la atmósfera. En cualquier caso, la captura y almacenamiento de carbono da lugar a nuevos depósitos de CO₂ que podrían ser objeto de fugas físicas en un momento dado en el futuro. En la actualidad, no existe ningún método en el ámbito para la vigilancia, la medición o la contabilidad de fugas físicas en los lugares de almacenamiento. No obstante, es probable que las fugas de los lugares de almacenamiento geológico sujetos a una gestión apropiada sean pequeñas en cuanto a la magnitud y distantes en términos de tiempo (IPCC, 2003).

ANDRADE e IBRAHIM (2003), afirman que la gran variabilidad espacial de los sistemas silvopastoriles hace que los muestreos estratificados sean los más convenientes. El sistema total debe ser dividido en estratos (vegetación, suelo o topografía), los cuales se pueden definir empleando imágenes satelitales, fotografías aéreas, y mapas de vegetación, suelos o topografía.

2.6. Monitoreo y evaluación de almacenamiento de carbono

El monitoreo se relaciona con las mediciones de los reservorios de carbono dentro del sistema, tanto en la situación de proyecto como en la de no - proyecto, e incluye una medida del stock de carbono y mediciones de las emisiones de GEI. Sin embargo, no involucra cálculos de reducción de emisiones ni comparaciones con mediciones de líneas de base previas (CHIDIAK *et al.*, 2003).

Por su parte los mismos autores nos indican que la evaluación es una actividad realizada por una entidad operacional acreditada previo al registro del proyecto y se refiere al impacto del mismo: organiza y analiza la información provista por el monitoreo, compara esta información con información recolectada por otros medios y presenta los resultados del análisis de la performance global del mismo. De esta forma, las evaluaciones son utilizadas para determinar los niveles oficiales de reducción de emisiones de GEI que le corresponden al proyecto.

MACDIKEN (1997), considera que las características de las parcelas permanentes de muestreo (forma, tamaño y número) constituyen un aspecto clave del monitoreo. La forma de las parcelas depende enteramente de la distribución espacial de los árboles. En plantaciones lineales se debería usar parcelas con la misma forma; mientras que si los árboles se distribuyen al azar (dispersos), la forma más aconsejable es la circular; en sistemas con árboles

de distribución sistemática, recomienda las parcelas permanentes de muestreo rectangulares.

2.7. Componentes del almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles

En los sistemas forestales y silvopastoriles los principales depósitos de carbono son: la biomasa sobre el suelo, la biomasa bajo el suelo, el detritus, la madera muerta y el carbono orgánico del suelo. El mayor porcentaje de carbono almacenado se presenta en la biomasa sobre el suelo, como árboles, arbustos, palmas y herbáceas, ellos determinan el carbono sobre el suelo presentes en las fincas ganaderas (GAMMA, 2010).

La pastura es el principal componente herbáceo de los sistemas silvopastoriles. Los muestreos deben capturar toda la variabilidad de la biomasa herbácea, lo cual se logra localizando los puntos de muestreo a diferentes distancias de los árboles. La biomasa herbácea puede cuantificarse mediante marcos de muestreo (50 x 50 cm) (LÓPEZ *et al.*, 1999).

El mismo autor indica que el detritus comprende todos los residuos orgánicos (hojas secas, ramas, frutos y semillas) de la superficie del suelo. La cuantificación de este componente es similar a la descrita en el caso del componente herbáceo.

Los sistemas radiculares representan la biomasa bajo el suelo y constituyen otro sumidero de carbono. En proyectos de fijación de carbono este

componente es importante, ya que corresponde a entre un 10 y un 40% de biomasa total (MACDIKEN, 1997). El método más usado es el de muestreo con barreno de golpe, el cual consiste en la toma de muestras de suelo con un barreno de volumen conocido. Posteriormente, se deben separar las raíces del suelo y por especies estimar su biomasa. También indica que es importante realizar una estratificación del suelo según la profundidad, ya que generalmente, la mayor densidad de raíces finas se encuentra en los horizontes superficiales del suelo. La estimación de la biomasa de raíces estructurales se realiza por medios destructivos (BÖHM, 1979).

La estimación del almacenamiento de carbono se realiza a partir de los inventarios de la biomasa del ecosistema, empleando la fracción del carbono, que representa el porcentaje de carbono en la biomasa. Las estimaciones del carbono almacenado en sistemas arbóreos asumen, en su mayoría, un valor de 0,5 (LÓPEZ *et al.*, 1999). La fracción del carbono puede variar típicamente entre 0,42 y 0,47 en el fuste de los árboles en sistemas silvopastoriles (ANDRADE, 1999).

El carbono orgánico en suelos tiene también real importancia, ya que el suelo es un gran sumidero de carbono; sin embargo, los proyectos de carbono no le prestan atención requerida, ya que las negociaciones de carbono actuales no incluyen este componente, debido a que no es tan visible como la biomasa aérea. El cambio en el carbono orgánico del suelo debe ser medido a lo largo del sitio del proyecto, a una profundidad de 30 cm, ya que el cambio del uso del suelo ejerce el mayor efecto en las capas superiores (IPCC, 1996).

2.8. Estimaciones de almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles

Según ANDRADE (1999) en sistemas con pastos, el carbono almacenado fue mayor en los sistemas silvopastoriles (95 t C ha⁻¹), con respecto a las pasturas en monocultivo (68 para *Brachiaria* y 84 t C ha⁻¹ para ratana). TROUVE *et al.* (1994) obtuvieron un almacenamiento de 63 a 76 t C ha⁻¹ en sistemas silvopastoriles con *E. deglupta* en el Congo. El aporte de las pasturas en el almacenamiento de carbono fue inferior a 2.5 t C ha⁻¹. ANDRADE (1999) obtuvo un incremento anual de C en las pasturas de 0,35 y 1,5 t C ha⁻¹ para *B. brizantha* asociada a *E. deglupta* o *A. mangium*, respectivamente.

2.9. Almacenamiento de carbono en plantas de aguaje

Los aguajales son bosques de palmeras que crecen en suelos hidromórficos. Esta condición de hidromorfismo es la causa de que la materia orgánica se acumule en el suelo debido a las bajas tasas de descomposición.

Los aguajales son los más grandes almacenes de carbono entre los ecosistemas terrestres amazónicos, almacenan cerca de 400 t C ha⁻¹. El carbono es almacenado en la biomasa de las palmeras y árboles que crecen en los aguajales, pero principalmente en el suelo debido a las bajas tasas de descomposición de la materia orgánica (SALAZAR, 2007).

FREITAS *et al.* (2006) reportan datos en aguajales densos de 132 t C ha⁻¹, valor superior a lo reportado en otros ecosistemas; 111.8 t C ha⁻¹ (MÁRQUEZ, 2000), 81.8 t C ha⁻¹ (BARBARÁN, 1998) y 61.63 t C ha⁻¹ (IIAP, 2002), explicándose esta diferencia por las elevadas concentraciones de materia orgánica de los suelos de aguajales debido a su acidez y condición anaeróbica, situación característica de estos humedales. En el ecosistema de aguajal mixto se reportan 115,72 t C ha⁻¹, valor menor a lo encontrado por (GUZMÁN, 2003), quien reportó 148,16 y 169,51 t C ha⁻¹ en promedio para aguajales con manejo o sin él, respectivamente. Esta diferencia se explicaría por la metodología asumida, puesto que en el presente estudio se aumentó la muestra para la evaluación de las medidas dasométricas y las de la raíz.

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales

- Pala plana
- Wincha de 50 metros
- Machete
- Cilindro de densidad aparente de volumen conocido
- Bolsas de papel
- Libreta de apuntes
- Lapicero
- Metro de madera
- Regla
- Bolsas plásticas de 10 x 20
- Metro cuadrado
- Cuadrante de 0,50 x 0,50 metros
- Rafia
- Bastidor de 01 metro cuadrado

3.2.2. Equipos

- Balanza de 10 kg
- Balanza de precisión digital
- Estufa
- Tijera podadora.

- Cámara fotográfica
- Calculadora
- Computadora
- Impresora
- GPS

3.3. Metodología

La metodología que se desarrolló para la determinación de carbono en los sistemas ganaderos, fue una mixtura de la propuesta por el Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) (RÜGNITZ *et al.*, 2009), y las propuestas por el grupo Ganadería y Medio Ambiente (GAMMA) (IBRAHIM *et al.*, 2003).

3.3.1. Selección de los sistemas ganaderos

Se seleccionó tres sistemas del módulo lechero; la primera, establecida con *B. decumbens*, *C. spruceanum*, y *E. fusca*, que corresponde a un sistema silvopastoril multiestrato (SSP1); la segunda con *P. plicatulum*, y *M. flexuosa*, que corresponde a un sistema silvopastoril con aguaje (SSP2) y el tercer sistema con *Axonopus compressus* y *Paspalum conjugatum*, que corresponde a un sistema tradicional con pastura natural (ST). Estos sistemas fueron establecidos hace más de 20 años. El uso del suelo anterior a la pastura, fueron cultivos anuales y el cultivo de coca, por lo que la característica principal son pasturas establecidas en suelos pobres o degradados. Actualmente se encuentran libres de pastoreo.

3.3.2. Demarcación del área de estudio

Tal como sugiere la metodología propuesta por el Grupo GAMMA, (IBRAHIM *et al.*, 2003) para la evaluación de biomasa en potreros se demarcó un área de 1000 metros cuadrados.

Cada subparcela (repetición) tendrá 10 m. x 10 m. y se delimitó utilizando rafia de color. Los puntos naranjas (estrella) indican los puntos de muestreo, seleccionados al azar, de la biomasa sobre el suelo (herbáceo y hojarasca) y la biomasa bajo suelo (raíces); los puntos verdes indican la biomasa arbórea en las parcelas, los puntos rojos, indican los límites de cada subparcela; y el punto amarillo corresponde al punto de georeferenciación de cada parcela. Se ubicó sobre pendientes similares para que no registre alguna variación topográfica.

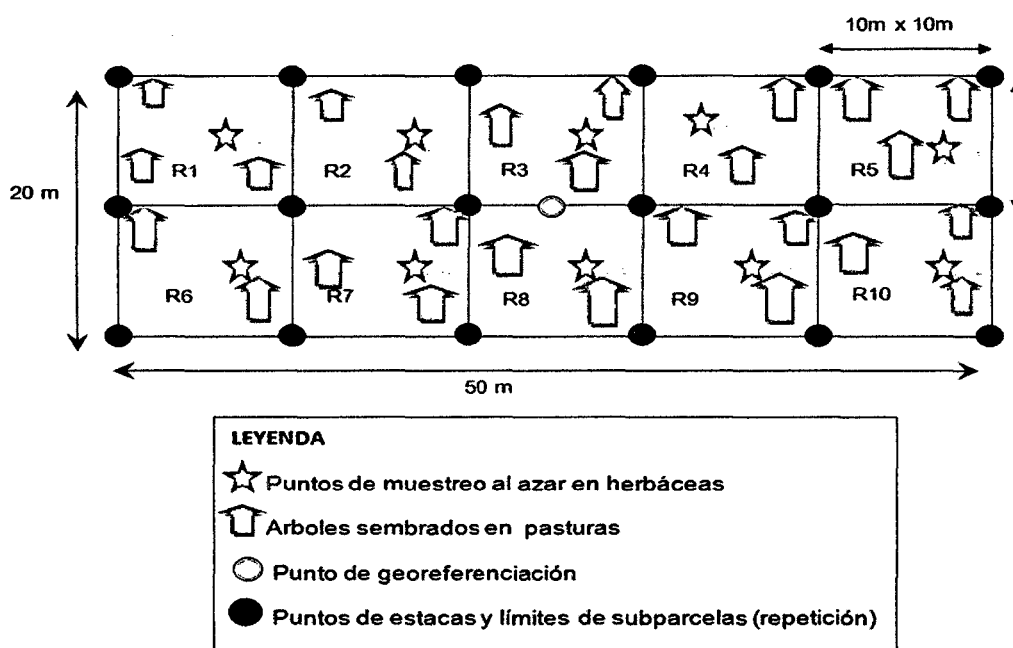


Figura 2. Esquema de la parcela y sus medidas en estudio.

