

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE ZOOTECNIA

DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE CIENCIAS PECUARIAS

Programa de Gestión Académica y Biodiversidad (PROGAB)

Subprograma de Biodiversidad y Servicios Ambientales

Línea de Valoración de la Biodiversidad



**EFFECTO DE LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES SOBRE EL
ALMACENAMIENTO DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN EL
DISTRITO DE JOSÉ CRESPO Y CASTILLO**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO ZOOTECNISTA

ROJAS RAMÓN, ROLANDO MIGUEL

Tingo María – Perú

2017

DEDICATORIA

En primer lugar a Dios y a la Virgen de Guadalupe por darme la vida, salud, sabiduría y fuerzas para lograr mis metas y objetivos trazados a lo largo de mi vida.

A mi **MADRE** Lidia Violeta Ramón Quintana, mi **HERMANA** Lidia Natalia Rojas Ramón quienes son los pilares fundamentales en mi vida, mi **PADRE** Rolando Arturo Rojas Arroyo quien desde lo más alto se encuentra protegiéndome y guiándome día a día.

A mi **ABUELA** y no menos importante, Neri Quintana Aguirre quien es el núcleo de la **FAMILIA** Ramón Quintana; a todos por siempre haberme dado su fuerza y apoyo incondicional que me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora. Por último a mis **COMPAÑEROS Y MEJORES AMIGOS** quienes me acompañaron en todo este tiempo.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en especial a la Facultad de Zootecnia.
- A mi asesor de tesis: Dr. Jorge Ríos Alvarado.
- A los miembros de jurado de tesis: Dr. Milton Muños Berrocal, Dr. Carlos Enrique Arévalo Arévalo, Ing. M.Sc. Eber Cárdenas Rivera por su apoyo y mejora de la tesis.
- A mi profesor y amigo quien me acompañó en los últimos años de estudio de Pre Grado y parte de mis estudios de Pos Grado: Ing. M.Sc. Rafael Robles Rodríguez.
- A mi tío Jesús Humberto Chávez Caro y primo Mario Eduardo Ramón Velarde quienes propiciaron y mostraron su apoyo incondicional, emocional y respaldo para iniciar y culminar mis estudios en esta casa de estudios.
- A mis amigos de la mejor promoción de ingresantes Zootecnia - 2006 y en especial a Harmon Joel Torres Blacido, Milton Sevillanos Piña, Lezly Ccori Rufino, Javier Robles Condori por tener la dicha de compartir momentos tristes y alegres y de estar siempre juntos en la universidad.
- A mis amigos(as), Jaira Callupe Loayza, Mirva Krina Chacón Hermitaño, José Orlando Castillo Cornelio, Diana Arévalo Díaz, Gabriel Huamancayo Ysminio, quienes con ellos compartimos momentos inolvidables y de alguna y otra manera ayudaron en la elaboración de la tesis.

A los miembros de la plana de docentes de la facultad de Zootecnia en especial al Ing. Marco Rojas Paredes, quienes me enseñaron con sus experiencias y con el aporte de conocimiento ya que sin ellos hubiera sido imposible cumplir el objetivo.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Sistema silvopastoril	4
2.2. Estimaciones de almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles	5
2.3. Componentes del almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles	6
2.4. Estudios de estimaciones de almacenamiento de carbono	7
2.5. El carbono (C)	8
2.6. El dióxido de carbono (CO ₂)	9
2.7. Almacenamiento de carbono	9
2.8. Tendencia general de la captura de carbono en el suelo	11
2.8.1. Carbono total del suelo	11
2.8.2. Fracciones de carbono orgánico en el suelo	12
2.9. Inventarios de carbono	14
2.10. Almacenamiento de carbono en plantas de aguaje.....	15

III.	MATERIALES Y MÉTODOS	17
3.1.	Lugar y fecha de ejecución.....	17
3.2.	Materiales y equipos	18
3.2.1.	Materiales	18
3.2.2.	Equipos.....	18
3.3.	Metodología	19
3.3.1.	Sistemas agroforestales	19
3.3.2.	Demarcación del área de estudio	20
3.3.3.	Determinación del carbono aéreo.....	21
3.3.4.	Determinación del carbono bajo suelo	25
3.3.5.	Estimación del almacenamiento del carbono total en los sistemas.....	29
3.4.	Variable independiente	29
3.5.	Variables dependientes.....	30
3.6.	Análisis estadístico.....	30
IV.	RESULTADOS	32
4.1.	Carbono de la biomasa aérea en cuatro sistemas.....	32
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 evaluados	43
4.4. Relación entre carbono aéreo y radicular entre el carbono orgánico del suelo	45
V. DISCUSIÓN.....	51
5.1. Carbono de la biomasa aérea en cuatro sistemas.....	51
5.2. Carbono bajo suelo entre los sistemas evaluados.....	54
5.2.1. Carbono radicular	54
5.2.2. Carbono orgánico del suelo (COS).....	56
5.2.3. Carbono bajo suelo	57
5.3. Carbono total de los sistemas	57
5.4. Relación del carbono aéreo y radicular con el carbono orgánico del suelo	59
VI. CONCLUSIONES	61
VII. RECOMENDACIONES.....	63
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXO	72

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Análisis de varianza para el carbono herbáceo y de hojarasca en los cuatro sistemas.....	32
2. Carbono de la biomasa aérea en cuatro sistemas, expresadas en t C.ha ⁻¹ (n = 10; media ± error estándar).	33
3. Carbono aéreo en cuatro sistemas, expresadas en t C.ha ⁻¹ (n = 10; media).	34
4. Contenido de carbono (t C.ha ⁻¹) por componentes herbáceo y hojarasca entre sistemas (n = 10; promedio).	35
5. Biomasa radicular, carbono radicular herbáceo y arbóreo y carbono total radicular entre los sistemas expresados en t C.ha ⁻¹ (n = 10; Media ± error estándar).....	37
6. Carbono orgánico del suelo por profundidad de horizonte en las pasturas (n = 10; Media ± error estándar).	39
7. Carbono bajo suelo en los sistemas evaluados y expresadas en t C.ha ⁻¹ (n = 10; media ± error estándar).	42
8. Carbono total en dos sistemas de pasturas, expresadas en t C.ha ⁻¹ (media ± error estándar).	44
9. Relación del contenido de carbono aéreo y carbono bajo suelo en cuatro sistemas, expresadas en t C.ha ⁻¹	45

10. Análisis de correlación de Pearson entre el COS con otras variables.....	47
11. Análisis de correlación de Pearson entre el carbono total del sistema y el COS.....	48
12. Porcentaje del carbono total del sistema que corresponde al COS en los sistemas evaluados (media \pm error estándar).	50
13. Cuadro de resultados de los diferentes sistemas evaluados.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Plano de ubicación del módulo lechero de la Facultad de Zootecnia.....	17
2. Esquema de la parcela y sus medidas en estudio.....	20
3. Gráfico de boxplot para el contenido de carbono aéreo entre sistemas.	35
4. Contenido de carbono (t C.ha ⁻¹) por componente herbáceo y hojarasca entre sistemas.....	36
5. Carbono total radicular (t C.ha ⁻¹) por sistema evaluado.	38
6. Materia orgánica (%) evaluada a tres profundidades en cuatro sistemas.	40
7. Carbono orgánico del suelo (t.ha ⁻¹) en tres profundidades en cuatro sistemas evaluados.	41
8. Carbono orgánico del suelo (t C.ha ⁻¹) en cuatro sistemas evaluados.....	41
9. Gráfico de boxplot para el contenido de carbono bajo suelo (t C.ha ⁻¹) entre los sistemas evaluados.	43
10. Gráfico de boxplot para la reserva total de carbono (t C.ha ⁻¹) entre los sistemas evaluados.	44

11. Proporciones del carbono total en cuatro sistemas evaluados.....	46
12. Regresión lineal del COS actuando como regresora el carbono radicular herbáceo.....	48
13. Regresión lineal del carbono total del sistema con el COS.....	49
14. Porcentaje del COS como parte del carbono total del sistema evaluado.....	50

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se desarrolló en los potreros del Módulo lechero de la Facultad de Zootecnia, que se encuentra en el distrito de José Crespo y Castillo (Aucayacu), Provincia Leoncio Prado, región Huánuco – Perú. El objetivo fue evaluar el carbono orgánico del suelo almacenado en diferentes sistemas silvopastoriles y un sistema tradicional de los potreros del Módulo lechero de la Facultad de Zootecnia, buscando solucionar el siguiente problema ¿Cuál de los sistemas silvopastoriles será la que almacene mayor carbono? Se seleccionó cuatro sistemas del módulo lechero; la primera, establecida con *B. decumbens*, *C. spruceanum*, y *E. fusca*, (sistema silvopastoril multiestrato - SSP1), la segunda con *P. plicatulum*, y *M. flexuosa*, (sistema silvopastoril con aguaje - SSP2), la tercera con *B. decumbens*, *C. spruceanum*, (sistema silvopastoril con capírona - SSP3) y el cuarto sistema con *Axonopus compressus* y *Paspalum conjugatum*, (sistema tradicional con pastura natural - ST), se utilizó la metodología propuesta por el Grupo GAMMA, (IBRAHIM y PEZO, 2003) para la evaluación del carbono total almacenado por el sistema. Se determinó diferencias significativas ($p > 0.05$) en la evaluación del carbono total almacenado por el sistema siendo el SSP2 con valores mayores a los demás sistemas ($92.85 \pm 1.43 \text{ t.C.ha}^{-1}$). En conclusión se acepta la hipótesis científica, del cual se confirma que el sistema silvopastoril con aguaje (*Paspalum plicatulum* y *Mauritia flexuosa* L. f) contiene mayor reserva de carbono total del sistema que los otros sistemas en estudio.

Palabras clave: Sistemas silvopastoril, almacenamiento, carbono orgánico, suelo

I. INTRODUCCIÓN

El carbono orgánico del suelo (COS) es un componente importante del ciclo global del Carbono, ocupando un 69.8 % del carbono orgánico de la biosfera (FAO, 2002). El suelo puede actuar como fuente o reservorio de Carbono dependiendo de su uso y manejo. Se estima que desde que se incorporan nuevos suelos a la agricultura hasta establecer sistemas intensivos de cultivo se producen pérdidas de COS que fluctúan entre 30 y 50 % del nivel inicial (IBRAHIM y PEZO, 2003).

La acumulación de carbono orgánico en el suelo (COS) es un proceso importante para mitigar efectos del cambio climático, ya que el suelo, además de ser un sumidero, es un reservorio de carbono estabilizado. Se tiene que tener en cuenta también que el uso y la adaptación de prácticas agroforestales en la crianza de animales en pastoreo ha mostrado ser útil tanto para aumentar la producción pecuaria como para el brindar servicios, como la fijación de carbono en los suelos y la vegetación, e incrementar su biodiversidad biológica y ayudar a conservar las fuentes de agua (IBRAHIM y PEZO, 2003).

Los bosques juegan un papel fundamental en el ciclo del carbono y el nitrógeno, la acumulación de carbono orgánico en el suelo (COS) es un proceso importante para mitigar efectos del cambio climático, se ha dirigido atención creciente a la contribución de la forestación a la reducción del dióxido de carbono (CO₂) atmosférico, debido al alto potencial de fijación de carbono de los bosques.

El contenido de carbono de un suelo bajo pasturas es mayor que bajo cultivos; por ello, la dinámica de almacenamiento de carbón orgánico del suelo en sistemas silvopastoriles con pasturas, sea mejorada o natural, dependen del tipo de manejo que reciban; asimismo, de las características, físicas, químicas y geológicas del suelo.

El módulo lechero pecuario en el distrito de José Crespo y Castillo (Aucayacu), evalúa hace más de 10 años diversos arreglos silvopastoriles, desde pastos con aguaje, pastos con capirona, pastos con bolaina, y sistemas multiestratos con pastos, capirona y eritrina. Por lo anterior, en este trabajo se pretende evaluar diferentes sistemas silvopastoriles y su efecto en el almacenamiento de carbono llegando al siguiente problema: ¿Cuál de los sistemas silvopastoriles será la que almacene mayor carbono? Para ello se tiene la hipótesis: Los sistemas silvopastoriles con aguaje (*Paspalum plicatulum* y *Mauritia flexuosa* L. f.) almacena mayor cantidad de carbono a diferencia de los demás sistemas silvopastoriles.

Objetivo general:

- Evaluar el carbono orgánico del suelo almacenado en diferentes sistemas silvopastoriles y un sistema tradicional de los potreros del Módulo lechero de la Facultad de Zootecnia en el distrito de José Crespo y Castillo (Aucayacu).

Objetivo específico:

- Determinar el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea (arbóreo, herbáceo, y hojarasca) en tres sistemas silvopastoriles y un sistema tradicional.
- Determinar las reservas de carbono bajo suelo (carbono radicular y carbono orgánico del suelo) en tres sistemas silvopastoriles y un sistema tradicional.
- Comparar las reservas totales de carbono en tres sistemas silvopastoriles y un sistema tradicional.
- Comparar las reservas de carbono de la biomasa aérea y radicular entre el carbono orgánico del suelo en tres sistemas silvopastoriles y un sistema tradicional.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Sistema silvopastoril

El sistema silvopastoril es una producción pecuaria en donde las leñosas perennes interactúan con los componentes tradicionales (forrajeras herbáceas y animales) bajo un sistema de manejo integral (IBRAHIM y PEZO, 2003). Una de las características propias de los sistemas silvopastoriles, es la combinación de componentes leñosos con la ganadería vacuna generando interacciones ecológicas, económicas y biológicas; construyendo una alternativa de producción (ARANO, 2006).