3.3.3. Determinación del carbono aéreo

El contenido del carbono aéreo en sistemas silvopastoriles se debe a la suma de los componentes de la biomasa arbórea (árboles, palmeras), biomasa del estrato herbáceo (gramíneas, leguminosas, malezas) y biomasa de la hojarasca (o necromasa).

3.3.3.1. Determinación de la biomasa arbórea

Para estimar la biomasa arbórea de la eritrina (*E. fusca*) se utilizó el método destructivo (RÜGNITZ *et al.*, 2009), para estimar la biomasa de la capirona (*C. spruceanum*) y el aguaje (*M. flexuosa*) se utilizó ecuaciones alométricas específicas para estas especies.

Para la evaluación de la biomasa arbórea de la eritrina (*Eritrina fusca*) se procedió a cortar tallos, ramas y hojas de la eritrina en cada subparcela y se registró como materia verde (MV). La materia verde de cada subparcela se pesó en campo con el uso de una balanza de reloj de capacidad de 10 kg. Se tuvo 10 repeticiones por sistema.

Para determinar la materia seca (MS) se tomó una submuestra de la materia verde (MV) de eritrina (aproximadamente de 200 gramos) en bolsas codificadas. En el laboratorio de pastos, la submuestra fue pesada en una balanza digital, para luego ser colocada en bolsa de papel codificado y puesta en la estufa por tres días a 70° C hasta obtener el peso seco constante. La submuestra seca fue pesada con la misma balanza digital,

determinando el porcentaje de materia seca de cada submuestra. Posteriormente por regla tres simple se determinó la biomasa en materia seca de cada subparcela y se extrapolió a toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$).

$$\%MS = (MS_{submuestra} / MV_{submuestra}) \times 100$$

Dónde:

$\%MS$: Porcentaje de la materia seca (valor en %)

$MS_{submuestra}$: Peso de la submuestra seca (kg)

$MV_{submuestra}$: Peso de la submuestra en verde (Kg)

100: Factor para obtener el porcentaje

$$\text{Biomasa arbórea}(t\ ha^{-1}) = MVA_{muestra} \times (\%MS) \times 10$$

Dónde:

$\text{Biomasa arbórea}(t\ ha^{-1})$: Biomasa arbórea (materia seca)

$MVA_{muestra}$: Materia verde arbórea de la muestra expresada en kg

$\%MS$: Porcentaje de la materia seca de la muestra.

10: Factor para convertir kg a $t\ ha^{-1}$

Para determinar el carbono contenido en la biomasa arbórea de la eritrina, según la metodología del ICRAF (RÜGNITZ *et al.*, 2009) se multiplicó por el factor 0,5. Se aplicó la siguiente fórmula:

$$\text{Carbono arbóreo (t ha}^{-1}\text{)} = \text{biomasa arbórea (t ha}^{-1}\text{)} \times 0.5$$

Para la evaluación de la biomasa arbórea del capirona (*C. spruceanum*) se utilizó la ecuación alométrica para madera dura (IPCC, 2003).

$$Y = EXP\left[-2.289 + 2.649 \times LN(dap) - 0.021 \times (dap)^2\right]$$

Dónde:

Y = materia seca sobre el suelo, en kg de materia seca por árbol

EXP = "elevado a la potencia de"

dap = diámetro a la altura del pecho, en cm

LN = logaritmo natural;

Para la evaluación de la biomasa arbórea del aguaje, se utilizó la ecuación alométrica para palmeras (FRANGI Y LUGO, 1985).

$$Y = 4.5 + 77 \times H$$

Dónde:

Y = materia seca sobre el suelo, en kg de materia seca por árbol

H : altura en metros

Para determinar el carbono contenido en la biomasa arbórea del capirona y del aguaje, se multiplicó por el factor 0,5 según la metodología del ICRAF (RÜGNITZ *et al.*, 2009). Se aplicó la siguiente formula:

$$\text{Carbono arbóreo (t ha}^{-1}\text{)} = \text{biomasa arbórea (t ha}^{-1}\text{)} \times 0.5$$

3.3.3.2. Determinación de la biomasa herbácea

Con el uso del cuadrante de madera de 1 m. x 1 m., se seleccionó al azar el punto de muestreo en cada una de las subparcelas de 10 m. x 10 m. En estas subparcelas se utilizó una tijera podadora para coleccionar toda la biomasa aérea (herbácea) a ras del suelo (2 cm sobre la superficie), y se registró como materia verde (MV). La materia verde de cada subparcela se pesó en campo con el uso de una balanza de reloj de capacidad de 10 kg. Del componente herbáceo se tuvo 10 repeticiones por parcela (sistema).

Para la determinación de la materia seca (MS) se tomó una submuestra de biomasa herbácea (aproximadamente de 200 gramos) en bolsas codificadas. En el laboratorio de pastos, la submuestra fue pesada en balanza digital, colocada en bolsa de papel codificada y puesta en la estufa por tres días a 70° C hasta obtener el peso seco constante. La submuestra seca fue pesada con la misma balanza digital, determinando el porcentaje de

materia seca de cada submuestra. Posteriormente por regla tres simple se determinó la biomasa en materia seca del metro cuadrado y se extrapoló a toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$).

$$\%MS = (MS_{submuestra} / MV_{submuestra}) \times 100$$

Dónde:

$\%MS$: Porcentaje de la materia seca (valor en %)

$MS_{submuestra}$: Peso de la submuestra seca (kg)

$MV_{submuestra}$: Peso de la submuestra en verde (Kg)

100: Factor para obtener el porcentaje

$$\text{Biomasa herbácea}(t\ ha^{-1}) = MVH_{muestra} \times (\%MS) \times 10$$

Dónde:

Biomasa herbácea($t\ ha^{-1}$): Biomasa herbácea
(materia seca)

$MVH_{muestra}$: Materia verde herbácea de la muestra
expresada en $kg\ m^{-2}$

$\%MS$: Porcentaje de la materia seca de la muestra.

10: Factor para convertir $kg\ m^{-2}$ a $t\ ha^{-1}$

3.3.3.3. Determinación de la biomasa hojarasca

Se determinó con base a la capa de mantillo u hojarasca y otros materiales muertos (ramillas, ramas) en cuadrantes de 0,5 m. x 0,5 m. colocados dentro de cada uno del cuadrante de 1 m x 1 m. Del componente hojarasca se obtuvo 10 repeticiones por parcela (sistema). Estas muestras fueron puestas en bolsas codificadas, se registró su peso con una balanza digital, luego se llevaron las muestras al laboratorio de pastos y se colocaron en la estufa por tres días a 70 °C hasta obtener el peso seco constante. El peso de materia seca de la hojarasca, se extrapoló a toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$).

$$\text{Biomasa hojarasca}(t\ ha^{-1}) = MVH_{\text{muestra}} \times (\%MS) \times 10$$

Dónde:

Biomasa hojarasca($t\ ha^{-1}$): Biomasa hojarasca
(materia seca)

MVH_{muestra} : Materia verde hojarasca de la muestra
expresada en $kg\ m^{-2}$

$\%MS$: Porcentaje de la materia seca de la muestra.

10: Factor para convertir $kg\ m^{-2}$ a $t\ ha^{-1}$

3.3.3.4. Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea (arbórea, herbácea y hojarasca)

Para determinar el carbono contenido en cada componente, se aplicó la metodología del ICRAF (RÜGNITZ *et al.*, 2009) donde se multiplicó por el factor 0,5. Se aplicaron las siguientes fórmulas:

$$\text{Carbono arbórea}(t\ ha^{-1})(CH) = \text{biomasa arbórea}(t\ ha^{-1}) \times 0,5$$

$$\text{Carbono herbácea}(t\ ha^{-1})(Ch) = \text{biomasa herbácea}(t\ ha^{-1}) \times 0,5$$

$$\text{Carbono hojarasca}(t\ ha^{-1})(CR) = \text{biomasa hojarasca}(t\ ha^{-1}) \times 0,5$$

$$\text{Carbono}_{\text{biomasa aérea}} = \text{Carbono}_{\text{arbórea}} + \text{Carbono}_{\text{herbácea}} + \text{Carbono}_{\text{hojarasca}}$$

3.3.4. Determinación del carbono bajo suelo

El carbono bajo suelo en sistemas silvopastoriles es producto de la biomasa radicular (herbáceo) y del carbono orgánico del suelo.

3.3.4.1. Determinación de la biomasa radicular

Como sabemos los sistemas radiculares representan la biomasa bajo el suelo y constituyen otro importante sumidero de carbono. En proyectos de fijación de carbono este componente es importante, ya que corresponde entre un 10 y un 40 % de la biomasa total (MACDIKEN 1997). La biomasa de las raíces se estimó por medición directa.

Para determinar la biomasa radicular, se construyó una mini calicata de 50 cm. de largo y 30 cm. de ancho por 50 cm. de profundidad como punto de muestreo. Se utilizó el método de medición directa de biomasa de raíces sugerida por BÖHM (1979), que consiste en la toma de muestras de suelo con un barreno de volumen conocido (área de 20.25 cm² y 10 cm de largo). Tal como sugiere RÜGNITZ *et al.*, (2009), se tomaron muestras de raíces a tres profundidades: 0 - 10 cm, 10 - 20 cm, y de 20 - 30 cm, por la predominancia de raíces en los primeros 30 centímetros. Cada muestra de suelo con raíces se colocó en bolsas codificadas indicando su profundidad. Posteriormente en el laboratorio se procedió al lavado y tamizado (tamiz de 2 mm) de las raíces finas manualmente.

Las raíces encontradas se secaron con papel toalla y se pesó como materia verde con una balanza digital. Posteriormente, al igual que la biomasa herbácea, se determinó la materia seca por el método de la estufa.

Este peso de biomasa radicular se extrapoló a toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$).

$$\text{Biomasa radicular} (t\ ha^{-1}) = \sum_{i=1}^{i=n} (MVr_{\text{muestra}} \times (\%MS) \times 10)_{\text{profundidad}}$$

Dónde:

i = Profundidad evaluada

n = tres profundidades

Biomasa radicular ($t\ ha^{-1}$) = Biomasa radicular (materia seca)

$Mr_{muestra}$ = Materia verde radicular de la muestra expresada en $kg\ m^{-2}$

%MS = Porcentaje de la materia de la muestra

10 = Factor para convertir $kg\ m^{-2}$ a $t\ ha^{-1}$

Para determinar el carbono contenido en la biomasa radicular, se multiplicó por el factor 0,5 según la metodología del ICRAF (RÜGNITZ *et al.*, 2009). Se aplicó la siguiente formula:

$$\text{Carbono radicular}(t\ ha^{-1})(CR) = \text{biomasa radicular}(t\ ha^{-1}) \times 0,5$$

3.3.4.2. Estimación del carbono orgánico del suelo

Para estimar el contenido de carbono orgánico, se utilizó el método de Walkley Black (método de oxidación húmeda) por que no demanda de equipos sofisticados. Se tomaron muestras de suelo por cada estrato (0 – 10cm.; 10 – 20cm.; y 20 – 30cm.) utilizando el barreno de muestreo. Se mezclaron cada muestra por estrato (profundidad) para

homogenizar la muestra. Se pesó 200 gramos de esta muestra previamente codificada indicando el suelo por tipo de sistema y profundidad de muestra, luego se envió al laboratorio de suelos para obtener los datos de materia orgánica por profundidad.

Para la estimación del carbono orgánico del suelo en cada estrato de evaluación (0-10 cm, 10-20 cm, y 20-30 cm), se utilizó la fórmula sugerida por MACDICKEN (1997). El carbono almacenado en el suelo es calculado por medio de la sumatoria del carbono almacenado en cada horizonte definido.

$$Cos(t\ ha^{-1}) = \sum_{i=1}^{i=n} \left(\left[\frac{CO}{100} \right] \times Dap \times Ps \times 10000 \right)_{\text{profundidad}}$$

Dónde:

$Cos(t\ h^{-1})$: Carbono orgánico del suelo

i : profundidad evaluada.

n : tres profundidades

$[CO]$ (%): Concentración de carbono orgánico en %.

$\%CO = 0,58 \times \%MO$ (según WALKLEY y BLACK, 1938)

Dap ($t\ m^{-3}$): densidad aparente de la profundidad evaluada ($t\ m^{-3}$)

Ps (m): profundidad de muestreo (m)

10000: área m^{-2}

La estimación de la densidad aparente fue determinada por el método del cilindro, que consistió en introducir un cilindro metálico al suelo para extraer una muestra de volumen conocido (502.66 cm³) y secar al horno a 105°C por 72 horas, para determinar su peso seco (PS). Posteriormente, el peso seco se dividió entre el volumen del suelo (volumen interno del cilindro).

$$Da = \frac{PS}{V_{\text{cilindro}}}$$

Dónde:

Da: Densidad aparente

PS: Peso seco

*V*_{cilindro}: Volumen del cilindro

3.3.4.3. Estimación del carbono bajo suelo (radicular, carbono orgánico del suelo)

Para estimar el carbono bajo suelo se procedió a la suma de los componentes de la biomasa radicular y del carbono orgánico del suelo.

3.3.5. Estimación del almacenamiento del carbono total en los sistemas

Para determinar la cantidad de carbono total almacenado en el sistema se procedió a desarrollar la siguiente ecuación:

$$CAS(t\ ha^{-1}) = CA + CH + Ch + CR + COS$$

Dónde:

CAS: Carbono almacenado por sistema ($t\ ha^{-1}$)

CA: Carbono arbóreo ($t\ ha^{-1}$)

CH: Carbono herbáceo ($t\ ha^{-1}$)

Ch: Carbono hojarasca ($t\ ha^{-1}$)

CR: Carbono radicular ($t\ ha^{-1}$)

COS: Carbono orgánico de suelo ($t\ ha^{-1}$)

3.4. Variable independiente

Las variables independientes son los sistemas en estudio: un sistema tradicional con pastura natural (ST), un sistema silvopastoril multiestrato con *B. decumbens*, capirona, eritrina (SSP1) y un sistema silvopastoril con aguaje y *P. plicatum* (SSP2).

3.5. Variables dependientes

– Carbono arbóreo

- Carbono herbáceo
- Carbono de hojarasca
- Carbono radicular
- Carbono orgánico de suelo
- Carbono total almacenado por el sistema

3.6. Análisis estadístico

Se utilizó el diseño completamente al azar (DCA) con 3 sistemas y 10 repeticiones por cada sistema.

El modelo aditivo lineal fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + S_i + \varepsilon_{ij}$$

Dónde:

Y_{ij} : Variable respuesta en la j-ésima repetición del i-ésimo sistema

μ : Media general de las observaciones.

S_i : Efecto del i-ésimo sistema.

ε_{ij} : Error aleatorio.

Los datos de las variables evaluadas fueron analizados utilizando el software estadístico InfoStat versión 2.1; asimismo, se añaden gráficos que ilustran con mayor detalle los resultados obtenidos.

IV. RESULTADOS

4.1. Carbono de la biomasa aérea en tres sistemas ganaderos

Las reservas de carbono de la biomasa aérea de los tres sistemas en estudio se detallan en el cuadro 1. Esta biomasa comprende la existente en el componente herbáceo, la hojarasca y el arbóreo, del cual esta última solo está presente en los dos primeros sistemas.

Cuadro 1. Carbono de la biomasa aérea en tres sistemas ganaderos, expresadas en t.C.ha⁻¹ (media ± error estándar).

SISTEMA	Carbono arbóreo	Carbono herbáceo	Carbono hojarasca	Carbono aéreo
SSP 1	2.82 ± 0.15 a	3.99 ± 0.25 a	4.56 ± 0.25 a	11.38 ± 0.39 a
SSP 2	2.25 ± 0.13 b	3.84 ± 0.22 a	3.55 ± 0.20 b	9.64 ± 0.37 b
ST		3.01 ± 0.14 b	0.50 ± 0.02 c	3.51 ± 0.15 c
p-valor	0.008	0.0057	< 0.0001	< 0.0001

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$), según prueba de Tukey.

SSP 1: *Calycophyllum spruceanum* + *Erythrina fusca* + *Brachiaria decumbens* (SSP Multiestrato)

SSP 2: *Mauritia flexuosa* + *Paspalum plicatulum*

ST: *Axonopus compressus* + *Paspalum conjugatum*

De acuerdo a los resultados se puede observar que existe clara evidencia para considerar que los sistemas ganaderos en estudio contienen distintas reservas de carbono aéreo. Con respecto al carbono arbóreo solo los sistemas silvopastoriles (SSP 1 y SPP 2) son comparados, de ello resultó que

el sistema silvopastoril multiestrato (capirona, eritrina y *B. decumbens*) supera estadísticamente al sistema silvopastoril con aguaje y *P. plicatulum* ($p < 0.05$) que va de 2.82 y 2.25 t C ha⁻¹ respectivamente. Con respecto al carbono herbáceo y hojarasca existen diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre los sistemas evaluados, resultando el sistema con pastura natural (ST) con menores reservas de carbono a comparación con los sistemas silvopastoriles que contienen pasturas mejoradas. Para el total de carbono aéreo se observa diferencias significativas entre los sistemas ($p < 0.05$), resultando con mayor reserva de carbono aéreo el sistema silvopastoril multiestrato (SSP1), seguido del sistema silvopastoril con aguaje (SSP2) (11.38 y 9.64 t C ha⁻¹ respectivamente); mientras que el sistema con pastura natural solo obtuvo una reserva de 3.51 t C ha⁻¹.

Las reservas de carbono aéreo se detallan gráficamente en la figura 3.

La Figura 3 muestra las cajas de boxplot del carbono aéreo para los sistemas ganaderos evaluados. Se observa que los tres sistemas tienen al menos un valor extremo izquierdo que hace una ligera distribución asíntota hacia la izquierda. La siguiente figura (Figura 4), detalla el contenido de carbono por componente herbáceo y hojarasca.

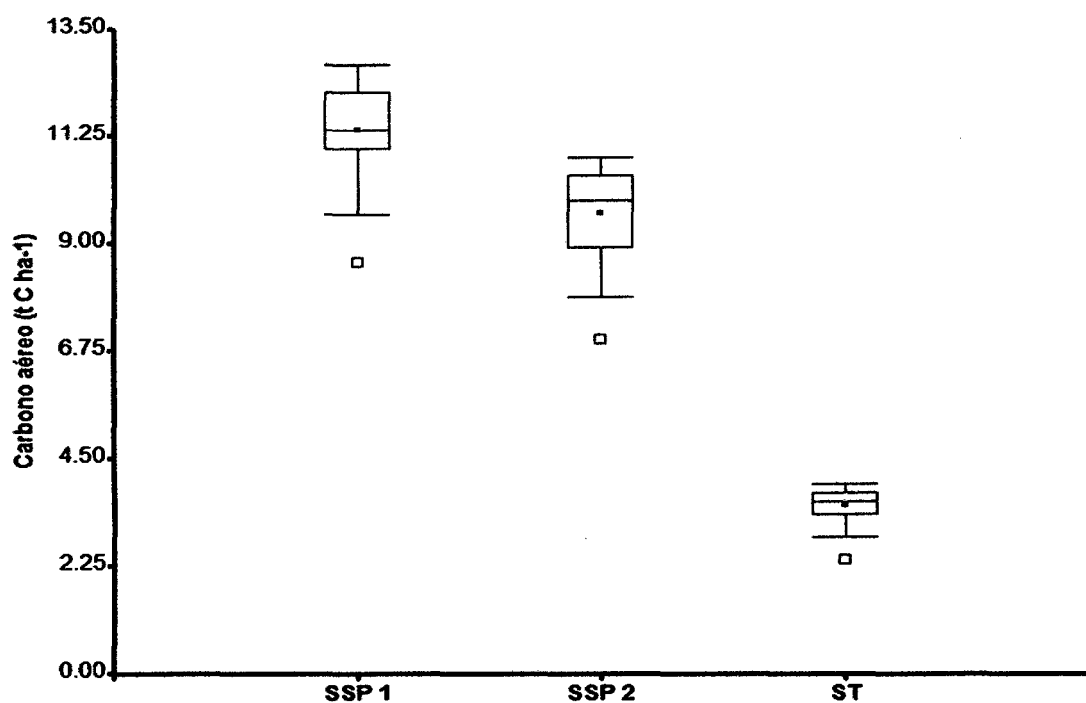


Figura 3. Gráfico de boxplot para el contenido de carbono aéreo entre sistemas ganaderos.

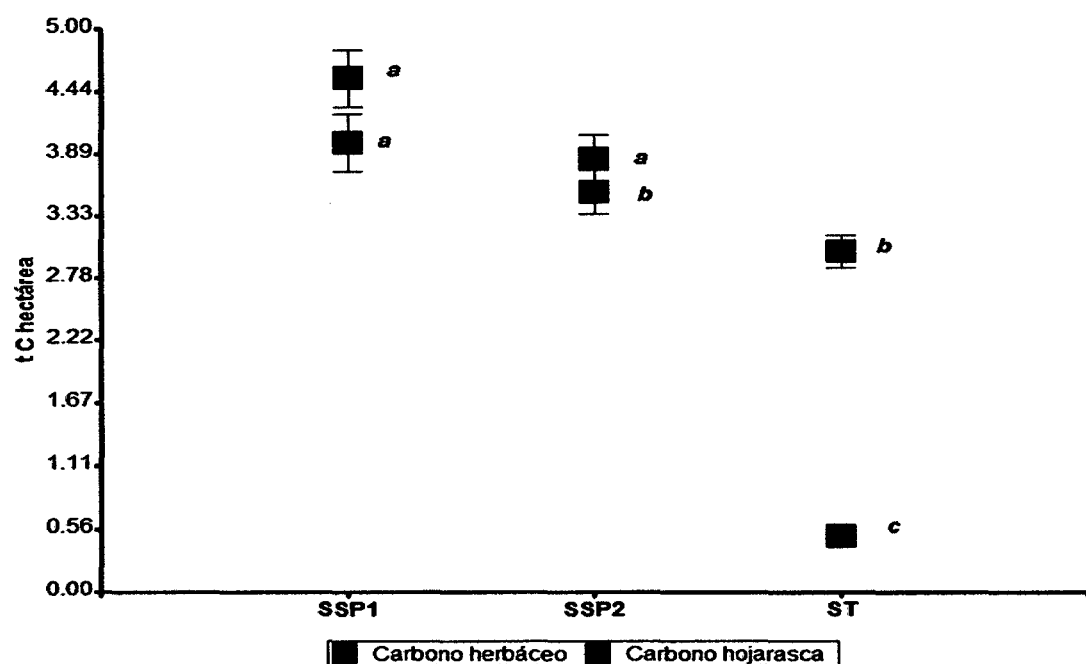


Figura 4. Contenido de carbono ($t.C.ha^{-1}$) por componentes herbáceo y hojarasca entre sistemas

Tal como muestra la Figura 4, los sistemas silvopastoriles (SSP1 y SSP2) contienen mayores contenidos de carbono herbáceo (rojo) que la pastura natural (ST), marcando mayor diferencia entre sistemas en el contenido del carbono de hojarasca (azul).