En un sistema silvopastoril se presentan interacciones entre el componente animal, una o más especies leñosas y las pasturas, para generar diversos productos que son aprovechados por el hombre. Se entiende por un servicio ambiental la capacidad que tienen los ecosistemas para generar productos útiles para el hombre, entre los que se pueden citar la regulación de gases de efecto invernadero, producción de oxígeno y secuestro de carbono, belleza escénica y protección de la biodiversidad, suelos y recursos hídrico (IBRAHIM, 2000).

La ganadería vacuna aparece como una actividad atractiva y compatible de combinarse con la forestación, tanto en sistemas silvopastoriles como en campos de cielo abierto. Los principales factores que deberían considerarse para lograr una producción estable y de calidad de ese pastizal natural, están vinculados a la distancia de plantación de los árboles, lo cual influirá directamente en la producción forrajera, las posibilidades de efectuar algunas labores mecánicas de desmalezado (para favorecer el crecimiento de especies valiosas del pastizal) y el manejo del pastoreo, tanto en el sistema silvopastoril como a cielo abierto (ARANO, 2006).

Es muy importante asegurarse de una buena distribución de los árboles en un número suficiente para evitar una concentración excesiva del ganado en pequeñas áreas lo que conducirá a una compactación del suelo, desaparición de cobertura vegetal y posteriormente a una erosión acelerada del suelo. Por tanto, se puede tener a los arboles distanciados cada 15 a 30 metros, preferentemente formando triangulo (ESCOBAR, 1999).

2.2. Estimaciones de almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles

Según ANDRADE (1999), en sistemas con pastos, el carbono almacenado fue mayor en 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).

Autores como, 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.

2.3. Componentes del almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles

Los sistemas forestales y agroforestales acumulan carbono en cuatro componentes: biomasa sobre el suelo, hojarasca, sistemas radiculares y carbono orgánico del suelo (SNOWDON *et al.*, 2001). 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); sobre la hojarasca indica que comprende todos los residuos orgánicos (hojas, ramas, frutos y semillas). La cuantificación es similar a la del componente herbáceo (LOPEZ *et al.*, 1999).

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. También indica que es importante realizar una estratificación del suelo según la profundidad, ya que la mayor densidad de raíces finas está en los horizontes superficiales del suelo (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 (LOPEZ, 1999). La fracción del carbono puede variar típicamente entre 0.42 y 0.47 en el fuste de los árboles en sistemas silvopastoril (ANDRADE e IBRAHIM, 2003).

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).

2.4. Estudios de estimaciones de almacenamiento de carbono

BERAÚN (2011), señala como resultado que el carbono almacenado en los sistemas de pasto mejorado y natural son los siguientes: el carbono aéreo en el pasto mejorado fue de 8.59 t C.ha^{-1} , en el pasto natural es de 3.42 t C.ha^{-1} ; el carbono radicular en el pasto mejorado es de 3.77 t C.ha^{-1} , en el pasto natural 2.79 t C.ha^{-1} .

El carbono orgánico del suelo en la pastura natural a las profundidades entre los 0 a 10 cm, 10 a 20 cm y de los 20 a 30 cm presentan valores de 22.01, 10.35, 10.02 t C.ha⁻¹; y en el pasto mejorado de 2.30, 2.30, 1.15 t C.ha⁻¹; haciendo un total de COS de 42.38 t C.ha⁻¹. El carbono bajo suelo en el pasto mejorado fue de 46.15 t C.ha⁻¹; y en el pasto natural fue de 49.98 t C.ha⁻¹. Así mismo obteniéndose el carbono total del suelo en el sistema de pastura mejorada de 54.75 t C.ha⁻¹; y en el sistema de pasto natural de 53.39 t C.ha⁻¹ (BERAÚN, 2011).

HUAMANCAYO (2012) estudió el almacenamiento de carbono en sistema multiestrato, aguaje y pastura natural, mostrando reservas de 55.65, 55.83 y 56.96 t C.ha⁻¹ respectivamente, el cual refleja que las pasturas naturales presentan cantidades elevadas en reserva de carbono. En cuanto al carbono orgánico del suelo obtuvo reservas de 42.43, 44.65 y 51.26 t C.ha⁻¹ entre los sistemas de multiestrato, aguaje y pastura natural respectivamente.

Las reservas de carbono herbáceo para los sistemas multiestrato, aguaje y natural encontradas resultaron de 3.99, 3.84 y 3.01 t C.ha⁻¹ respectivamente. Con respecto al carbono arbóreo obtuvo 2.25 t C.ha⁻¹.

2.5. El carbono (C)

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.

El carbono orgánico del suelo se encuentra en forma de residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos, en forma de humus y en formas muy condensadas de composición próxima al carbono elemental (MARTINEZ *et al.*, 2008).

2.6. El dióxido de carbono (CO₂)

PINEDA *et al.* (2005) indican que, los bosques del mundo capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90 % del flujo anual de carbono entre la atmósfera y la superficie de la tierra; los bosques almacenan una importante cantidad de carbono, tanto al nivel de la vegetación como de los suelos, jugando así un papel importante en el intercambio de CO₂ entre la biosfera y la atmósfera.

El dióxido de carbono (CO₂) es el gas que más contribuye al calentamiento global y es el principal gas de efecto invernadero. Este gas incrementó su concentración de 280 ppm en el año 1750 a 360 ppm en el año 2000, y el uso de combustibles fósiles genera en la actualidad del 80 al 85 % del CO₂ emitido (GÓMEZ, 2000).

2.7. Almacenamiento de carbono

FAO (1999) menciona que, los bosques desempeñan una función importante en la moderación del flujo neto de gas de efecto invernadero (GEI) entre la tierra y la atmósfera. Los bosques actúan como depósitos,

almacenando carbono en la biomasa y los suelos. Por el contrario, actúan como fuente de GEI cuando la quema y la descomposición de la biomasa y las alteraciones del suelo dan origen a emisiones de CO₂ y otros GEI. En la actualidad, el 20 por ciento aproximadamente de las emisiones antropógenas mundiales de CO₂ se deben a cambios en el uso de la tierra y sobre todo a la deforestación que tiene lugar principalmente en las zonas tropicales.

GAYOSO (2006) indica que, el carbono acumulado por unidad de superficie es muy variable según el tipo y estado del bosque. Destacan los bosques siempre verdes adultos, donde el carbono total alcanzó un 606.80 t C.ha⁻¹, con la siguiente distribución: 283.75 t C.ha⁻¹ en la biomasa aérea; 79.92 t C.ha⁻¹ en raíces (diámetro > 5 mm); 2.79 t C.ha⁻¹ en el sotobosque; 53.56 t C.ha⁻¹ en la necromasa; 5.87 t C.ha⁻¹ en la hojarasca; y 180.91 t C.ha⁻¹ en los primeros 30 cm de suelo. El carbono acumulado en los suelos supera en todos los casos estudiados 140 t C.ha⁻¹ tomando en cuenta que se consideraron los primeros 30 centímetros de profundidad de suelo ya que aunque se encuentra materia orgánica hasta los 120 cm se estima que los cambios que se puedan producir más allá de los 30 cm no son significativos.

SEGURA y KANNINEN (2002), los sistemas forestales y agroforestales (SAF) pueden funcionar como sumideros de CO₂ almacenando en promedio 95 t C.ha⁻¹ en zonas tropicales, para un total de 2.1 billones de t C/año en estas áreas; sin embargo, hay pocos estudios de estimación de C en la parte subterránea (raíz y suelo), mantillo y árboles muertos.

2.8. Tendencia general de la captura de carbono en el suelo

El Protocolo de Kyoto se conoce como Uso de la Tierra, Cambio en el Uso de la Tierra y Forestación (LULUCF) y concierne los artículos 1.3 y 1.4 del Protocolo (IPCC, 2001). La toma de acción para la captura de carbono bajo el Protocolo de Kyoto u otro tratado post- Kyoto no solo estimulará cambios importantes en el manejo del suelo sino que también, por medio de un incremento en el contenido de materia orgánica tendrá efectos significativos directos en sus propiedades y un impacto positivo sobre las cualidades ambientales o agrícolas y sobre la biodiversidad. Las consecuencias incluirán una mayor fertilidad del suelo y productividad de la tierra para la producción de alimentos y para la seguridad alimentaria (FAO, 1999).

2.8.1. Carbono total del suelo

Los suelos contienen más carbono que la suma existente en la vegetación y en la atmósfera, el carbono en los suelos puede encontrarse en forma orgánica e inorgánica. El Carbono orgánico del suelo se encuentra en forma de residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos, en forma de humus y en formas muy condensadas de composición próxima al Carbono elemental (SWIFT, 2001).

JACKSON (1994), en condiciones naturales, el carbono orgánico del suelo resulta del balance entre la incorporación al suelo del material orgánico fresco y la salida de Carbono del suelo en forma de CO₂ a la atmósfera. Cuando los suelos tienen condiciones aeróbicas, una parte

importante del carbono que ingresa al suelo (55 Pg C año⁻¹ a nivel global) es lábil y se mineraliza rápidamente y una pequeña fracción se acumula como humus estable (0.4 Pg C año⁻¹) (FAO, 2002).

El CO₂ emitido desde el suelo a la atmósfera no solo se produce por la mineralización de la materia orgánica del suelo donde participa la fauna edáfica (organismos detritívoros) y los microorganismos del suelo, sino también se genera por el metabolismo de las raíces de las plantas. La materia orgánica del suelo (MOS) puede ser protegida de descomposición acelerada mediante: 1) estabilización física por la microagregación, 2) estabilización físico-química mediante asociación con partículas de arcilla, y 3) estabilización bioquímica mediante la formación de compuestos altamente recalcitrantes (SNOWDON *et al.*, 2001).

2.8.2. Fracciones de carbono orgánico en el suelo

Se conoce como materia orgánica del suelo (MOS) a un conjunto de residuos orgánicos de origen animal y / o vegetal, que están en diferentes etapas de descomposición, y que se acumulan tanto en la superficie como dentro del perfil del suelo. Además, incluye una fracción viva, o biota, que participa en la descomposición y transformación de los residuos orgánicos (ANDRADE e IBRAHIM, 2003).

El carbono orgánico del suelo es el principal elemento que forma parte de la materia orgánica del suelo, por esto es común que ambos términos se confundan o se hable indistintamente de uno u otro. Al respecto cabe

señalar que los métodos analíticos determinan carbono orgánico del suelo, (calcinación húmeda o seca) y que la materia orgánica del suelo se estima a partir del carbono orgánico del suelo multiplicado por factores empíricos como el de van Benmelen equivalente 1,724 (JACKSON, 1994).

El factor de transformación de carbono orgánico del suelo a materia orgánica del suelo puede variar entre 1.9 para suelos superficiales y 2.5 para muchos subsuelos; como existe una considerable variación entre diferentes suelos y horizontes en el factor de conversión carbono orgánico del suelo – materia orgánica del suelo, es preferible informar el valor de COS sin transformar (ANDRADE e IBRAHIM, 2003).

GAYOSO (2006) señala que, en la materia orgánica del suelo (MOS) se distingue una fracción lábil, disponible como fuente energética, que mantiene las características químicas de su material de origen (hidratos de carbono, ligninas, proteínas, taninos, ácidos grasos), y una fracción húmica, más estable, constituida por ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas; cada una de estas fracciones se obtiene por solubilización en medios ácidos o alcalinos. Sin embargo, este tipo de fraccionamiento se encuentra limitado por la presencia de componentes no húmicos extraídos junto con la fracción húmica y que no pueden ser separados efectivamente mediante esta metodología.

Las sustancias húmicas son el principal componente de la materia orgánica del suelo y que representan por lo menos el 50 % de ésta, las sustancias húmicas son el material orgánico más abundante del medio

ambiente terrestre. Este mismo autor dentro de la fracción húmica son el componente más abundante que incluye una amplia gama de compuestos químicos insolubles en medio acuoso y contienen, además, compuestos no húmicos como largas cadenas de hidrocarburos, ésteres, ácidos y estructuras polares, que pueden ser de origen microbiano, como polisacáridos y glomalina, íntimamente asociados a los minerales del suelo (SEGURA y KANNINEN, 2002).

2.9. Inventarios de carbono

El impacto de cualquier proyecto de almacenamiento de carbono debe estimar la diferencia del carbono almacenado en sitios con proyecto y sin él (línea de base) en un tiempo determinado. En proyectos agroforestales, el caso de referencia es el sistema existente de uso de la tierra (POWELL, 1998).

Los inventarios de carbono son una fotografía del estado actual de cada componente de carbono (biomasa, hojarasca, raíces y suelo) en términos de cantidad. Esta metodología debería permitir la comparación entre sitios, sistemas y periodos y dependerá de la relación costo-beneficio. 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 (MACDIKEN, 1997).

El incremento en la atmósfera de los llamados gases de invernadero (GHG) y el consecuente cambio climático tendrán efectos importantes en el siglo XXI. Si bien los escenarios exactos todavía son inciertos, son de esperar serios efectos negativos -aunque se esperan también algunos efectos positivos- por lo que es esencial que sean tomadas un cierto número de medidas para reducir las emisiones de gases de invernadero y para incrementar su captura en los suelos y en la biomasa. Para ello, deben ser desarrolladas nuevas estrategias y políticas apropiadas para el manejo de la agricultura y los bosques naturales. Una opción se basa en la captura de carbono en los suelos o en las biomásas terrestres, sobre todo en las tierras usadas para la agricultura o para el establecimiento de plantaciones forestales -forestación (GAYOSO, 2006).

2.10. 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 $200 \text{ t C}\cdot\text{ha}^{-1}$ de carbono equivalente. 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), la cual difiere por las elevadas concentraciones de materia orgánica en los suelos de aguajales debido a su acidez y condición anaeróbica, situación característica de estos humedales. En el ecosistema de aguajal mixto reportó 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 para aguajales con manejo o sin él, respectivamente, esta diferencia se explicaría por la metodología asumida, puesto que en el estudio se aumentó la muestra para la evaluación.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar y fecha de ejecución

El presente trabajo de investigación se desarrolló en los potreros del Módulo lechero de la Facultad de Zootecnia, que se encuentra en el distrito de José Crespo y Castillo (Aucayacu). Geográficamente se encuentra ubicado a $09^{\circ} 09' 07''$ latitud sur, $75^{\circ} 73'07''$ longitud oeste (Figura 1); a una altitud de 580 m.s.n.m. Presenta una temperatura media anual de 24°C , temperatura máxima de 30.9°C y mínima de 18°C ; con una precipitación media anual de 3,179 mm y una humedad relativa media anual del 80 % (UNAS, 2000).

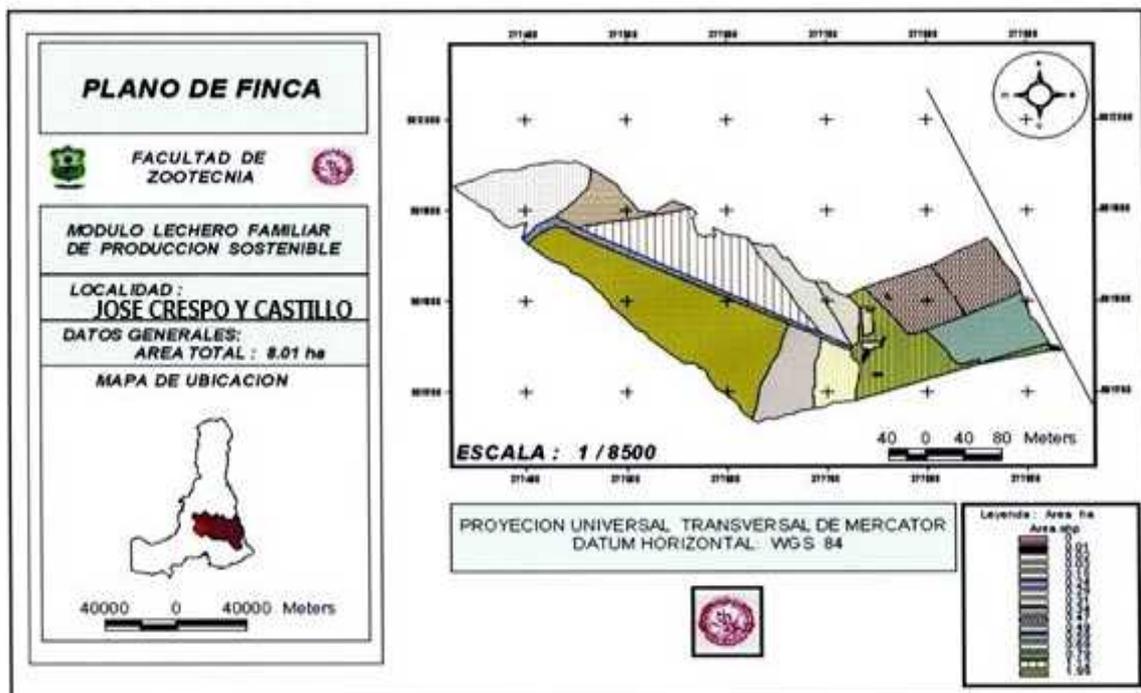


Figura 1. Plano de ubicación del módulo lechero de la Facultad de Zootecnia.

3.2. Materiales y equipos

Los recomendados por RIOS (2007) y ANDRADE (1999).

3.2.1. Materiales

- Pala plana.
- Wincha de 50 metros.
- Machete.
- Cilindro de densidad aparente de volumen conocido.
- Bolsas de papel.
- Libreta de apuntes.
- Metro de madera.
- Regla.
- Bolsas plásticas de 10 x 20.
- Metro cuadrado.
- Cuadrante de 0.50 x 0.50 metros.
- Tijera.
- Rafia.

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 sistemas, 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 y PEZO, 2003).

3.3.1. Sistemas agroforestales

Se seleccionó cuatro 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), la tercera con *B. decumbens*, *C. spruceanum*, que corresponde a un sistema silvopastoril con capírona (SSP3) y el cuarto sistema con *Axonopus compressus* y *Paspalum conjugatum*, que corresponde a un sistema tradicional con pastura natural (ST).

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 en pastoreo los sistemas con aguaje, capirona y el sistema tradicional; mientras que el sistema multiestrato se encuentra libre de pastoreo.

3.3.2. Demarcación del área de estudio

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

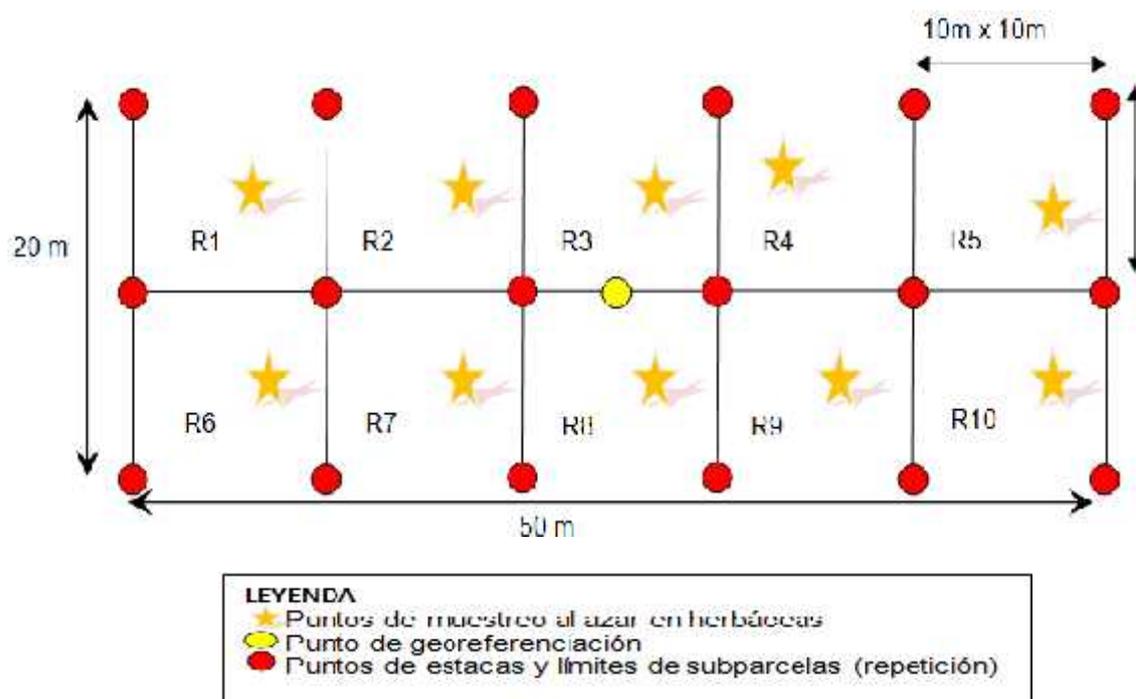


Figura 2. Esquema de la parcela y sus medidas en estudio.

Cada subparcela (repetición) tuvo una dimensión de 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); en algunas parcelas que fueron evaluadas encontraremos presencia de árboles instalados en ellos formando parte de su sistema, 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.

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 capirona (*C. spruceanum*) y el aguaje (*M. flexuosa*) se utilizó ecuaciones alométricas específicas para estas especies. Para la evaluación de la biomasa arbórea del capirona (*C. spruceanum*) se utilizó la ecuación alométricas para madera dura (IPCC, 2003).

$$Y = \text{Exp} [-2.289 + 2.649 * \text{LN} (\text{dap}) - 0.021 * (\text{dap})^2]$$

Donde:

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).

$$Y = 4.5 + 7.7 * H$$

Donde:

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 fórmula:

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

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 100 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 simples se determinó la biomasa en materia seca del metro cuadrado y se extrapoló a toneladas por hectárea (t ha⁻¹). Se utilizaron las fórmulas usadas por BERAUN (2011).

$$\% \text{ MS} = (\text{MS}_{\text{ submuestra}} / \text{MV}_{\text{ submuestra}}) * 100$$

Donde:

%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.

$$\text{Biomasa herbácea (t ha}^{-1}\text{)} = \text{MVH}_{\text{ muestra}} * (\% \text{ MS}) * 10$$

Donde:

Biomasa herbácea (t ha⁻¹): Biomasa herbácea (materia seca).

MVH muestra: Materia verde herbácea de 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}). Se utilizaron las fórmulas usadas por BERAUN (2011).

$$\text{Biomasa hojarasca (t ha}^{-1}\text{)} = \text{MVh}_{\text{muestra}} * (\% \text{ MS}) * 10$$

Donde:

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

$\text{MVh}_{\text{muestra}}$: 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:

$$\text{Carbono arbórea (t ha}^{-1}\text{) (CH)} = \text{biomasa arbórea (t ha}^{-1}\text{)} * 0.5.$$

$$\text{Carbono herbácea (t ha}^{-1}\text{) (Ch)} = \text{biomasa herbácea (t ha}^{-1}\text{)} * 0.5.$$

$$\text{Carbono hojarasca (t ha}^{-1}\text{) (CR)} = \text{biomasa hojarasca (t ha}^{-1}\text{)} * 0.5.$$

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

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

Para determinar la biomasa radicular, se construyó una mini calicata de 50 cm de largo, 30 cm de ancho y 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 50 cm² y 10 cm de largo). Tal como sugiere el RÜGNITZ *et al.* (2009), se tomaron muestras 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 ($t\ ha^{-1}$), para dicha evaluación se utilizó la ecuación usada por BERAUN (2011).

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

Donde:

i = Profundidad evaluada.

n = tres profundidades.

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

$\text{MVR}_{\text{muestra}}$ = Materia verde radicular de la muestra expresada en $kg\ m^{-2}$.

$\% \text{ MS}$ = 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 fórmula:

$$\text{Carbono radicular (t ha}^{-1}\text{) (CR) = biomasa radicular (t ha}^{-1}\text{)*0.5}$$

3.3.4.2. Estimación del carbono orgánico del suelo

Para estimar el contenido de carbono orgánico, se utilizó el método de WALKLEY y BLACK (1934) (método de oxidación húmeda) por que no demanda de equipos sofisticados. Se tomaron muestras de suelo por cada estrato (0 - 10 cm; 10 - 20 cm; y 20 - 30 cm) utilizando el barreno de muestreo. Se mezcló cada muestra por estrato (profundidad) para homogenizar la muestra. Se pesó 200 g 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. Se utilizó la fórmula utilizada por BERAÚN (2011).

$$\text{COS (t ha}^{-1}\text{) = } \sum_{i=1}^{i=n} \text{ ([CO/100] * Dap * Ps * 10000) }_{\text{profundidad}}$$

Donde:

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

i: profundidad evaluada.

n: tres profundidades

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

%CO= 0.58 x %MO (según WALKLEY y BLACK, 1934)

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 ($502.66\ cm^{-3}$) y secar al horno a $105\ ^\circ C$ por 72 horas, para determinar su peso seco (PS). Posteriormente, el peso seco se dividió entre el volumen del suelo (volumen interno del cilindro).

$$Da = PS/V_{cilindro}$$

Donde:

Da: densidad parente

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:

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

Donde:

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).
- Un sistema silvopastoril con aguaje y *P. plicatulum* (SSP2)
- Un sistema silvopastoril con *B. decumbens* y capirona (SSP3).

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 4 sistemas y 10 repeticiones por cada sistema, haciendo un total de 40 repeticiones en los tres sistemas silvopastoriles y un sistema tradicional. El modelo aditivo lineal fue el siguiente:

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

Donde:

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

μ : Media general de las observaciones.

S_i : Efecto de la i -ésimo sistema.

e_{ij} : Error aleatorio.

Se realizó pruebas de medias (Tukey) al 5 % de nivel de significancia. Gráficos de box plot detallan los resultados medios de carbono almacenado. Asimismo, se realizaron análisis de correlación y regresión lineal entre el contenido de carbono aéreo y el carbono orgánico del suelo, para determinar alguna tendencia de dependencia.

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

IV. RESULTADOS

4.1. Carbono de la biomasa aérea en cuatro sistemas

El análisis de varianza para las reservas de carbono de la biomasa herbácea y de hojarasca en los cuatro sistemas en estudio (Cuadro 1), indican que existen razones suficientes ($p < 0.05$) para aceptar que los sistemas son altamente diferentes en cuanto al contenido de carbono herbáceo y de hojarasca; por otra parte, presentan un buen ajuste del modelo tanto para el carbono herbáceo como el carbono de hojarasca (0.89 y 0.97 R^2 respectivamente); así como una aceptable variabilidad entre las observaciones (22.39 % y 13.55 % de coeficiente de variabilidad respectivamente).

Cuadro 1. Análisis de varianza para el carbono herbáceo y de hojarasca en los cuatro sistemas.