4.2. Carbono bajo suelo entre los sistemas evaluados

4.2.1. Carbono radicular

Cuadro 2. Biomasa radicular y carbono radicular por profundidad de horizonte entre los sistemas (Media \pm error estándar).

Profundidad del horizonte (cm)	Sistema	Biomasa radicular (gr.m ⁻²)	Carbono radicular (t.ha ⁻¹)
0 - 10	SSP1	284.25 \pm 22.90 a	1.42 \pm 0.11 a
	SSP2	346.69 \pm 18.82 b	1.73 \pm 0.09 b
	ST	416.47 \pm 36.16 c	2.08 \pm 0.18 c
	P-valor	0.0070	0.0070
10 - 20	SSP1	63.08 \pm 7.00 a	0.32 \pm 0.03 a
	SSP2	70.22 \pm 6.34 a	0.35 \pm 0.03 a
	ST	28.70 \pm 5.66 b	0.14 \pm 0.03 b
	P-valor	0.0002	0.0002
20 - 30	SSP1	21.79 \pm 3.87 a	0.11 \pm 0.02 a
	SSP2	11.36 \pm 1.93 b	0.06 \pm 0.01 b
	ST	4.60 \pm 2.47 b	0.02 \pm 0.01 b
	P-valor	0.0010	0.0010
0 - 30	SSP1	369.12 \pm 28.56 a	1.85 \pm 0.14 a
	SSP2	428.28 \pm 23.30 a	2.14 \pm 0.12 a
	ST	449.77 \pm 35.83 a	2.25 \pm 0.18 a
	P-valor	0.1575	0.1565

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$), según prueba de Tukey.
 SSP 1: *Calycophyllum spruceanum* + *Erythrina fusca* + *Brachiaria decumbens* (SSP Multiestrato)
 SSP 2: *Mauritia flexuosa* + *Paspalum plicatulum*
 ST: *Axonopus compressus* + *Paspalum conjugatum*

Tal como muestra el Cuadro 2, en los primeros 10 centímetros existe una clara evidencia estadística ($p < 0.05$) que el sistema con pastura natural (ST) contiene mayores reservas de biomasa radicular por metro cuadrado (g.m^{-2}) que los sistemas silvopastoriles con pasturas mejoradas (SSP1 y SSP2), trayendo consigo mayor reserva de carbono del sistema con pastura natural. A mayores profundidades (10 a 20 y 20 a 30 centímetros), los sistemas con pasturas mejoradas (SSP1 y SSP2), incrementan su biomasa radicular estadísticamente diferente ($p < 0.05$) al de la pastura natural (ST). Es importante indicar que si bien es cierto, en cada estrato de evaluación existen diferencias estadísticas entre los sistemas evaluados, eso no ocurre cuando se toma de 0 a 30 centímetros de profundidad, resultando una igualdad estadística entre los sistemas ($p > 0.05$) en cuanto al contenido de biomasa radicular y de carbono radicular.

El contenido de biomasa radicular total y por estrato de profundidad es detallado en la siguiente figura.

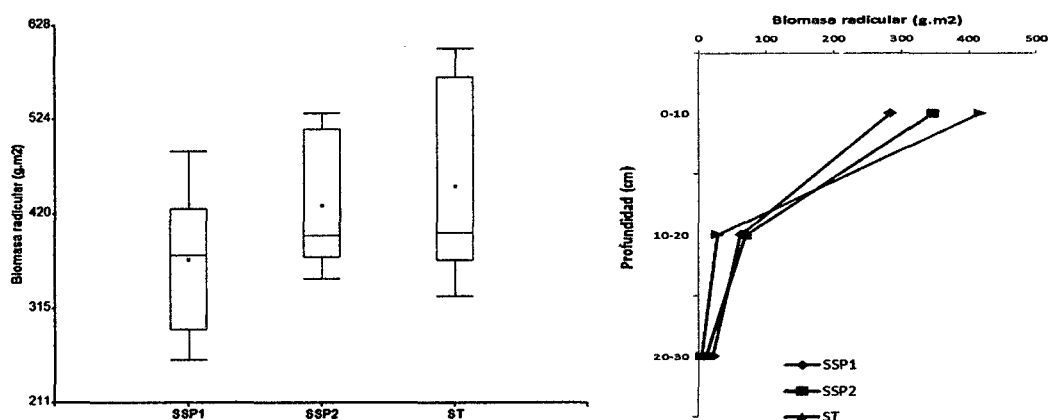


Figura 5. Biomasa radicular (g.m^{-2}) por sistema evaluado (boxplot - a); biomasa radicular por estrato (b).

La Figura 5 muestra con mayor detalle el contenido de la biomasa radicular de los sistemas evaluados. Para la figura a, las cajas de boxplot indican la variabilidad de los datos en cada sistema, siendo el sistema con pastura natural (ST) la que presenta mayor variabilidad de los datos. En la figura b, muestra que a mayor profundidad de evaluación se reduce el contenido de la biomasa radicular, estando en los primeros 10 centímetros la mayor biomasa en todos los sistemas.

El contenido del carbono radicular se detalla en la siguiente figura.

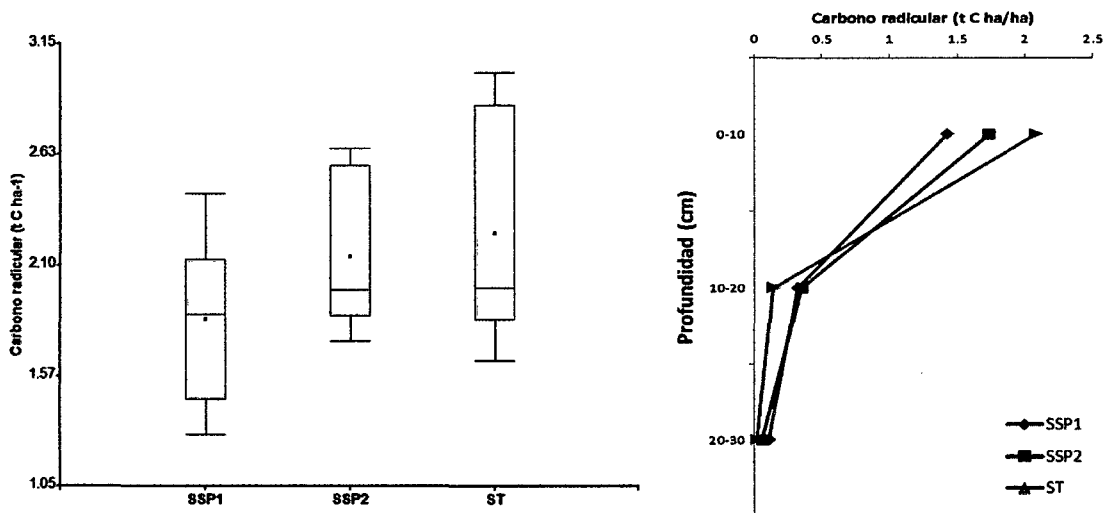


Figura 6. Carbono radicular (t C ha⁻¹) por sistema evaluado (boxplot (a)); carbono radicular por estrato (b).

4.2.2. Carbono orgánico del suelo (COS)

El Cuadro 3 muestra los resultados de la evaluación del carbono orgánico del suelo en los tres niveles de evaluación. La Figura 10 detalla el

comportamiento del contenido de la materia orgánica y de la densidad aparente del suelo.

Cuadro 3. Materia orgánica, densidad aparente y COS por profundidad de horizonte en las pasturas (Media \pm error estándar).

Profundidad del horizonte (cm)	Sistema	Materia orgánica (%)	Densidad aparente (t.ha ⁻³)	COS (t.ha ⁻¹)
0 - 10	SSP1	2.3	1.33 \pm 0.02 a	17.71 \pm 0.28 c
	SSP2	2.9	1.30 \pm 0.02 a	21.86 \pm 0.41 a
	ST	2.7	1.28 \pm 0.02 a	20.00 \pm 0.37 b
	P-valor		0.3113	<0.0001
10 - 20	SSP1	1.6	1.50 \pm 0.02 a	13.91 \pm 0.19 b
	SSP2	1.5	1.47 \pm 0.02 a	12.80 \pm 0.18 c
	ST	2.2	1.47 \pm 0.03 a	18.74 \pm 0.35 a
	P-valor		0.6122	<0.0001
20 - 30	SSP1	1.1	1.69 \pm 0.02 a	10.81 \pm 0.11 b
	SSP2	1.0	1.62 \pm 0.02 a	9.39 \pm 0.14 c
	ST	1.3	1.65 \pm 0.02 a	12.46 \pm 0.17 a
	P-valor		0.0633	<0.0001
0 - 30	SSP1			42.43 \pm 0.51 b
	SSP2			44.05 \pm 0.69 b
	ST			51.20 \pm 0.86 a
	P-valor			<0.0001

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$), según prueba de Tukey.
 SSP 1: *Calycophyllum spruceanum* + *Erythrina fusca* + *Brachiaria decumbens* (SSP Multiestrato)
 SSP 2: *Mauritia flexuosa* + *Paspalum plicatulum*
 ST: *Axonopus compressus* + *Paspalum conjugatum*

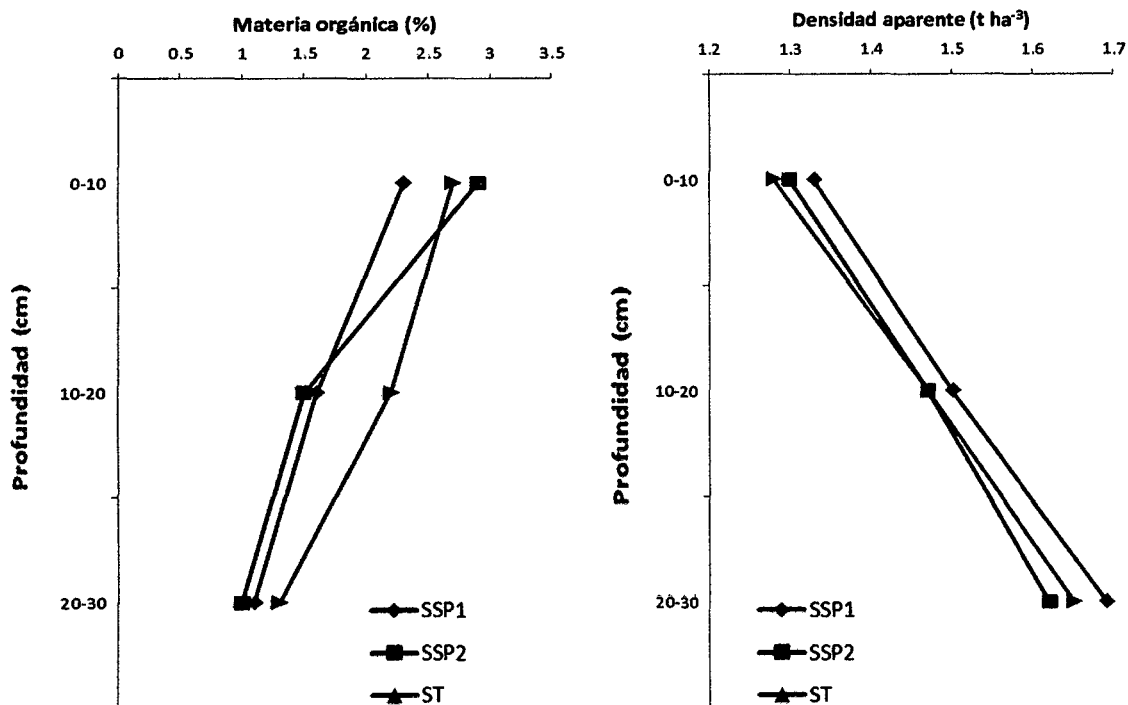


Figura 7. Materia orgánica (%) evaluada a tres profundidades (a); Densidad aparente a tres profundidades ($t\ ha^{-3}$) (b) en tres sistemas.