Fuente de variación	GL	Herbáceo			Hojarasca		
		CM	p-valor		CM	p-valor	
Sistemas	3	6.89	<0.0001	**	111.81	<0.0001	**
Error experimental	36	0.07			0.25		
Total	39						

$R^2 = 0.89$; CV= 22.39 % $R^2 = 0.97$; CV = 13.55 %

** Altamente significativo.

Para el carbono arbóreo no se realizó análisis de varianza por cuanto no se presenta réplica de la unidad muestreada, pero si interviene como parte del carbono aéreo. De acuerdo a este resultado se procedió a realizar la prueba de medias (Tukey) de los componentes del carbono aéreo (Cuadro 2).

Cuadro 2. Carbono de la biomasa aérea en cuatro sistemas, expresadas en t C.ha⁻¹ (n = 10; media ± error estándar).

Sistema	C. arbóreo	C. herbáceo	C. hojarasca	C. total aéreo
Sistemas multiestrato	8.23	2.32 ± 0.14 a	6.12 ± 0.20 b	16.67 ± 0.17 a
Sistema con aguaje	2.12	0.98 ± 0.06 b	6.99 ± 0.23 a	10.09 ± 0.24 b
Sistema con capirona	1.98	1.05 ± 0.05 b	1.35 ± 0.08 c	4.38 ± 0.08 c
Sistema tradicional	0	0.34 ± 0.03 c	0.33 ± 0.03 d	0.67 ± 0.03 d
p-valor		<0.0001	<0.0001	<0.0001

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas según prueba de Tukey al 5 % de nivel de significancia.

Los resultados indican que existe una clara diferenciación entre los cuatro sistemas evaluados en cuanto al contenido de carbono aéreo (Cuadro 2). Con respecto al carbono arbóreo el sistema multiestrato (capirona, eritrina y *B. decumbens*) se estima la mayor reserva de carbono con respecto al resto de sistemas (8.23 t C.ha⁻¹), seguido del sistema con aguaje y *P. plicatulum* (2.12 t C.ha⁻¹); el sistema con menor carbono arbóreo resultó con 1.98 t C.ha⁻¹ (capirona y *B. decumbens*).

El sistema tradicional con pastura natural, no registra el componente de carbono arbóreo. En cuanto al carbono herbáceo, el sistema

multiestrato registra el mayor carbono (2.32 t C.ha^{-1}) que el resto de sistemas; los sistemas con aguaje y capirona almacenan similares reservas de carbono herbáceo (0.98 y 1.05 t C.ha^{-1} respectivamente). Para el carbono hojarasca, el sistema con aguaje se estima con la mayor reserva de carbono (6.99 t C.ha^{-1}), seguido de los sistemas multiestrato y capirona (6.12 y 1.35 t C.ha^{-1} respectivamente).

Es importante señalar que el sistema tradicional es la que presenta las menores reservas de carbono en todos los componentes. En cuanto a la suma total del carbono aéreo, el sistema multiestrato presenta mayor reserva de carbono aéreo que el resto de los sistemas ($16.67 \text{ t C.ha}^{-1}$), seguido de los sistemas con aguaje, capirona y tradicional con valores de 10.09 , 4.38 y 0.67 t C.ha^{-1} respectivamente (Figura 3).

Cuadro 3. Carbono aéreo en cuatro sistemas, expresadas en t C.ha^{-1} ($n = 10$; media).

Sistema	Promedio	Mediana	Cuantil 1	Cuantil 3
Sistema multiestrato	16.67	16.74	16.33	16.99
Sistema con aguaje	10.09	10.21	9.46	10.72
Sistema con capirona	4.38	4.43	4.22	4.51
Sistema tradicional	0.66	0.65	0.58	0.76

Promedio: determinado en base a t C.ha^{-1} .

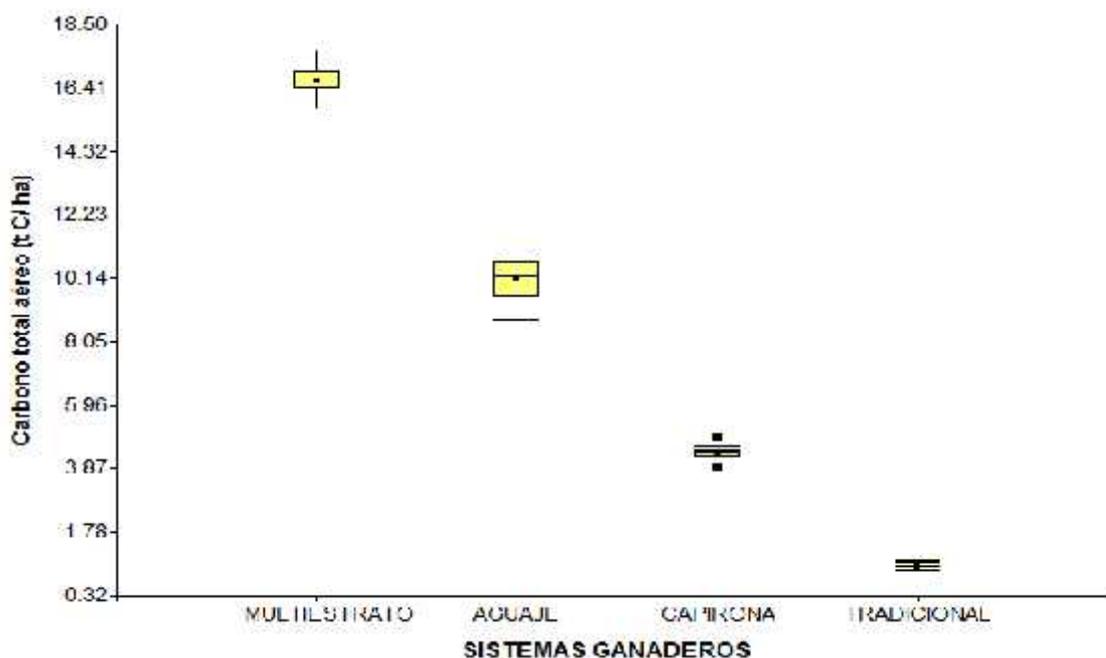


Figura 3. Gráfico de boxplot para el contenido de carbono aéreo entre sistemas.

En detalle muestra las cajas de boxplot del carbono aéreo para los sistemas evaluados (Figura 3), donde se observa que el sistema tradicional con pasto natural presenta la menor reserva de carbono aéreo ($0.67 \text{ t C}\cdot\text{ha}^{-1}$) que el resto de sistemas.

Cuadro 4. Contenido de carbono ($\text{t C}\cdot\text{ha}^{-1}$) por componentes herbáceo y hojarasca entre sistemas ($n = 10$; promedio).

Sistema	Carbono herbáceo	Carbono de hojarasca
Multiestrato	2.32	6.12
Aguaje	0.98	6.99
Capirona	1.05	1.36
Tradicional	0.34	0.33

Existe una clara diferencia entre el carbono herbáceo y de hojarasca entre los sistemas; este comportamiento de que los sistemas multiestrato y con aguaje mantienen una diferencia notable sobre los sistemas con capirona y tradicional, muestran cantidades similares entre estos dos componentes (Figura 4).

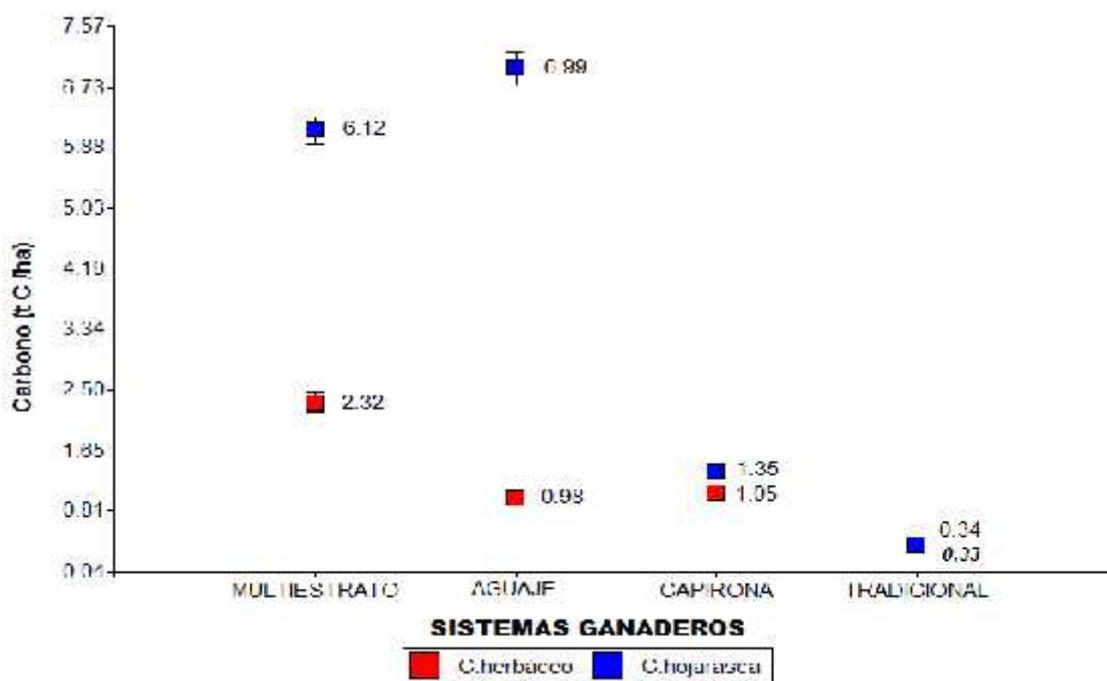


Figura 4. Contenido de carbono ($t C \cdot ha^{-1}$) por componente herbáceo y hojarasca entre sistemas.

4.2. Carbono bajo suelo entre los sistemas evaluados

4.2.1. Carbono radicular

Con respecto a la biomasa radicular herbácea, el sistema tradicional con pasto natural presenta similar contenido con el sistema con aguaje con pasto *P. plicatulum* (588.95 y 624.20 $gr \cdot m^{-2}$ respectivamente),

seguido del sistema multiestrato con *B. decumbens* y el sistema con capirona con *B. decumbens* (523.92 y 280.78 g.m⁻² respectivamente). Este comportamiento es similar con respecto a la reserva de carbono radicular herbáceo (Cuadro 5).

Cuadro 5. Biomasa radicular, carbono radicular herbáceo y arbóreo y carbono total radicular entre los sistemas expresados en t C.ha⁻¹ (n = 10; Media ± error estándar).

Sistema	Biomasa radicular herbácea (g/m ²)	C. radicular herbáceo	C. radicular arbóreo	C. total radicular
Multiestrato	523.92 ± 5.94 b	31.44 ± 0.36 b	4.29	35.73 ± 0.36 b
Aguaje	624.2 ± 15.02 a	37.45 ± 0.90 a	0.49	37.94 ± 0.90 a
Capirona	280.78 ± 4.33 c	16.85 ± 0.26 c	1.73	18.57 ± 0.26 c
Tradicional	588.94 ± 19.82 a	35.34 ± 1.19 a	0	35.34 ± 1.19 b
p-valor	<0.0001	<0.0001		
R ²	0.92	0.92		

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas según prueba de Tukey al 5% de nivel de significancia.

Con respecto al contenido del carbono radicular arbóreo, obtenidos en base a la biomasa aérea, muestra reserva el sistema multiestrato (4.29 t C.ha⁻¹), seguido del sistema con capirona y aguaje (1.73 y 0.49 t C.ha⁻¹ respectivamente). Con respecto a la suma total del carbono radicular, a pesar de tener el sistema con aguaje menor contenido de carbono radicular arbóreo, logra acumular mayor reserva total de carbono radicular (37.94 t C.ha⁻¹) que el

resto de sistemas. Asimismo, es importante resaltar que los sistemas multiestrato y el tradicional presentan reservas de similar importancia (35.73 y 35.34 t C.ha⁻¹ respectivamente). El sistema con menor reserva pero de significativo valor es el sistema con capirona con 18.57 t C.ha⁻¹ (Figura 5).

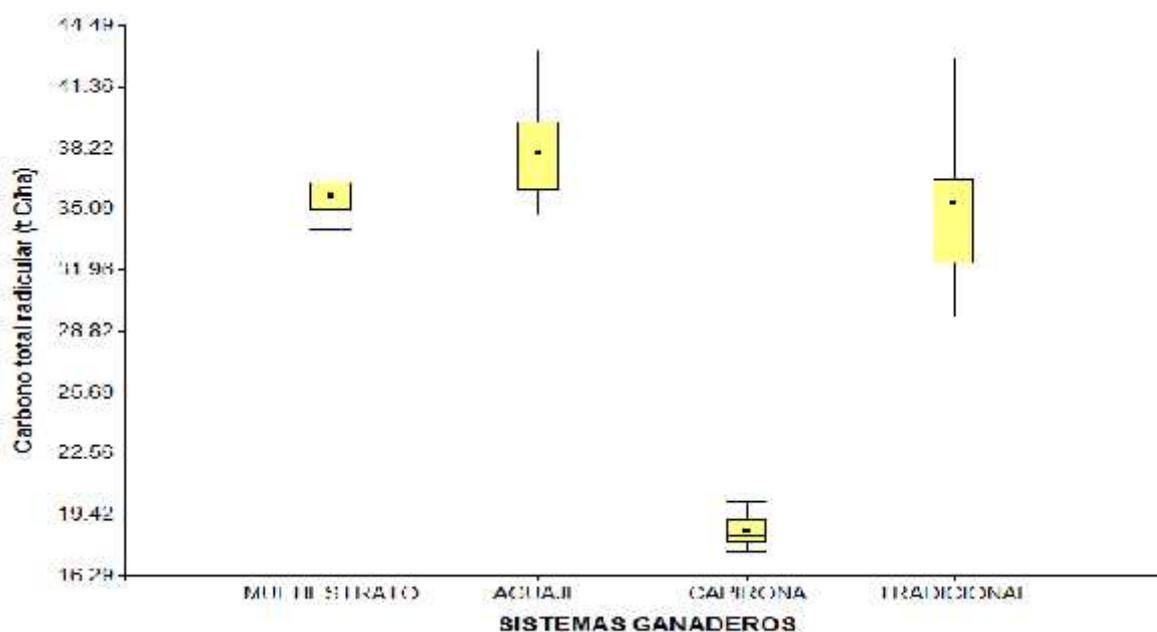


Figura 5. Carbono total radicular (t C.ha⁻¹) por sistema evaluado.

4.2.2. Carbono orgánico del suelo (COS)

Los resultados de la evaluación del carbono orgánico del suelo en los tres niveles de evaluación (Cuadro 6), indica que con respecto a la materia orgánica, se observa una disminución a mayor profundidad en todos los sistemas, siendo el mayor contenido de materia orgánica en los primeros 10 centímetros de profundidad del suelo. El sistema con capirona presenta menor tenor de materia orgánica a comparación de los otros sistemas. Los sistemas con aguaje y tradicional presentan mayor riqueza en contenido orgánico en las tres profundidades evaluadas (Figura 6).

Cuadro 6. Carbono orgánico del suelo por profundidad de horizonte en las pasturas (n = 10; Media \pm error estándar).

Profundidad (cm)	Sistema	M.O. (%)	D.a. (t.ha ⁻³)	COS (t.ha ⁻¹)
0 – 10	Multiestrato	3.1	1.33 \pm 0.02 a	23.88 \pm 0.38 a
	Aguaje	3.1	1.30 \pm 0.02 a	23.36 \pm 0.44 a
	Capirona	1.72	1.32 \pm 0.02 a	13.19 \pm 0.21 c
	Tradicional	3.1	1.24 \pm 0.02 b	22.21 \pm 0.32 b
	P-valor		0.0154	<0.0001
10 - 20	Multiestrato	1.03	1.50 \pm 0.02 b	8.95 \pm 0.12 c
	Aguaje	1.38	1.47 \pm 0.02 b	11.78 \pm 0.17 b
	Capirona	0.34	1.55 \pm 0.02 a	3.06 \pm 0.03 d
	Tradicional	1.72	1.49 \pm 0.02 b	14.83 \pm 0.18 a
	P-valor		0.0331	<0.0001
20 - 30	Multiestrato	0.34	1.69 \pm 0.02 a	3.34 \pm 0.03 c
	Aguaje	1.03	1.62 \pm 0.02 b	9.67 \pm 0.15 a
	Capirona	0.34	1.73 \pm 0.01 a	3.41 \pm 0.03 c
	Tradicional	0.69	1.63 \pm 0.02 b	6.53 \pm 0.06 b
	P-valor		0.0004	<0.0001
0 - 30	Multiestrato			36.17 \pm 0.50 b
	Aguaje			44.81 \pm 0.71 a
	Capirona			19.66 \pm 0.23 c
	Tradicional			43.57 \pm 0.48 a
	P-valor			<0.0001

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas según prueba de Tukey al 5 % de nivel de significancia.

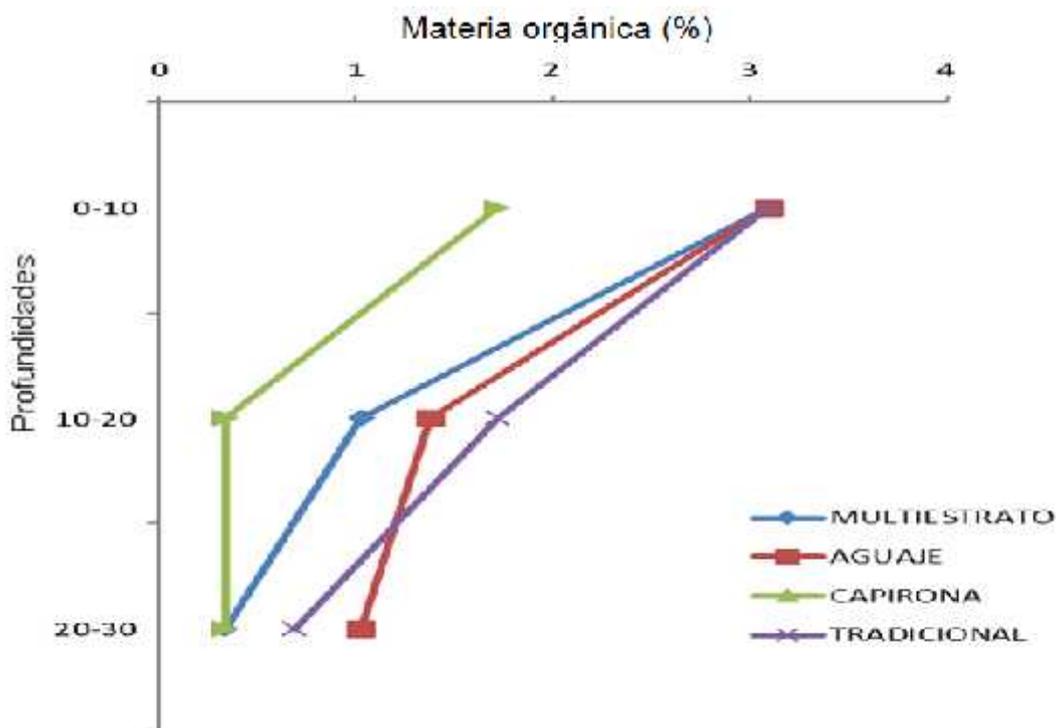


Figura 6. Materia orgánica (%) evaluada a tres profundidades en cuatro sistemas.

A mayor profundidad aumenta la densidad aparente, por lo tanto, menor compactación. Las reservas de carbono orgánico del suelo en los sistemas disminuyen a mayor profundidad, debido a su estrecha relación con el contenido de materia orgánica, debido a su similar comportamiento. Los sistemas con mayor carbono orgánico del suelo resultan el sistema con aguaje y el tradicional (Figura 7).

Con respecto al carbono orgánico del suelo en los primeros 30 centímetros de profundidad, resultan con mayores reservas los sistemas con aguaje y tradicional (44.81 y 43.57 $t\ C\cdot ha^{-1}$ respectivamente), seguido del sistema multiestrato (36.17 $t\ C\cdot ha^{-1}$), siendo el sistema con capirona con menor reserva de carbono orgánico del suelo (19.66 $t\ C\cdot ha^{-1}$) (Figura 8).

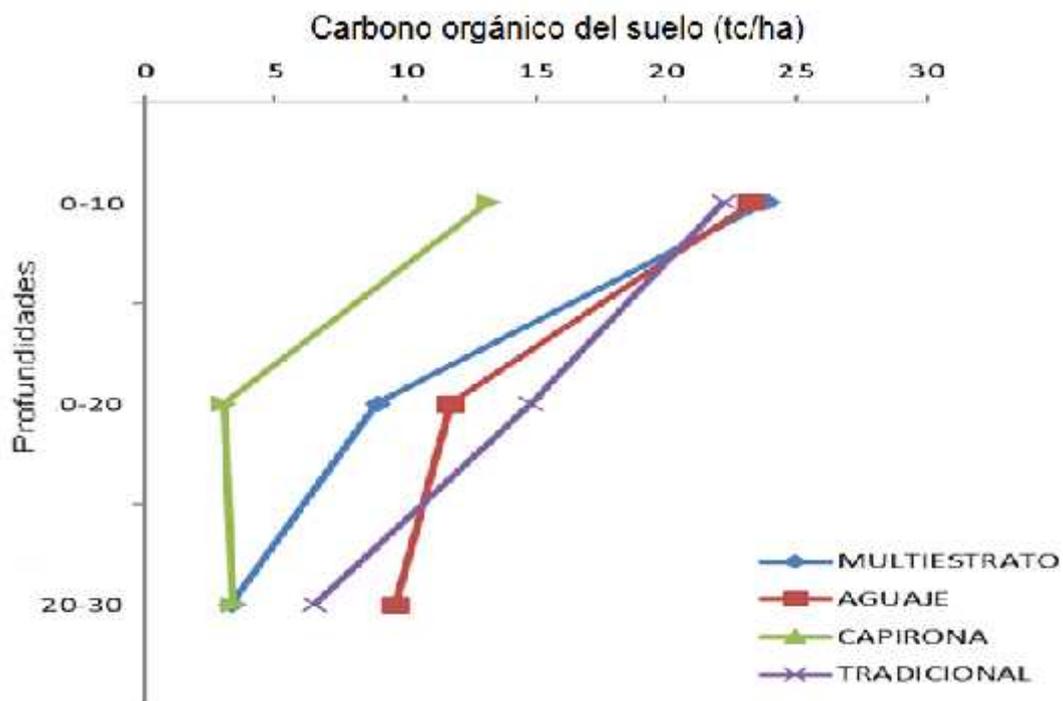


Figura 7. Carbono orgánico del suelo ($t \cdot ha^{-1}$) en tres profundidades en cuatro sistemas evaluados.

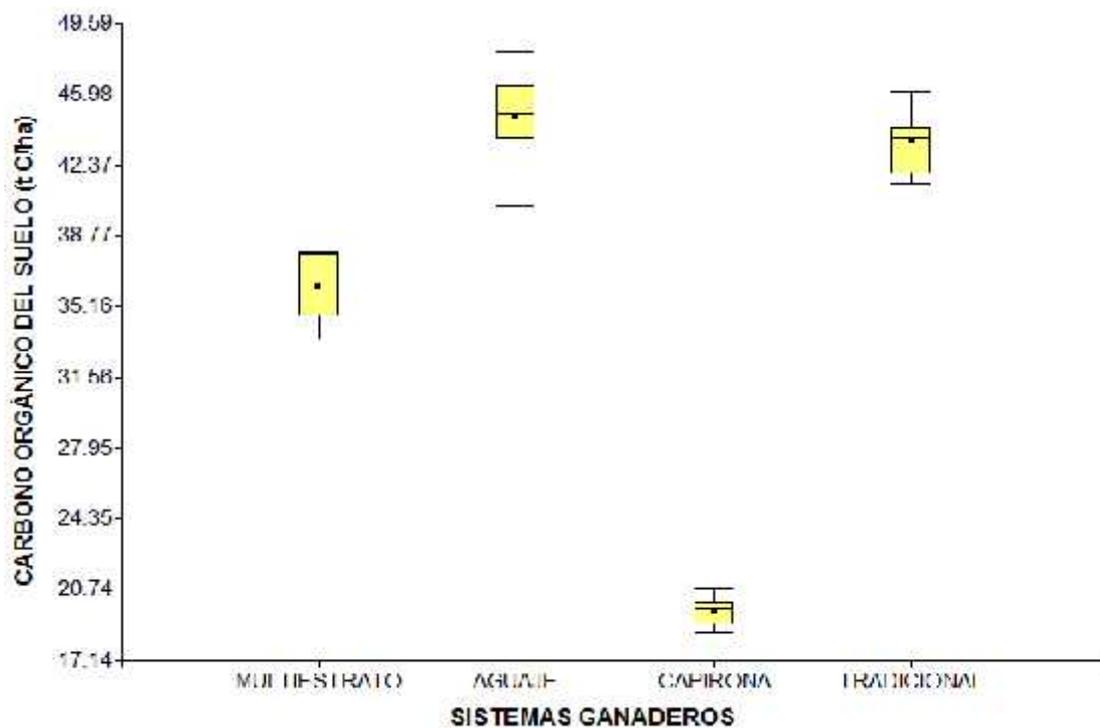


Figura 8. Carbono orgánico del suelo ($t \cdot C \cdot ha^{-1}$) en cuatro sistemas evaluados.

4.2.3. Carbono bajo suelo

El contenido total de carbono bajo suelo, es expresado por la suma del carbono total radicular y el carbono orgánico del suelo (Cuadro 7). El sistema con aguaje (*Mauritia flexuosa* L.f.) presenta mayor contenido de carbono bajo suelo ($82.75 \text{ t C.ha}^{-1}$) que el resto de sistemas evaluados, seguido del sistema tradicional con un valor de $78.91 \text{ t C.ha}^{-1}$, superando a los sistemas multiestrato y capirona con valores de 71.89 y $38.23 \text{ t C.ha}^{-1}$ respectivamente.

El sistema con menor reserva de carbono bajo suelo fue el sistema constituido por la especie forestal capirona y la gramínea *B. decumbens*. El gráfico de boxplot detalla mejor el comportamiento del carbono total bajo el suelo (Figura 8).

Cuadro 7. Carbono bajo suelo en los sistemas evaluados y expresadas en t C.ha^{-1} ($n = 10$; media \pm error estándar).

Sistema	C. total radicular	C. orgánico del suelo	C. total bajo suelo
Multiestrato	$35.73 \pm 0.36 \text{ b}$	$36.17 \pm 0.50 \text{ b}$	$71.89 \pm 0.60 \text{ c}$
Aguaje	$37.94 \pm 0.90 \text{ a}$	$44.81 \pm 0.71 \text{ a}$	$82.75 \pm 1.42 \text{ a}$
Capirona	$18.57 \pm 0.26 \text{ c}$	$19.66 \pm 0.23 \text{ c}$	$38.23 \pm 0.27 \text{ d}$
Tradicional	$35.34 \pm 1.19 \text{ b}$	$43.57 \pm 0.48 \text{ a}$	$78.91 \pm 1.48 \text{ b}$
p-valor	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas según prueba de Tukey al 5% de nivel de significancia.