El contenido de materia orgánica en los tres sistemas evaluados se observa una disminución a mayores profundidades. Sin embargo, el sistema tradicional (ST) es la que contienen mayores reservas que los otros sistemas (SSP1 y SSP2) en los dos últimos niveles de profundidad, demostrando con ello mayor riqueza en materia orgánica. Con respecto a la densidad aparente se observa similar comportamiento entre los tres sistemas evaluados, a mayor profundidad aumenta la densidad aparente, por lo tanto menor compactación.

La Figura 8, muestra el contenido de carbono orgánico del suelo a tres niveles de profundidad.

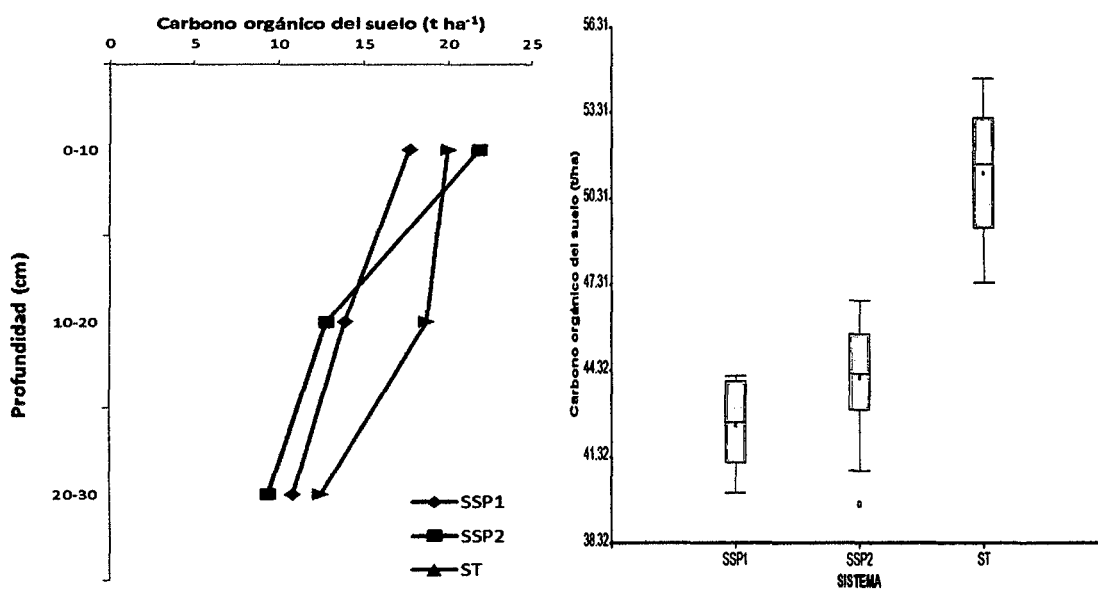


Figura 8. Carbono orgánico del suelo ($t \cdot ha^{-1}$) en tres profundidades (a); boxplot del carbono orgánico del suelo ($t \cdot ha^{-1}$) en tres sistemas (b).

En la Figura 8 a, se observa que el comportamiento de las reservas de carbono orgánico del suelo a tres profundidades resulta similar al contenido de materia orgánica, resultando con mayores reservas el sistema tradicional (ST) de a profundidades de 20 y 30 centímetros. El sistema silvopastoril multiestrato con capirona (SSP1) contiene mayor reserva de carbono orgánico del suelo en los primeros 10 centímetros de profundidad. Con respecto a la Figura 8 b, las cajas de boxplot muestran que a los primeros 30 centímetros de profundidad existe mayores reservas de carbono orgánico del suelo en el sistema con pastura natural (ST) a comparación con los sistemas silvopastoriles (SSP1 y SSP2) ($p < 0.05$).

4.2.3. Carbono bajo suelo

Cuadro 4. Carbono bajo suelo en los sistemas ganaderos evaluados y expresadas en t C ha⁻¹ (n=10; media ± error estándar).

Sistema	n	Carbono radicular	Carbono orgánico del suelo	Carbono bajo suelo
SSP1	10	1.85 ± 0.14 a	42.43 ± 0.51 b	44.28 ± 0.55 b
SSP2	10	2.14 ± 0.12 a	44.05 ± 0.69 b	46.19 ± 0.73 b
ST	10	2.25 ± 0.18 a	51.20 ± 0.86 a	53.45 ± 0.81 a
	p-valor	0.1565	<0.0001	<0.0001

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$), según prueba de Tukey.
 SSP 1: *Calycophyllum spruceanum* + *Erythrina fusca* + *Brachiaria decumbens* (SSP Multiestrato)
 SSP 2: *Mauritia flexuosa* + *Paspalum plicatulum*
 ST: *Axonopus compressus* + *Paspalum conjugatum*

Según el Cuadro 4, existe clara evidencia para afirmar que existe diferencia estadística entre los sistemas evaluados con respecto a las reserva de carbono bajo suelo del sistema ($p < 0.05$), a pesar que el contenido del carbono radicular no expresaba diferenciación alguna entre los sistemas ($p > 0.05$), el COS permite marcar diferencias. El sistema con pastura natural contiene mayor reserva de carbono bajo suelo (53.45 t C ha⁻¹) que los sistemas silvopastoriles (SSP1 y SSP2) (44.28 y 46.19 t C ha⁻¹ respectivamente). El gráfico de boxplot detalla mejor este comportamiento (Figura 9).

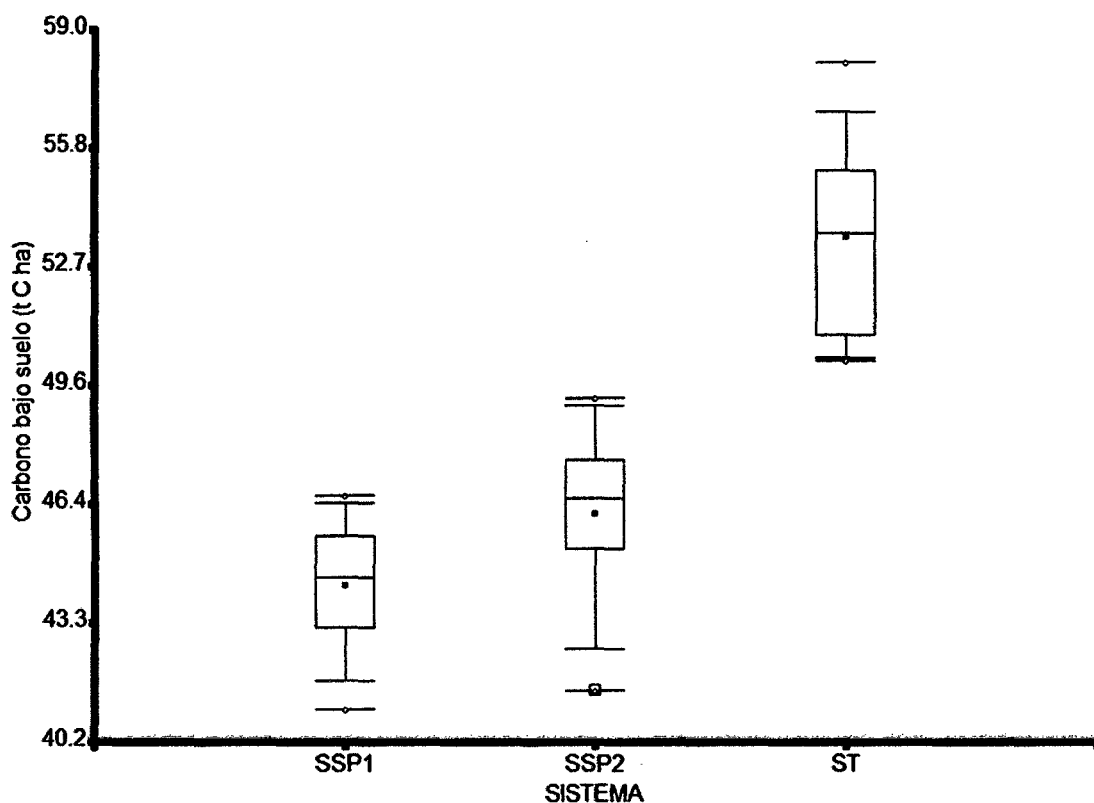


Figura 9. Gráfico de boxplot para el contenido de carbono bajo suelo ($t. C.ha^{-1}$) entre sistemas.

La Figura 9 muestra el comportamiento del contenido de carbono bajo suelo con respecto a los sistemas evaluados, donde el sistema con pastura natural (ST) alcanza mayores reservas de carbono que los sistemas silvopastoriles ($p < 0.05$). Los sistemas silvopastoriles contienen reservas de carbono bajo suelo en similares cantidades ($p > 0.05$).

4.3. Reserva total de carbono en los sistemas ganaderos evaluados

La reserva total de carbono en los tres sistemas ganaderos involucra el carbono aéreo y el carbono bajo suelo. El Cuadro 5 muestra los resultados.

Cuadro 5. Carbono total en dos sistemas de pasturas, expresadas en t.C.ha⁻¹ (n=10; media ± error estándar).

Sistema	n	Carbono aéreo	Carbono bajo suelo	Carbono total
SSP1	10	11.38 ± 0.39 a	44.28 ± 0.55 b	55.65 ± 0.66 a
SSP2	10	9.64 ± 0.37 b	46.19 ± 0.73 b	55.83 ± 0.63 a
ST	10	3.51 ± 0.15 c	53.45 ± 0.81 a	56.96 ± 0.78 a
	p-valor	< 0.0001	<0.0001	0.3688

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$), según prueba de Tukey.
 SSP 1: *Calycophyllum spruceanum* + *Erythrina fusca* + *Brachiaria decumbens* (SSP Multiestrato)
 SSP 2: *Mauritia flexuosa* + *Paspalum plicatulum*
 ST: *Axonopus compressus* + *Paspalum conjugatum*

Los resultados que muestra el Cuadro 5 indican que en cuanto al contenido de carbono aéreo existen diferencias estadísticas ($p < 0.05$) a favor del sistema silvopastoril multiestrato (SSP1: 11.38 t C ha⁻¹) seguido del sistema silvopastoril con aguaje (SSP2: 9.64 t C ha⁻¹), el cual el sistema con pastura natural (ST) contiene la menor reserva de carbono aéreo (3.51 t C ha⁻¹). Sin embargo, en el contenido de carbono bajo suelo se invierten los resultados, mostrando mayor reservas de carbono el sistema con pastura natural (ST) que los sistemas silvopastoriles ($p < 0.05$). Estas reservas de carbono agrupadas para la reserva total de carbono no logra mostrar diferencias estadísticas ($p > 0.05$) entre los tres sistemas.

La Figura 10 muestra la igualdad estadística entre los tres sistemas con respecto a las reservas totales de carbono.