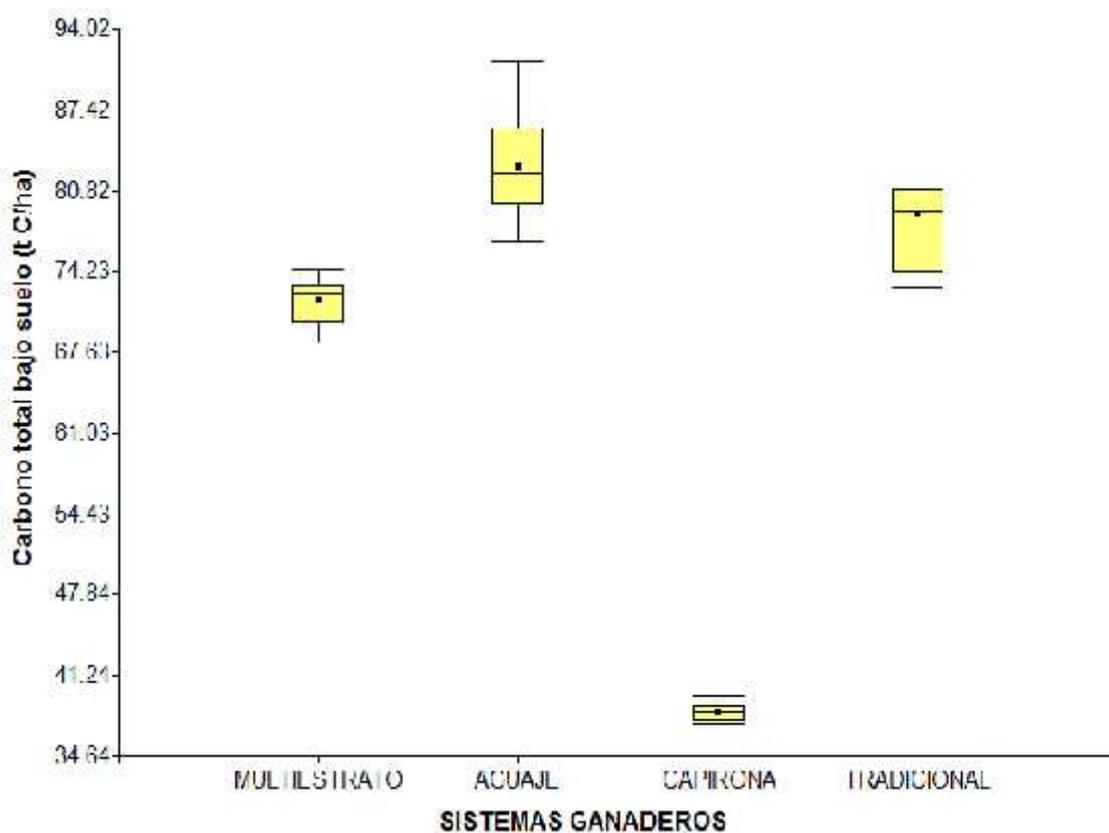


Figura 9. Gráfico de boxplot para el contenido de carbono bajo suelo ($t C \cdot ha^{-1}$) entre los sistemas evaluados.

4.3. Reserva total de carbono en los sistemas evaluados

Las reservas totales de carbono en los cuatro sistemas incluyen las reservas de carbono aéreo y el carbono bajo suelo (Cuadro 8).

La reserva total del sistema (Cuadro 8 y Figura 10) clasifica que, la mayor reserva de carbono del sistema estimado corresponde al sistema con *Mauritia flexuosa* L.f. ($92.85 t C \cdot ha^{-1}$) seguido del sistema multiestrato ($88.56 t C \cdot ha^{-1}$). El sistema tradicional supera grandemente al sistema con la especie forestal capirona (79.57 y $42.62 t C \cdot ha^{-1}$ respectivamente), siendo este último el sistema con menor reserva de carbono estimado.

Cuadro 8. Carbono total en dos sistemas de pasturas, expresadas en t C.ha⁻¹
(media \pm error estándar).

Sistema	C. total aéreo	C. total bajo suelo	C. total sistema
Multiestrato	16.67 \pm 0.17 a	71.89 \pm 0.60 c	88.56 \pm 0.66 b
Aguaje	10.09 \pm 0.24 b	82.75 \pm 1.42 a	92.85 \pm 1.43 a
Capirona	4.38 \pm 0.08 c	38.23 \pm 0.27 d	42.62 \pm 0.27 d
Tradicional	0.67 \pm 0.03 d	78.91 \pm 1.48 b	79.57 \pm 1.46 c
p-valor	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas según prueba de Tukey al 5% de nivel de significancia.

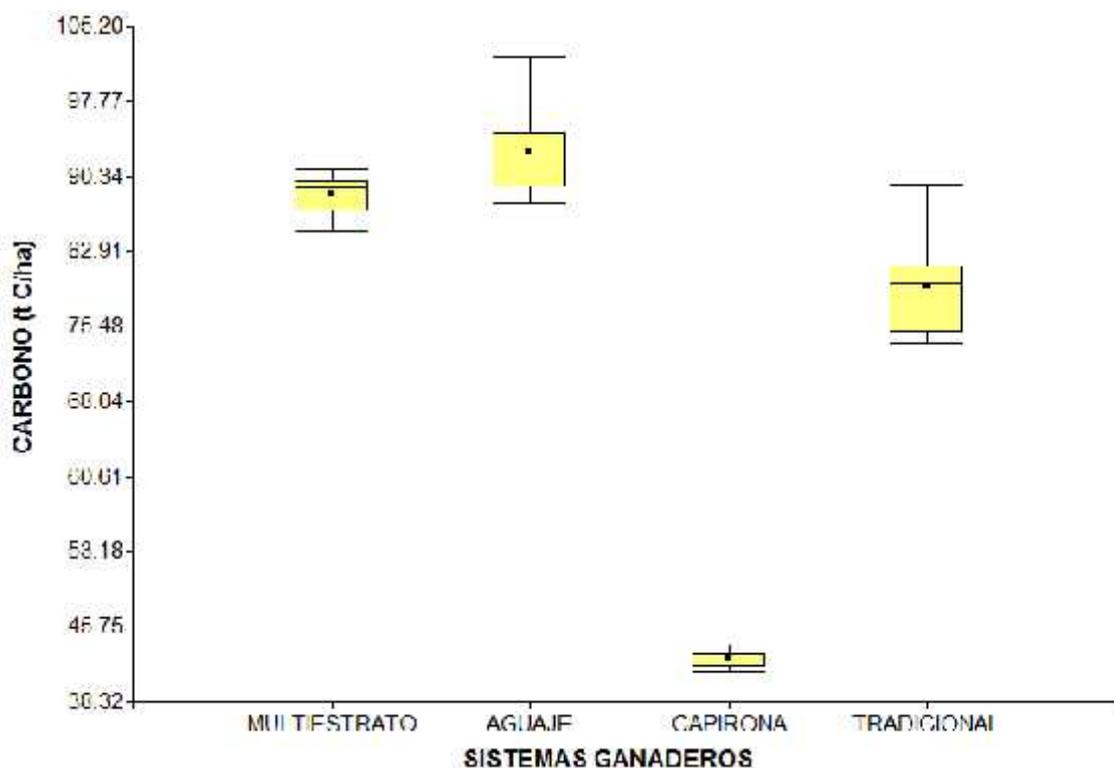


Figura 10. Gráfico de boxplot para la reserva total de carbono (t C.ha⁻¹) entre los sistemas evaluados.

4.4. Relación entre carbono aéreo y radicular entre el carbono orgánico del suelo

En principio se hace un análisis sobre las cantidades y proporciones del contenido de carbono total aéreo y el carbono total bajo suelo (Cuadro 9).

La reserva de carbono bajo el suelo es mayor en todos los sistemas evaluados, fluctúa entre un 99 a un 81 por ciento de la reserva total de carbono del sistema, siendo solo un 18 a 10 por ciento el carbono aéreo o lo que podemos ver. El sistema tradicional representa el carbono bajo suelo un 99 % de la reserva total del sistema, precisamente por cuanto tiene muy poco contenido de biomasa aérea (Cuadro 9 y Figura 11).

Cuadro 9. Relación del contenido de carbono aéreo y carbono bajo suelo en cuatro sistemas, expresadas en t C.ha⁻¹.

Sistema	C. aéreo	C. bajo suelo
Multiestrato	16.67	71.89
Unidad (%)	18.82 %	81.18 %
Aguaje	10.09	82.75
Unidad (%)	10.87 %	89.13 %
Capirona	4.38	38.23
Unidad (%)	10.28 %	89.72 %
Tradicional	0.67	78.91
Unidad (%)	0.84 %	99.16 %

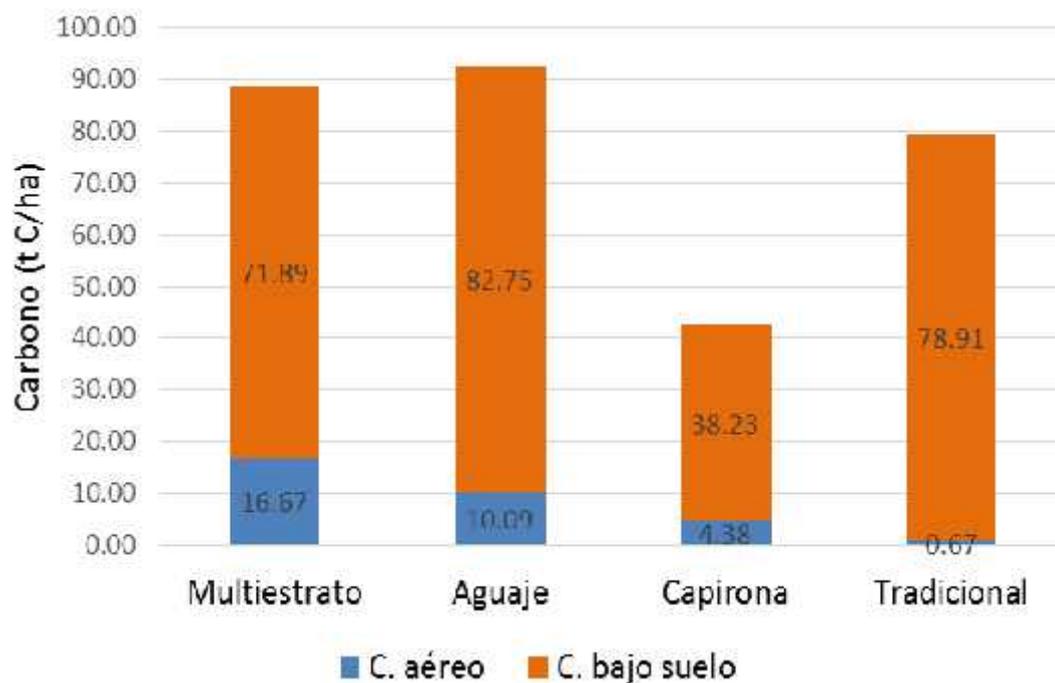


Figura 11. Proporciones del carbono total en cuatro sistemas evaluados

El análisis de la proporción porcentual para las reservas de carbono en los sistemas de acuerdo al contenido de carbono aéreo y bajo el suelo muestran que, el sistema tradicional con pastura natural de la reserva total de carbono almacenado solo representa el 0.84 % ($0.67 \text{ t C}\cdot\text{ha}^{-1}$) correspondiente al carbono aéreo, mientras que el 99.16 % ($78.91 \text{ t C}\cdot\text{ha}^{-1}$) se encontraba distribuido bajo suelo.

En segundo lugar, se hace un análisis de dependencia o correlación entre el carbono orgánico del suelo con las variables del carbono herbáceo, carbono hojarasca y carbono radicular herbáceo (Cuadro 10). Se observa que, no existe dependencia entre el COS y el carbono herbáceo ($p > 0.05$), sin embargo, para el carbono hojarasca a pesar de ser significativo ($p < 0.05$) se rechaza la dependencia por ser muy baja de acuerdo al coeficiente

de Pearson (0.35). Para el carbono radicular herbáceo, si existe una alta dependencia ($p < 0.05$) con el COS, el cual es posible predecir el COS teniendo como regresora el carbono radicular herbáceo con un 92 % de ajuste.

Cuadro 10. Análisis de correlación de Pearson entre el COS con otras variables.

Variable	Variable	Coefficiente de Pearson	p-valor	
	C. herbáceo	-0.19	0.2452	ns
COS	C. hojarasca	0.35	0.025	*
	C. radicular herbáceo	0.96	<0.0001	**

ns = no significativo; * = significativo; ** = altamente significativo.

Es posible predecir el COS teniendo solo el carbono radicular herbáceo en un 92 % de predicción, entre el intervalo de 15.84 hasta 42.78 t C.ha⁻¹ (Figura 12), a través de la siguiente ecuación:

$$\text{COS (t C.ha}^{-1}\text{)} = 0.82 + 1.16 (\text{C. radicular herbáceo (t C.ha}^{-1}\text{)})$$

Donde por cada tonelada de incremento de carbono radicular herbáceo se incrementa 1.16 t de carbono orgánico del suelo.

En tercer lugar, la importancia de conocer el carbono orgánico del suelo radica en que es posible predecir el carbono total del sistema. Para ello, se hizo un análisis de correlación entre el carbono total del sistema y el COS, para determinar alguna dependencia entre estas dos variables (Cuadro 11).

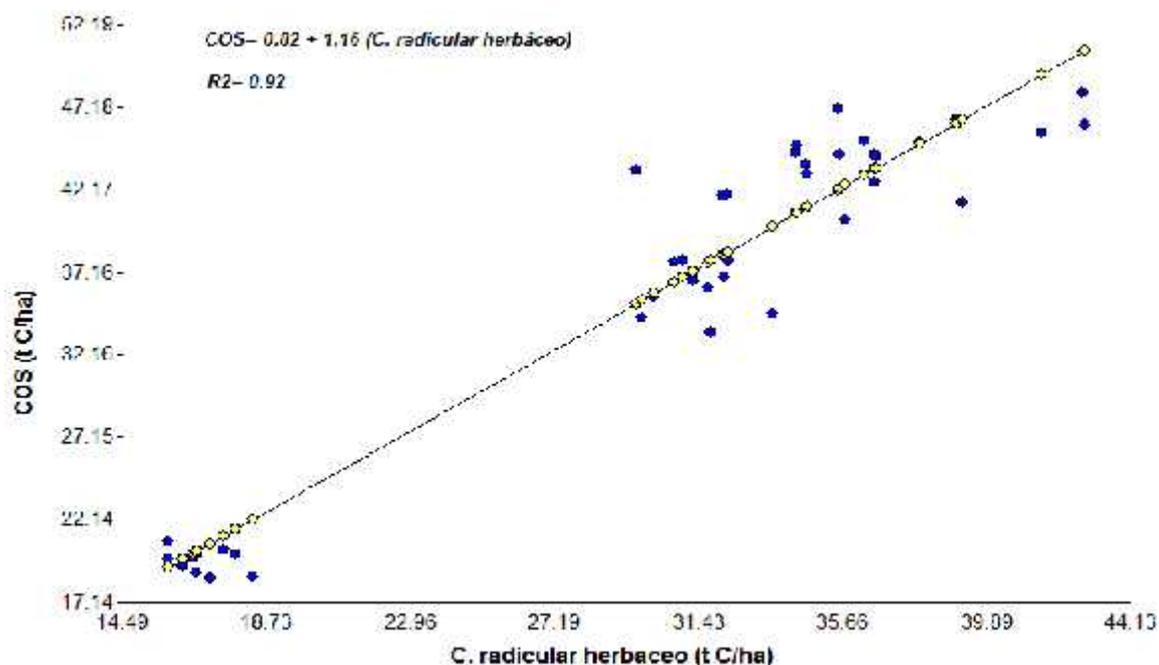


Figura 12. Regresión lineal del COS actuando como regresora el carbono radicular herbáceo.

Cuadro 11. Análisis de correlación de Pearson entre el carbono total del sistema y el COS.

Variable	Variable	Coefficiente de Pearson	p-valor
Carbono total del sistema	COS	0.91	<0.0001 **

** = altamente significativo

Como se observa existe una clara evidencia de dependencia entre estas dos variables ($p < 0.05$), por lo que se procedió a realizar la regresión lineal para encontrar la ecuación predictora (Figura 13). Se muestra la ecuación predictora del carbono total del sistema teniendo como regresora el COS, entre un rango desde 18.61 hasta 48.11, el cual es posible predecir en un 82 % de ajuste del modelo. La ecuación es la siguiente:

$$\text{Carbono total del sistema (t C.ha}^{-1}\text{)} = 11.25 + 1.79 (\text{COS (t C.ha}^{-1}\text{)})$$

Donde por cada tonelada de incremento de COS se incrementa 1.79 toneladas de carbono total del sistema.

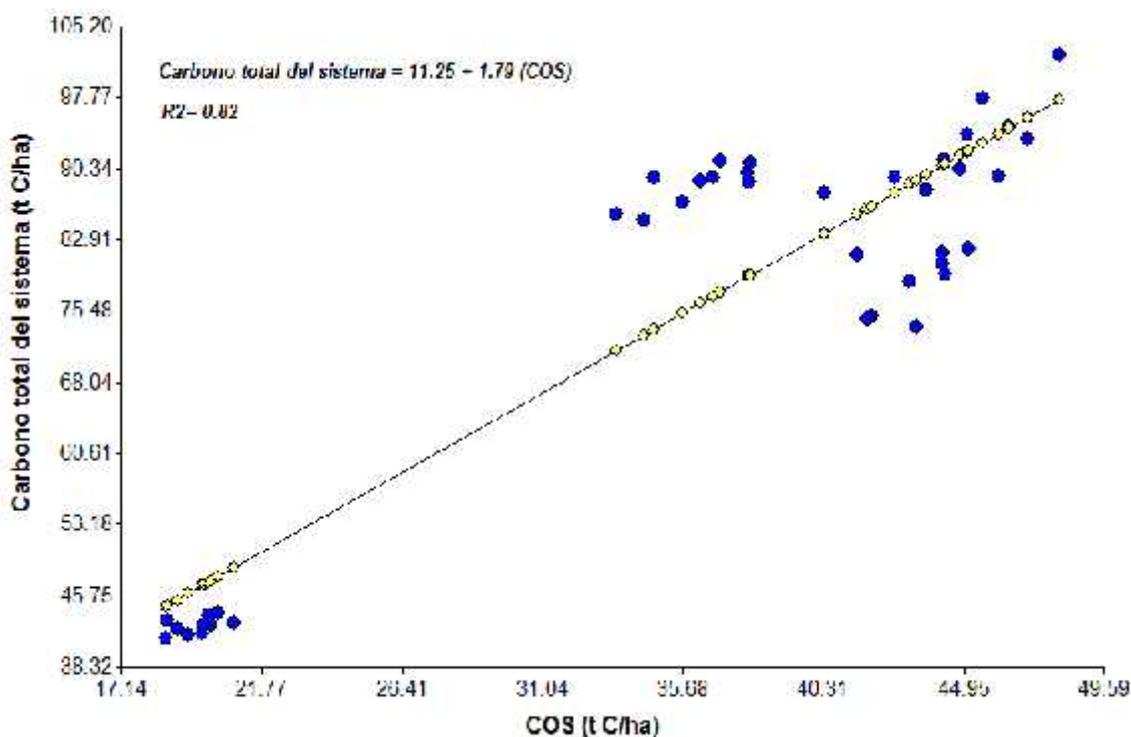


Figura 13. Regresión lineal del carbono total del sistema con el COS.

Por último, la importancia del carbono orgánico del suelo, radica en que es un componente más estable que el carbono aéreo. Con respecto al carbono total del sistema, el COS representa un buen porcentaje de ella (Cuadro 12), donde el COS representa un 40.83 % del carbono total del sistema multiestrato, el 48.28 % del carbono total del sistema con aguaje, y es precisamente en el sistema tradicional con pasto natural que tiene el mayor porcentaje con 54.85 % del carbono total del sistema. El sistema tradicional fue superior a los demás sistemas en estudio (Figura 14).

Cuadro 12. Porcentaje del carbono total del sistema que corresponde al COS en los sistemas evaluados (media \pm error estándar).

Sistema	COS (%)	Min (%)	Max (%)
Multiestrato	40.83 \pm 0.38	38.85	42.64
Aguaje	48.28 \pm 0.45	45.95	50.36
Capirona	46.13 \pm 0.47	43.26	48.6
Tradicional	54.85 \pm 0.71	50.94	58.78

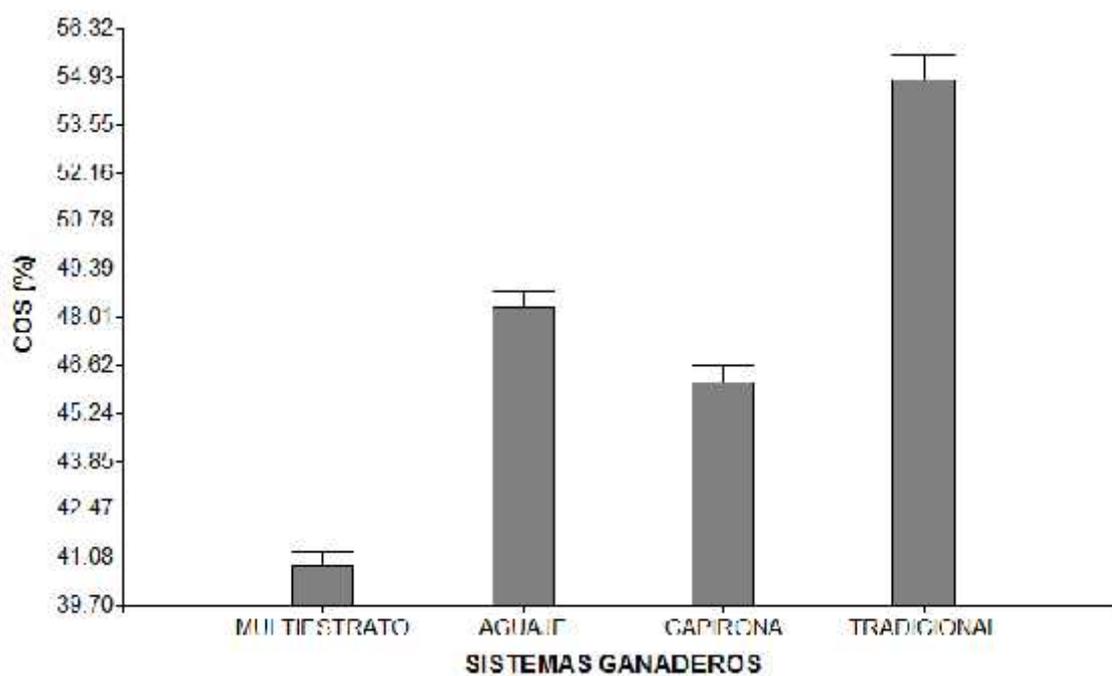


Figura 14. Porcentaje del COS como parte del carbono total del sistema evaluado.

V. DISCUSIÓN

5.1. Carbono de la biomasa aérea en cuatro sistemas

Los sistemas silvopastoriles evaluados corresponden a sistemas multiestrato, con aguaje, con capirona y el sistema tradicional sobre ellas se procedió a desarrollar la metodología propuesta por el ICRAF para estimar las reservas de carbono. El carbono aéreo está compuesto de tres componentes: el carbono arbóreo, el carbono herbáceo y el carbono de hojarasca. Los tres componentes descritos (Cuadro 2), muestran el sistema tradicional el que no contó con las reservas de carbono arbóreo. De ello se deduce que el sistema multiestrato logra una reserva de 8.23 t C.ha^{-1} , valor superior a lo encontrado por HUMANCAYO (2012), quien reporta una reserva de solo 2.82 t C.ha^{-1} .

Para el sistema con aguaje, esta tuvo una reserva de 2.12 t C.ha^{-1} , siendo el valor medio encontrado muy similar por HUAMANCAYO (2012) quien reportó una reserva de solo 2.25 t C.ha^{-1} .

Con respecto al carbono herbáceo, y al carbono hojarasca, estas corresponden a toda la materia verde y seca de la cobertura del suelo, principalmente corresponde al pasto establecido en cada sistema. Esta reserva junto con la biomasa arbórea constituye el carbono aéreo, del que podemos

observar. Los resultados no indican una alta diferencia ($p < 0.05$) entre los cuatro sistemas evaluados. Siendo el sistema multiestrato (capirona, eritrina y *B. decumbens*) con la mayor reserva aérea ($16.67 \text{ t C.ha}^{-1}$), del resto de sistemas, siendo el sistema con aguaje (aguaje y *P. plicatulum*) el segundo sistema en reservas de carbono aéreo ($10.09 \text{ t C.ha}^{-1}$), seguida del sistema con capirona (capirona y *B. decumbens*) y el sistema tradicional con pasto natural (*Axonopus compressus* y *Paspalum conjugatum*) (4.38 y 0.67 t C.ha^{-1} respectivamente).

Esto resultados, el cual el sistema con capirona presenta menor carbono aéreo, radica a que este sistema fue establecido recientemente el 2009, aun no alcanzando el diámetro de tallo similar el sistema multiestrato, establecido el 2006. 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} , los resultados encontrados están dentro del rango reportado.

El carbono herbáceo se tuvo una reserva de 2.32 t C.ha^{-1} en el sistema multiestrato, seguido de los sistemas con aguaje y con capirona (0.98 y 1.05 t C.ha^{-1} respectivamente). Estos resultados son similares a los

encontrados 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; asimismo, 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 en el sistema multiestrato, ya que los otros sistemas se encuentran en permanente pastoreo. Por ello, el incremento de carbono encontrado se justifica por un mayor desarrollo herbáceo cuando la pastura no es defoliada (DA CRUZ, 2006).

El carbono de hojarasca, es más alto con respecto al herbáceo, debido precisamente al pastoreo realizado. El sistema con aguaje presenta el mayor contenido de carbono hojarasca (6.99 t C.ha⁻¹) debido a que el pasto *Paspalum plicatulum*, no es muy palatable y se mantienen la necromasa herbácea sobre la superficie. De igual modo para el sistema multiestrato que obtuvo 6.12 t C.ha⁻¹ debido a que no se está pastoreando la necromasa herbácea se encuentra abundante. Esta diferencia de hojarasca 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.