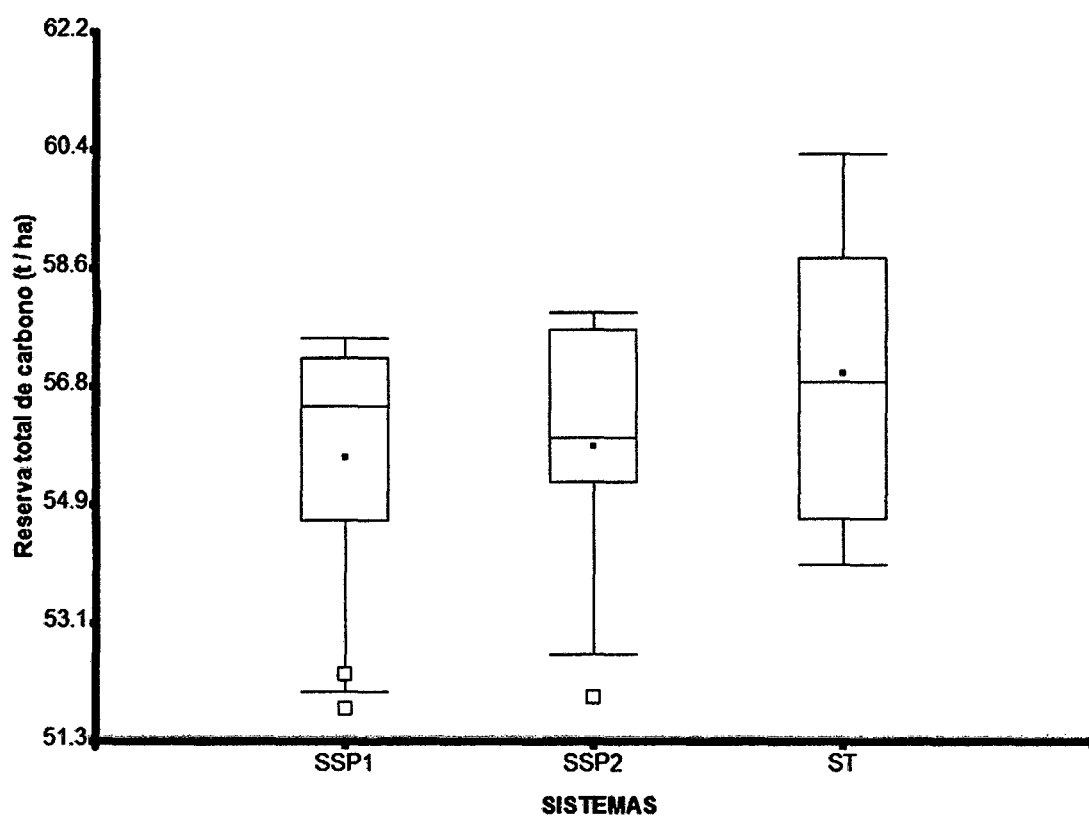


Figura 10. Gráfico de boxplot para la reserva total de carbono ($t.C.ha^{-1}$) entre los sistemas evaluados.

La Figura 10 muestra la distribución de las reservas totales de carbono en los tres sistemas evaluados, las cuales indican una igualdad estadística, a pesar que el sistema con pastura natural (ST) contiene mayor carbono que los sistemas silvopastoriles.

4.4. Relación entre carbono aéreo y carbono bajo suelo

El Cuadro 6 muestra las proporciones porcentuales de carbono aéreo y bajo suelo en los tres sistemas ganaderos evaluados.

Cuadro 6. Relación del contenido de carbono aéreo y carbono bajo suelo en tres sistemas ganaderos, expresadas en t C ha⁻¹ (n=10; media ± error estándar).

Sistemas	N	Carbono aéreo	Carbono bajo suelo
SSP1	10	11.38	44.28
Porcentaje		20.4 %	79.6 %
SSP2	10	9.64	46.19
Porcentaje		17.3 %	82.7 %
ST	10	3.51	53.45
Porcentaje		6.2 %	93.8 %

SSP 1: *Calycophyllum spruceanum* + *Erythrina fusca* + *Brachiaria decumbens* (SSP Multiestrato)

SSP 2: *Mauritia flexuosa* + *Paspalum plicatulum*

ST: *Axonopus compressus* + *Paspalum conjugatum*

La proporción porcentual de las reservas de carbono en los sistemas de acuerdo al contenido de carbono aéreo y bajo suelo muestran que el sistema con pastura natural (ST) de la reserva total de carbono almacenado solo el 6.2 % corresponde al carbono aéreo, mientras que el 93.8 % se encuentra bajo suelo. Por su parte, los sistemas silvopastoriles, tanto el sistema multiestrato (SSP1) como el sistema con aguaje (SSP2), contienen carbono aéreo en una proporción de 20 a 17 % de la reserva total de carbono.

La Figura 11 muestra las proporciones de carbono aéreo y bajo suelo de los sistemas evaluados.

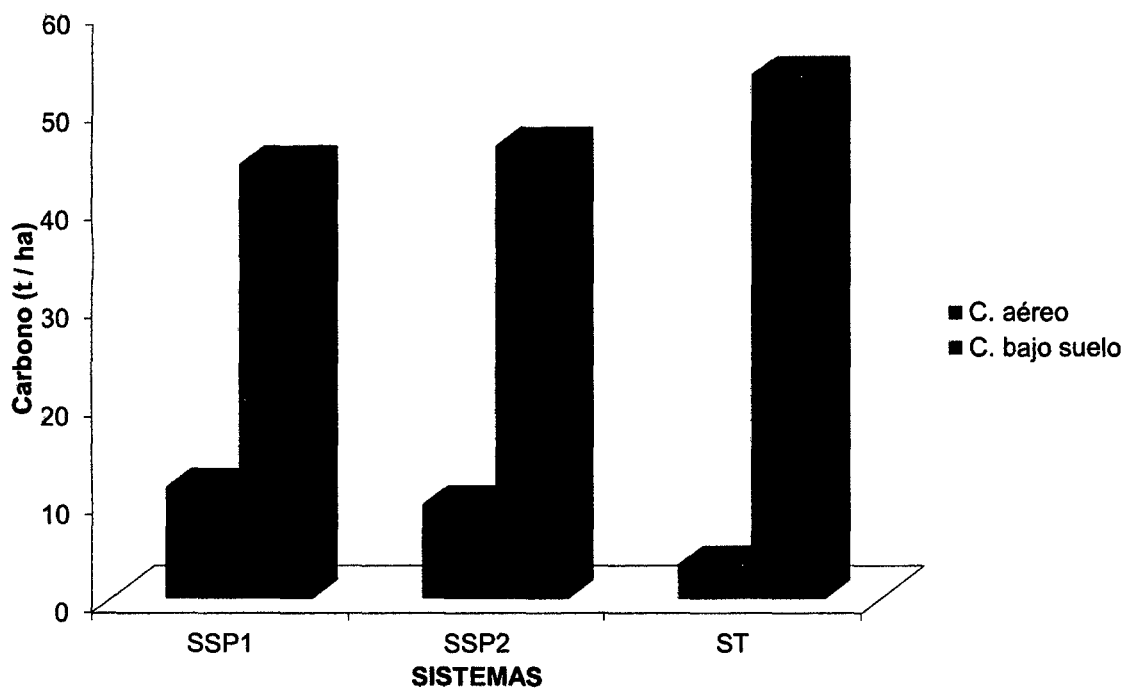


Figura 11. Proporción del carbono aéreo y bajo suelo de los sistemas evaluados.

Se puede observar en la Figura 11 que con respecto al carbono aéreo los sistemas silvopastoriles (SSP1 y SSP2) contienen mayores reservas que el sistema tradicional con pastura natural (ST); sin embargo, esta situación se invierte con respecto a carbono bajo suelo, siendo el sistema tradicional la que muestra mayores reservas bajo suelo.

V. DISCUSIÓN

5.1. Carbono de la biomasa aérea en tres sistemas ganaderos

El carbono aéreo está compuesto de tres componentes: el carbono arbóreo, el carbono herbáceo y el carbono de hojarasca. Con respecto al primer componente, el cuadro 1, muestra los resultados de la estimación de carbono solo para los sistemas silvopastoriles (SSP1 Y SSP2), puesto que el sistema tradicional (ST) no cuenta con este componente. Los resultados estadísticos muestran que el sistema silvopastoril multiestrato (SSP1) contiene mayores reservas de carbono ($p < 0.05$) que el sistema silvopastoril con aguaje (SSP2) (2.82 y 2.25 t C ha⁻¹ respectivamente). Estos resultados se deben principalmente a que el SSP1 cuenta con mayor biomasa tanto del capirona como de la eritrina, además de la edad de diferencia, puesto que el SSP1 fue establecido a finales del 2006 mientras que el SSP2 fue establecido el 2009. Si bien se reporta para plantaciones de aguaje mayores reservas, tal como indican MARQUEZ (2000), BARBARÁN (1998), IIAP (2002), FREITAS *et al.* (2006) que una plantación de aguaje mantiene una reserva entre 61 a 132 t C ha⁻¹, debido a la abundante biomasa propia de la característica de esta especie, pero que se da cuando estas plantaciones al menos hayan superado mayores edades y cobertura. Aunque ANDRADE (1999) indica que para sistemas silvopastoriles el aporte del carbono aéreo dependerá de la densidad

de siembra y la especie, indica reservas de carbono arbóreo que va desde 11 a 27 t C ha⁻¹, la cual, los resultados obtenidos aún son relativamente bajos.

Con respecto al segundo componente, el carbono herbáceo, la comparación entre sistemas básicamente es la comparación entre pasturas mejoradas (*Brachiaria decumbens* y *Paspalum plicatulum*) y la natural (*Axonopus compressus* y *Paspalum conjugatum*), correspondiendo los primeros a los sistemas silvopastoriles (SSP1 y SSP2 respectivamente) y el sistema tradicional con pastura natural al segundo. El Cuadro 1, indica diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre sistemas resultando estadísticamente similares los sistemas con pasturas mejoradas (3.99 y 3.84 t C ha⁻¹ respectivamente), mientras que la pastura natural muestra la menor reserva (3.01 t C ha⁻¹). Similares resultados se encontraron en una investigación realizada por BERAÚN (2011), el cual reporta de 3.50 y 3.25 t C Ha⁻¹, para pasturas mejoradas y naturales respectivamente. Por otra parte, estas cantidades superan a las reportadas por ANDRADE (1999), que reportó 2.5 t. C.ha⁻¹, en pasturas en pastoreo. Siendo este hecho, el pastoreo, la razón principal de la mayor biomasa encontrada, ya que estos sistemas están sin pastoreo más de dos años. Por ello, el incremento de carbono encontrado se justifica por un mayor desarrollo herbáceo cuando la pastura no es defoliada (DA CRUZ, 2006).

Con respecto al tercer componente, el carbono de hojarasca, lo resultados indican alta diferencia estadística ($p < 0.001$) entre los sistemas evaluados, resultando claramente diferenciados los tres sistemas. Mayor

reserva de carbono en este componente la tiene el SSP1 con *B. decumbens* (4.56 t C ha^{-1}), seguido del SSP2 con *P. plicatulum* (3.55 t C ha^{-1}), y el ST con pastura natural (0.50 t C ha^{-1}). Similares resultados obtuvo BERAÚN (2011) en un evaluación entre pastura mejorada y natural. Esta diferencia de hojarasca entre las pasturas mejoradas y la natural se debe principalmente por las características propias de la *Brachiaria decumbens* y del *Paspalum plicatulum* de formar colchones de hojarasca cuando no es pastoreada (DA CRUZ, 2006; RODRÍGUEZ *et al.*, 2008) a diferencia de la pastura natural.

Por último en términos generales, el carbono aéreo encontrado en estos sistemas resultan estadísticamente distintos ($p < 0.0001$), siendo el SSP1 la que reporta mayor carbono aéreo ($11.38 \text{ t C ha}^{-1}$) seguido del SSP2 (9.64 t C ha^{-1}) y con menor contenido de carbono aéreo el ST (3.51 t C ha^{-1}). Los resultados coinciden con el trabajo de BERAÚN (2011) en cuanto al sistema tradicional con pastura natural reportando una reserva aérea de 3.42 t C ha^{-1} .

5.2. Carbono bajo suelo entre los sistemas evaluados

5.2.1. Carbono radicular

Estudios efectuados por RAO *et al.*, (2001) muestran una distribución de raíces de pasturas concentrada en los primeros 30 centímetros del perfil del suelo. Esta distribución de las raíces en las capas superficiales, es característica de gramíneas pastoreadas intensamente, que crecen en suelos pobres con reducción de nutrientes en las capas profundas (RÜGNITZ *et al.*, 2009). Según el Cuadro 2, para los primeros 30 centímetros de profundidad no

se determinó diferencia significativa ($p > 0.05$) de la biomasa radicular entre los tres sistemas resultando con medias de 369, 428, y 449 gr.m^{-2} de materia seca (MS) para los SSP1, SSP2 y ST respectivamente. Los resultados encontrados son menores a los reportados en trabajos realizados por RAO *et al.* (2001) en la región amazónica donde se reportó biomasa radicular en 700 gr.m^{-2} de MS para suelos de topografía plana y 640 gr.m^{-2} de MS para suelos de pendientes. Estos reportes difieren por los encontrados por ZHIPING *et al.* (2004) el cual encontró producciones de 930 gr.m^{-2} de MS de raíces en plantas C4 como el pasto elefante (*Pennisetum purpureum*); asimismo, reportó para especies de *Axonopus* con 420 gr.m^{-2} de MS. BERAÚN (2011) reporta mayores contenidos de MS radicular, con 753 y 557 gr.m^{-2} para *B. decumbens* y pastura natural.

El carbono radicular muestra (Cuadro 2) asimismo una igualdad estadística entre los sistemas ($p > 0.05$) debido a que el contenido de raíces finas muestra una fuerte asociación con el stock de carbono (AMÉZQUITA *et al.*, 2008), pero es importante indicar que el sistema tradicional con pastura natural contiene mayor carbono radicular que los sistemas con pasturas mejoradas. El carbono radicular estimado va de 1.85, 2.14 y 2.25 t C ha^{-1} , para los sistemas SSP1, SSP2 y ST respectivamente. Sin embargo, si observamos el contenido de carbono a nivel de estratos se observa diferencias estadísticas ($p < 0.05$) en los tres niveles (0–10, 10–20 y 20–0 cm); asimismo, se puede observar que en los primeros 10 centímetros de profundidad la pastura natural (2.08 t C ha^{-1}) muestra la mayor reserva de carbono que los pastos mejorados (1.42 y 1.73 t C ha^{-1} , para SSP1 y SSP2 respectivamente), esta característica propia de las pasturas naturales permiten a esta pastura la permanencia y la

resistencia en sistemas ganaderos sobrepastoreados (ANDRADE, 1999). Por una parte la pastura natural (*Axonopus compressus*) por sus propias características de adaptarse a suelos pobres, su rusticidad y resistencia al sobrepastoreo (CARDENAS, 1992), muestra una resistente biomasa radicular sobre todo en las capas superficiales del suelo que permiten su capacidad de resistencia que supera a la pastura mejorada (PEZO *et al.*, 2009).

5.2.2. Carbono orgánico del suelo (COS)

La materia orgánica del suelo está directamente relacionada con el contenido del carbono orgánico del suelo. Por ello, los resultados muestran una relación directa del contenido de carbono con el contenido de la materia orgánica, así como la densidad aparente. El Cuadro 3 indica que existe diferencia significativa ($p < 0.0001$) en el contenido de carbono orgánico del suelo en los tres sistemas, tanto a nivel de estratos como en forma completa. Los resultados indican que el ST con pastura natural una reserva de carbono orgánico del suelo (COS) ($51.20 \text{ t C ha}^{-1}$) superior a los sistemas silvopastoriles (SSP1 y SSP2) con pasturas mejoradas (42.43 y $44.05 \text{ t C ha}^{-1}$ respectivamente). Estos resultados coinciden con los reportados por BERAÚN (2011), el cual también determinó diferencias estadísticas a favor de la pastura natural cuando la comparó con una pastura mejorada. Sin embargo, los reportes de POLIDORO *et al.* (2008); AMÉZQUITA *et al.* (2008); y MACDIKEN (1997) indican mayores reservas de COS en sistemas ganaderos. Esto debido a que los sistemas evaluados se ubican sobre suelos pobres y con contenidos de materia orgánica que van de bajo a medio. La pastura natural contiene

mayor materia orgánica de 10 a 20 centímetros de profundidad que las pasturas mejoradas (2.20 versus 1.6 y 1.5 % respectivamente), debido a una mayor presencia radicular sobre todo en las capas superficiales que permite una oferta de materia orgánica de raíces muertas, argumento que justifica la rusticidad y la resistencia de la pastura natural sobre condiciones adversas (PEZO *et al.*, 2009).

5.2.3. Carbono bajo suelo

Las reservas de carbono bajo suelo incluyen los componentes de carbono radicular y del carbono orgánico del suelo. Según el Cuadro 4, la suma de estos componentes muestran una alta diferencia significativa ($p < 0.0001$) entre el sistema con pastura natural (ST) ($53.45 \text{ t C ha}^{-1}$) de los sistemas con pasturas mejoradas (44.28 y $46.19 \text{ t C ha}^{-1}$ para SSP1 y SSP2 respectivamente). Esos resultados coinciden con BERAÚN (2011) quien reporta para pasturas mejoradas y naturales 46.15 y $49.98 \text{ t C ha}^{-1}$ respectivamente, mostrando superioridad la pastura natural. Sin embargo, estas cantidades son menores a las reportadas por ANDRADE (1999) y FAO (2002), que oscila entre 70 t C ha^{-1} , esta diferencia se debe principalmente por que los sistemas se ubican en suelos pobres en materia orgánica. Por otra parte, se debe tener en cuenta que los sistemas en estudio no existe remoción de tierra por que la labranza cero tiene una relación directa con el contenido de la materia orgánica, tal como lo demuestran los trabajos de MONNIER *et al.*, (1994); REICOSKY Y LINDSTROM (1995).

5.3. Carbono total de los sistemas de pasturas

El Cuadro 5 muestra los resultados finales de la estimación del carbono almacenado en los tres sistemas ganaderos evaluados. A pesar que existen claras evidencias de diferencias estadísticas entre sistemas ($p < 0.05$) para el carbono aéreo y para el carbono bajo suelo, resulta no significativo ($p > 0.05$) el contenido del carbono total entre sistemas. Las reservas de carbono total de los sistemas van de 55.65, 55.83 y 56.96 t C ha⁻¹ para los sistemas SSP1, SSP2 y ST respectivamente. Para lograr esta igualdad estadística, indudablemente el sistema tradicional con pastura natural (ST) mientras muestra un menor contenido de carbono aéreo a comparación de los sistemas con pasturas mejoradas, invierte esta situación con el contenido del carbono bajo suelo en la que supera grandemente a los sistemas con pasturas mejoradas. Las reservas totales de carbono encontrado en esta investigación no distan mucho de lo reportado por BERAÚN (2011), que logró determinar igualmente una igualdad estadística entre pasturas mejoradas y pasturas naturales (54.75 y 53.39 t C ha⁻¹ respectivamente). Por otra parte, los reportes hechos por ANDRADE (1999) y AMÉZQUITA *et al.* (2008) indican reservas con 68 y 72 t.C.ha⁻¹ respectivamente, el cual son mayores a los encontrados. La igualdad estadística que muestran estos tres sistemas se debe por el contenido de la materia orgánica donde en el sistema con pastura natural es superior a la del sistema con pastura mejorada.

5.4. Relación entre carbono aéreo y bajo suelo

Según el Cuadro 6, la relación existente entre el contenido de carbono aéreo y bajo suelo en los sistemas evaluados muestran cierta peculiaridad. Los sistemas con pastura mejorada que corresponden a los sistemas silvopastoriles (SSP1 y SPP2) el carbono aéreo va del 20.4 a 17.3 % de las reservas totales de carbono del sistema, correspondiendo entre 80% el carbono bajo suelo en estos sistemas. Contrariamente el sistema tradicional con pastura natural el carbono aéreo solo representa el 6.2% del carbono total, siendo más de 90% el carbono bajo suelo su mayor proporción. Estos resultados coinciden a los reportado por BERAÚN (2011), el cual indica que para sistemas con pastura mejorada el carbono aéreo corresponde al 15.7% (sin componente arbóreo), mientras que el sistema con pastura natural el carbono aéreo solo representa el 6.4% del carbono total, superando también el 90% de carbono bajo suelo. Sin embargo, para la FAO (2002) y MACDIKEN (1997) las proporciones de carbono aéreo van de 30 a 40% del carbono total en pasturas. La diferencia mayor que muestra estos resultados se debe a que en condiciones de suelos degradados la biomasa aérea producida es reducida (FAO, 2002), mientras que la mayor reserva de carbono en estos sistemas degradados se da en el suelo (LOPEZ *et al.*, 2005; GUO *et al.*, 2002).

VI. CONCLUSIONES

El sistema silvopastoril con aguaje no contiene mayor reserva de carbono que los otros sistemas.

En cuanto al contenido de carbono aéreo el sistema silvopastoril multiestrato con capirona presenta mayor carbono almacenado ($11.38 \text{ t C ha}^{-1}$) que el sistema silvopastoril con aguaje (9.64 t C ha^{-1}) siendo el sistema tradicional con pastura natural (3.51 t C ha^{-1}) con menor carbono aéreo.

El sistema tradicional con pastura natural presenta mayor contenido de carbono bajo el suelo ($53.45 \text{ t C ha}^{-1}$) que los sistemas silvopastoriles con pastura mejorada (44.28 y $46.19 \text{ t C ha}^{-1}$ para SSP1 y SSP2 respectivamente) estadísticamente diferenciable.

Las reservas de carbono total por los sistemas son de 55.65 , 55.83 y $56.96 \text{ t C ha}^{-1}$ para los sistemas SSP1, SSP2 y ST respectivamente, no mostrando diferencias estadísticas entre ellas.

Los sistemas tradicionales con pastura natural tienen un potencial de almacenamiento de carbono al igual que los sistemas con pasturas mejoradas.

Los sistemas silvopastoriles generan servicios ambientales en cuanto a la captura de carbono, pudiendo convertirse en estrategias tecnológicas para la adaptación y mitigación al cambio climático.

VII. RECOMENDACIONES

- Realizar mayores trabajos de investigación que permitan valorar los sistemas silvopastoriles en cuanto al carbono aéreo y los sistemas con pasturas naturales por su potencial almacenamiento de carbono bajo suelo.

- Continuar con evaluaciones anuales de los mismos sistemas para determinar la captura de carbono anual o la tasa de incremento anual de carbono para proyectos de carbono.

- Definir el trabajo de investigación como protocolo estándar de medición de carbono en sistemas ganaderos, incluyendo los sistemas silvopastoriles.

- Valorar los sistemas ganaderos como potenciales reservas de carbono.

- Implementar políticas que favorezcan considerar el carbono bajo suelo dentro de los proyectos de carbono por su alto contenido en reserva.

ABSTRACT

CARBON STOCK IN THREE LIVESTOCK SYSTEMS IN THE DISTRICT OF JOSE CRESPO AND CASTILLO, AUCAYACU

The objectives of research work were to determine carbon stocks stored in the area biomass, in the soil and organic carbon in the soil of three different livestock systems compared three livestock systems to estimate the mayor potential for carbon storage. The trial was conducted in the Dairy Module of the Faculty of Animal Husbandry - UNAS, located in the District of José Crespo y Castillo (Aucayacu) with the following systems S1: silvopastoral system multi stratus (SSP1), S2: silvopastoral systems with aguaje (SSP2) and S3: traditional system with natural pasture (ST), S1 was established with *B. decumbens*, *C. spruceanum*, and *E. fusca*, the S2 with *P. plicatum*, and *M. flexuosa* and the S3 with *Axonopus compresus* and *Paspalum conjugatum*, completely randomized design (CRD) each system with ten repetitions and each repetition with an area of 10 x 10 m. The results of this work indicate statistically significant differences in the amounts of carbon stored in the air components, being greater for SS1, followed by SS2 and the lowest for ST; Also, the amount of carbon deposited under the soil en the three systems indicate that the SS1 and SS2 had less amount of carbon in relation to the ST, meanwhile concluded that total carbon stocks in the three systems studied are similar.

Key words: Air component, carbon storage, root system and silvopastoral systems.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- AGUINACO, V. 2008. Captura y almacenamiento de dióxido de carbono. [En línea]:http://academiadeingenieriademexico.mx/archivos/coloquios/6/Captura_y_Alamacenamiento_de_Dioxido_de_Carbono.pdf, 02 octubre, 2010).
- ALBRECHT, A., KANDJI, S. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry system. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 99(1-3): 15-27.
- AMEZQUITA, M., AMEZQUITA, E., CASASOLA, F., RAMIREZ, B., GIRALDO, H., GOMEZ, M., LLANDERAL, T., VELASQUEZ, P., IBRAHIM, M. 2008. C stocks and sequestration. In L. t Mannaetje, Wageningen Academic Press Publishers 221 p.
- ANDRADE, H. 1999. Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo. Tesis Mag. Sc: Turrialba, CR, CATIE. 70 p.
- ANDRADE, H., IBRAHIM, M. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los Sistemas Silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas* 10 (39-40): 109 – 116.
- BARBARAN, G. 1998. Determinación de biomasa y carbono en los principales sistemas de uso del suelo en la zona de Campo Verde. Tesis profesional. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Ucayali. Pucallpa, Ucayali, Perú. Pp. 54-55.

- BEER, J., HARVEY, C., IBRAHIM, M., HARMAND, J., SOMARRIBA, E., JIMÉNEZ, F. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas* 10(37-38):80-87.
- BERAUN, D. 2011. Carbono almacenado en sistemas con pastura natural y pastura mejorada (*B. decumbens*) en el distrito de José Crespo y Castillo. Tesis Ing. Zoot. Tingo María, Perú. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Zootecnia. 53 p.
- BÓHM, W. 1979. *Methods of studying root system*. Berlin, GE, Springer Verlag, 179 p.
- BROWN, S. 1997. *Estimating biomass and biomass change of tropical forest. A primer*. Roma, IT, FAO. 55 p.
- CARDENAS, E. 1992. *Introducción al establecimiento y producción de pasturas tropicales*. Tingo María, Huánuco, Perú. UNAS. 303 p.
- CHIDIAK, M., MOREYRA, A., GRECO, C. 2003. Captura de carbono y desarrollo forestal sustentable en la Patagonia Argentina. 28-29. [En línea]:(<http://www.territorioscentroamericanos.org/ecoagricultura/Documents/capturadecarbonoydesarrolloforestal.pdf>, 03 de octubre, 2011).
- DA CRUZ, W. 2006. *Manejo de pasturas tropicales*. Tingo María, Huánuco, Perú. UNAS. 187 p.
- DE CAMARGO, P., TRUMBORE, S., MARTINELLI, L., DAVIDSON, E., NEPSTAD, D., VICTORIA, L. 1999. Soil carbon dynamics in regrowing forest of eastern Amazonian. *Global Change Biology* 5:693-702.

- FAO. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Basado en el trabajo de Michael Robert. Institutnational de recharch e agronomique. Paris, Francia 62 p.
- FISHER, M., RAO, I., AYARZA, M., LASCANO, C., SANZ, J., THOMAS, R., VERA, R. 2004. Carbon storage by introduced deep- rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 371:236-238.
- FRANGI, J., LUGO, A. 1985. Ecosystem dynamics of a subtropical floodplain forest. *Ecological Monographs* 55:351-369.
- FREITAS, L., OTAROLA, E., DEL CASTILLO, D., LINARES, C., MARTINEZ, P., MALCA, G. 2006. Servicios ambientales de almacenamiento y secuestro de carbono del ecosistema aguajal en la Reserva Nacional Pacaya Samiria, Loreto - Perú. Documento Técnico N° 29, pp. 42-43.
- GAMMA. 2010. Determinación del balance de gases efecto invernadero en fincas ganaderas de la región Chorotega, como elemento de referencia para mejorar la competitividad. Informe final estudio balance de gases Región Chorotega. Costa Rica. 52 p.
- GUO, L., GIFFORD, R. 2002. Soil carbón stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology* 8, 345 – 360.
- GUZMAN, W. 2003. Valoración económica de beneficios ambientales en el manejo sostenible de humedales: Estudio del caso del Manejo Sostenible de Sistemas de "Aguajal" en la Comunidad de Parinari, Reserva Nacional Pacaya Samiria (RNPS). Zamora (Editores). INRENA-USAID. Lima, Perú. Pp 269-302.

- HARVEY, C., ALPIZAR, F., CHACÓN, M., MADRIGAL, R. 2005. Assessing linkages between agriculture and biodiversity in Central America: Historical overview and future perspectives. Mesoamerican and Caribbean Region, Conservation Science Program. San José, CR. The Nature Conservancy (TNC). 140p.
- IBRAHIM, M., CHACÓN, M., MORA, J., ZAMORA, S., GOBBI, J., LLANDERAL, T., HARVEY, A., MURGUEITIO, E., CASASOLA, F., VILLANUEVA, C., RAMIREZ, E. 2005. Opportunities for carbon sequestration and conservation of water resources on land scapes dominated by cattle production in Central America. In Henry A. Wallace/CATIE Inter-American Scientific Conference Series, "Integrated management of environment services in human-dominated tropical landscape" (4, Costa Rica, 2005). Abstracts. Turrialba, CR, CATIE. Pp27-34.
- IIAP. 2002. Estudio de Línea Base de secuestro de carbono en la cuenca del río Nanay. Iquitos Perú. 7 p.
- IPCC. 1996. Report of the twelfth session of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Reference manual and workbook of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories. Ciudad de México, MX. Pp 232-238.
- IPCC. 2001. Tercer Informe de Evaluación Cambio climático 2001: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. In McCarthy, JJ; Canziani, OF; Leary, Na; Dokken, DJ; White, KS. eds. Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, CH, Cambridge University Press. 1000p.

- IPCC. 2003. Definitions and Methodological Options to Inventory Emissions from Direct Human-Induced Degradation of Forests and DE vegetation of Other Vegetation Types Penman, J. y colaboradores. The Institute for Global Environmental Strategies (IGES). Pp 472-478.
- LAL, R., KIMBLE, J. 1998. Pedospheric processes and the carbon cycle. In Lal, R; Kimble, KM; Follett, RF; Stewart, BA. eds. Soilprocess- sand the carbon cycle. Estados Unidos, CRC Press. Pp1-8.
- LESSARD, R., GIGNAC, D., ROCHETTE, P. 2009. El ciclo del carbono, midiendo el flujo de CO₂ del suelo. 7 - 8. [En línea]: (<http://www.greenteacher.com/articles/elciclodelcarbono.pdf>, 01 octubre, 2011).
- LOPEZ, A., SCHLÖNVOIGT, A., IBRAHIM, M., KLEINN, C., KANNINEN, M. 1999. Cuantificación del carbono almacenado en el suelo de un sistema silvopastoral en la zona Atlántica de Costa Rica. En: Agroforestería en las Américas 6(23): 51-53.
- LOPEZ, M., VELDKAMP, E., DE KONING, G. 2005. Soil carbon stabilization in converted tropical pastures and forests depends on soil type. Soil Science Society of America Journal 69 (4), 1110 – 1117.
- MACDIKEN, K. 1997. A guide to monitoring carbón storage in forestry and agroforestry Projects. Arlington, VA, US, Winrock International. 87 p.
- MARQUEZ, L. (ed.). 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso del suelo. Fundación Solar. Guatemala. 26 p.

- MARTINEZ, E., FUENTES, P., ACEVEDO, E. 2008. Carbono Orgánico y Propiedades del Suelo. *SciELO* 8(1): 68-96 p. [En línea]: (<http://www.scielo.cl/pdf/rcsuelo/v8n1/art06.pdf>, 01 octubre, 2011).
- MONNIER, G., THEVENET, G., LESAFFRE, B. 1994. Simplification du travail du sol. *Colloques INRA N° 65*, 172 pp.
- ORTIZ, A., RIASCOS, L. 2006. Almacenamiento y fijación de carbono del sistema agroforestal cacao *Theobroma cacao* L y laurel *Cordia alliodora* en la reserva indígena de Talamanca, Costa Rica. Tesis para optar el título de Ingeniero Agroforestal. Universidad de Nariño Facultad de Ciencias Agrícolas, San Juan de Pasto. 45 p.
- PEZO, D., OSPINA, S. 2009. Rol de los pastizales seminaturales en las fincas ganaderas de Muy Muy, Nicaragua percepciones de productores e investigadores. En: *Agroforestería de las Américas N° 47* 2009. Pp 7-11.
- POLIDORO, B., WINOWIECKI, J., JOHNSON, J., MCDANIEL, P., MORRA, M. 2008. Suelos del valle y del piedemonte en Talamanca: un paisaje dinámico para el almacenamiento de carbono. En: *Agroforestería en las Américas N° 46* – 2008. Pp 40 – 44.
- POST, W.; KWON, K. 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology* 6:317-327.
- RAO, I., RIPPSTEIN, G., ESCOBAR, G., RICAURTE, J. 2001. Producción de biomasa vegetal epigea e hipógea en las Sabanas nativas. En: *Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia*. CIAT, CIRAD. ISBN 958-694-033-0.

- REICOSKY, D., LINDSTROM, M. 1995. Impact of fall tillage on short – term carbon dioxide flux. In Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B. Soils and global change. CRC Press. 132 p.
- RODRIGUEZ, A., RADA, F., COLMENARES, M. 2008. Comportamiento ecofisiológico de *Brachiaria decumbens* en monocultivo y en asociación con *Leucaena leucocéphala*. Revista Pastos y Forrajes Vol. 31 N° 3. 2008. Pp 217-227.
- ROWLINSON, P. 2008. Adapting livestock production systems to climate change – temperate zones. Proceedings International Conference. Livestock and Global Climate Change. Pp 61-63.
- RUIZ, A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua. Turrialba, CR, CATIE. 111p.
- RÜGNITZ, M., CHACÓN, M., PORRO, R. 2009. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Lima, Perú. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)/ Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). 79 p.
- SALAZAR, A. 2007. Servicios ambientales de los aguajales y las oportunidades de un negocio global para Loreto. 2 - 3. [En línea]:(http://moderncms.ecosystemmarketplace.com/repository/moderncms_documents/AguajalesEspanol.1.1.1.1.pdf, 03 octubre, 2011).
- SMITH, K. 2008. After the Kyoto Protocol: can soil scientists make a useful contribution. Soil use and Management 15: 71 – 75.
- SNOWDON, P., RAISON, J., KEITH, H., MONTAGU, K., BI, K., RITSON, P., GRIERSON, P., ADAMS, M., BURROWS, W., EAMUS, D. 2001.

Protocol for sampling tree and stand biomass. Australia, Australian Greenhouse Office. 114 p.

TROUVE, C., MARIOTTI, A., SCHWARTZ, D., GUILLET, B. 1994. Soil organic carbon dynamics under eucalyptus and pinus plants in savannas in Congo. *Soil Biol. Biochem.* 26:287-295.

WALKLEY, A., BLACK, A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determination of soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37:29-38.

ZHIPING, Q., RAO, I., RICAURTE, J., AMÉZQUITA, E., SANZ, J., KERRIDGE, P. 2004. Root distribution and nutrient uptake in crop-forage systems on Andean hillsides. *Journal of Sustainable Agriculture* 23(4):39-50.