En cuanto al sistema tradicional considerado en el estudio, esta mantiene su proporción entre el carbono herbáceo y el carbono almacenado en la hojarasca (0.34 y 0.33 t C.ha⁻¹ respectivamente) Similar resultado obtuvo BERAÚN (2011) en una evaluación realizada entre una pastura mejorada y natural.

5.2. Carbono bajo suelo entre los sistemas evaluados

5.2.1. Carbono radicular

En los primeros 30 centímetros de profundidad se determinó diferencia significativa de la biomasa radicular entre los cuatro sistemas (523.92, 624.20, 280.78 y 588.94 g/m²) entre los sistemas multiestrato, aguaje, capirona y tradicional respectivamente (Cuadro 2). 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 g.m⁻² de MS para suelos de topografía plana y 640 g.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 g.m⁻² de MS de raíces en plantas C4 como el pasto elefante (*Pennisetum purpureum*); así mismo, reportó para especies de *Axonopus* con 420 g.m⁻² de MS. BERAÚN (2011) reporta contenidos de MS radicular, con 753 y 557 g.m⁻² para *B. decumbens* y pastura natural; mientras que HUAMANCAYO (2012) reporta menores resultados, para el sistema multiestrato (349.12 g/m²), el sistema aguaje (428.28 g/m²) y el sistema con pasto natural (449.77 g/m²).

Estudios efectuados por RAO *et al.* (2001) muestran la distribución de raíces de pasturas concentrada en los primeros 30 cm 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).

El carbono radicular (Cuadro 3) demostró alta diferencia estadística ($p < 0.05$) entre los sistemas debido a que el contenido de raíces finas muestra una fuerte asociación con el stock de carbono (AMÉZQUITA *et al.*, 2008). El carbono radicular estimado para el sistema multiestrato resultó con $35.73 \text{ t C.ha}^{-1}$, siendo superior el sistema con agujero que se estimó en $37.94 \text{ t C.ha}^{-1}$. Es importante indicar que el sistema tradicional con pasto natural ($35.34 \text{ t C.ha}^{-1}$) logra una igualdad estadística con el sistema multiestrato. El sistema capirona es la que presenta menor carbono radicular ($18.57 \text{ t C.ha}^{-1}$).

Estos resultados confirman que los pastos naturales presentan una mayor biomasa radicular que los pastos mejorados, esta característica propia de las pasturas naturales permite a la que dicha especie gramínea garantice su permanencia en el tiempo y la resistencia en sistemas sobre pastoreados (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 resiliencia que supera a la pastura mejorada (PEZO *et al.*, 2009). Los trabajos reportados por BERAÚN (2011) y HUAMANCAYO (2012), muestran menores reservas de carbono radicular. Estos resultados nos muestran que los sistemas radiculares son verdaderos sumideros de carbono, representando entre un 10 a 40 % de la biomasa total del sistema (MACDIKEN, 1997).

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 (JACKSON, 1994).

Existió diferencia significativa ($p < 0.05$) en el contenido de carbono orgánico del suelo en los tres sistemas, tanto a nivel de estratos como en forma completa (Cuadro 4). Los resultados muestran que el sistema tradicional con pastura natural una reserva de carbono orgánico del suelo (COS) ($43.57 \text{ t C.ha}^{-1}$) similar al sistema con aguaje ($44.81 \text{ t C.ha}^{-1}$) y seguido del sistema multiestrato ($36.17 \text{ t C.ha}^{-1}$) siendo el sistema con capirona ($19.66 \text{ t C.ha}^{-1}$). 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.

Este comportamiento puede explicarse debido a que los sistemas se ubican sobre suelos pobres y con contenidos de materia orgánica que van de bajo a medio. Sobre los primeros 10 cm de profundidad el contenido de materia orgánica es similar entre los sistemas multiestrato, aguaje y tradicional, siendo el sistema tradicional con pastura natural contiene 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 del medio y la carga animal (PEZO y OSPINA, 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 (Cuadro 5), la suma de estos componentes muestra una alta diferencia significativa ($p < 0.05$) entre los sistemas evaluados, resultando el sistema con aguaje ($82.75 \text{ t C.ha}^{-1}$) la que se estima con mayor carbono bajo suelo, seguida del sistema tradicional con pastura natural ($78.91 \text{ t C.ha}^{-1}$).

El sistema multiestrato y con capirona (71.89 y $38.23 \text{ t C.ha}^{-1}$ respectivamente) presentan las menores reservas de carbono bajo suelo. Estos resultados superan a los reportados por 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 coinciden a las reportadas por ANDRADE (1999) y FAO (2002), que oscila entre 70 t C.ha^{-1} .

5.3. Carbono total de los sistemas

Los resultados finales de la estimación del carbono almacenado en los cuatro sistemas evaluados (Cuadro 6), señalan que, los resultados muestran que el sistema con aguaje ($92.85 \text{ t C.ha}^{-1}$) es el sistema con mayor reserva de carbono total. El sistema multiestrato ($88.56 \text{ t C.ha}^{-1}$) se ubica como

mejor segundo sistema en almacenar mayor reserva de carbono total, seguido del sistema tradicional con pasto natural que alcanzó 79.57 t C.ha⁻¹ y por último el sistema con capirona que registró un valor de 42.62 t C.ha⁻¹.

Las reservas totales de carbono encontrado en esta investigación con respecto al sistema tradicional con pasto natural distan de lo reportado por BERAÚN (2011), que logró determinar en pasturas naturales (53.39 t C.ha⁻¹). Cantidades significativas. Por otra parte, para los sistemas silvopastoriles los reportes hechos por ANDRADE (1999) y AMÉZQUITA *et al.* (2008) indican reservas con 68 y 72 t C.ha⁻¹ respectivamente, el cual mantienen las medias encontradas.

Con respecto al carbono total del sistema con aguaje, estas cantidades no distan de los encontrado por FREITAS *et al.* (2006) y MARQUEZ (2000) que reportan en aguajales densos una reserva total de 132 y 111.8 t C.ha⁻¹ respectivamente; mientras que con menores valores a los encontrados son reportados por BARBARÁN (1998) e IIAP (2002) CON 81.8 y 61.63 t C.ha⁻¹ respectivamente.

Los resultados indicados en el párrafo anterior demuestran que, los sistemas con aguaje superan en cuanto a las reservas de carbono total del sistema se deben a que los aguajales son los más grandes almacenes de carbono entre los ecosistemas terrestres amazónicos, llegando a almacenar hasta 200 t C.ha⁻¹ según SALAZAR (2007), en biomasa de las palmeras, principalmente del suelo, debido a las bajas tasas de descomposición de la materia orgánica.

5.4. Relación del carbono aéreo y radicular con el carbono orgánico del suelo

La relación existente entre el contenido de carbono aéreo y bajo suelo en los sistemas evaluados (Cuadro 7) muestran sus proporciones en porcentaje, de los cuales en los sistemas con multiestrato, con aguaje y con capirona los porcentajes del carbono bajo suelo van desde 81 a 89 % del contenido total de carbono, correspondiendo el complemento al carbono aéreo; mientras que para el sistema tradicional las reservas de carbono bajo suelo llegan a un 99.16 % del carbono total del sistema y solo un 0.84 % corresponde al carbono aéreo.

Estos resultados demuestran que la principal reserva de carbono en un sistema se encuentra bajo suelo, coincidiendo con SEGURA y KANNINIEN (2002), sobre la importancia de los sistemas agroforestales como sumideros de carbono en zonas tropicales sobre todo de las reservas de carbono bajo suelo, del cual existen pocos estudios del carbono subterráneo. En cuanto a las proporciones del sistema tradicional, 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).

En cuanto al carbono orgánico del suelo, existe una clara dependencia con el carbono radicular herbáceo, encontrando una ecuación predictora altamente significativa. Por otra parte, del mismo modo existe una clara dependencia del COS sobre el carbono total del sistema, del cual también

se muestra la ecuación predictora. Asimismo, el Cuadro 10 muestra la importancia del contenido del COS con respecto al carbono total del sistema, llegando a representar un 40 a un 46 % del carbono total para los sistemas multiestrato, con aguaje y con capirona, mientras que para el sistema tradicional representa un 54.85 % del carbono total del sistema.

Estos resultados demuestran que el COS es un componente importante del ciclo global del carbono, ocupando un 69.8 % del carbono orgánico de la biosfera, según FAO (2002), del cual no dista mucho de los resultados encontrados.

El COS tiene estrecha relación con la materia orgánica (JACKSON, 1994), y estas se encuentran en forma de residuos orgánicos pocos alterados de vegetales, animales y microorganismos en forma de humus y en formas muy condensadas de composición próxima al carbono elemental (MARTINEZ *et al.*, 2008).

VI. CONCLUSIONES

1. Se acepta la hipótesis, del cual se confirma que el sistema silvopastoril con aguaje (*Paspalum plicatulum* y *Mauritia flexuosa* L. f.) contiene mayor reserva de carbono total que los demás sistemas en estudio.
2. En cuanto al contenido de carbono aéreo el sistema silvopastoril multiestrato con capirona presenta mayor carbono almacenado (16.67 t C.ha⁻¹) que el sistema silvopastoril con aguaje (10.09 t C.ha⁻¹) y el sistema silvopastoril con capirona (4.38 t C.ha⁻¹) siendo el sistema tradicional con pastura natural (0.67 t C.ha⁻¹) con menor carbono aéreo.
3. El sistema silvopastoril con aguaje presenta mayor carbono radicular (37.94 t C.ha⁻¹) que los demás sistemas, seguido del sistema multiestrato y tradicional (35.73 y 35.34 t C.ha⁻¹ respectivamente) siendo el sistema con capirona (18.57 t C.ha⁻¹) con menor carbono radicular.
4. Los sistemas con mayor COS resultaron el sistema silvopastoril con aguaje (44.81 t C ha⁻¹) y el sistema tradicional (43.57 t C.ha⁻¹), seguido del sistema silvopastoril multiestrato (36.17 t C.ha⁻¹) y el sistema con capirona (19.66 t C.ha⁻¹).

5. El sistema silvopastoril con aguaje muestra las mayores reservas de carbono bajo suelo ($82.75 \text{ t C.ha}^{-1}$), siendo el sistema con capirona que presenta menor contenido ($38.23 \text{ t C.ha}^{-1}$).
6. El sistema silvopastoril presenta la mayor reserva de carbono total del sistema ($92.85 \text{ t C.ha}^{-1}$) que los demás sistemas en estudio, resultando el sistema multiestrato en segundo mayor reserva ($88.56 \text{ t C.ha}^{-1}$), seguido del sistema tradicional ($79.57 \text{ t C.ha}^{-1}$).
7. Es posible predecir el COS con el conocimiento del carbono radicular herbáceo; asimismo conociendo las reservas de COS es posible predecir el carbono total del sistema.
8. El contenido de COS es una fracción importante del contenido total de carbono del sistema y representa entre un 40 aun 54 % de la reserva total de carbono del sistema.
9. 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

1. Realizar mayores trabajos de investigación sobre carbono 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.
2. 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.
3. Valorar el sistema silvopastoril con aguaje como potencial sumidero de carbono principalmente del carbono bajo suelo.
4. Implementar políticas que favorezcan considerar el carbono bajo suelo dentro de los proyectos de carbono por su alto contenido en reserva.
5. Evaluar los valores económicos que representa la instalación, manejo y mantenimiento de los sistemas silvopastoriles.

ABSTRACT

The present research work took place in the pastures of the Animal Husbandry Faculty's Dairy Module, which is in the José Crespo y Castillo district (Aucayacu), Leoncio Prado province, Huánuco region, Peru. The objective was to evaluate the organic carbon stored in the soil of different silvopastoral systems, as well as in a traditional system, in the pastures of the Animal Husbandry Faculty's Dairy Module; looking to solve the following problem: Which of the silvopastoral systems stores the greatest amount of carbon? Four systems from the dairy module were selected: the first, with *B. decumbens*, *C. spruceanum*, y *E. fusca*, (multilayer silvopastoral system - SSP1); the second with *plicatulum*, y *M. flexuosa*, (silvopastoral system with aguaje - SSP2); the third with *B. decumbens*, *C. spruceanum*, (silvopastoral system with capírona - SSP3) and the fourth system with *Axonopus compresus* y *Paspalum conjugatum*, (traditional natural pasture system - ST). The methodology proposed by the GAMMA Group (IBRAHIM y PEZO, 2003), was used for the evaluation of the total stored carbon in each system. Significant differences ($p > 0.05$) were determined in the evaluation of the total stored carbon per system; the SSP2 had greater values than the other systems ($92.85 \pm 1.43 \text{ t.C.ha}^{-1}$). In conclusion, the scientific hypothesis was accepted, of which, it is confirmed that the silvopastoral system with aguaje (*Paspalum plicatulum* y *Mauritia flexuosa* L. f) has a greater reserve of total carbon

Keywords: Systems, silvopastoral, storage, carbon, organic, soil

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBRECHT, A., KANDJI, S. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry system. *Agriculture, Ecosystem and Environment*. 99(1-3):15-27.
- 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. 70 p.
- ANDRADE, H., IBRAHIM, M. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los Sistemas Silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas*, San José. 10(39-40):109-116.
- AMÉZQUITA, M., CASASOLA, F., RAMÍREZ, B., GIRALDO, H., GÓMEZ, H., LLANDERAL, T., VELÁSQUEZ, J., IBRAHIM, M. 2008. Stock and sequestration. In: *Carbon sequestration in tropical grassland ecosystem*. ISBN 978-90-8686-026-5. Wageningen academic publishers. The Netherland. Costa Rica. 52 p.
- ARANO, A. 2006. Los sistemas silvopastoriles. [En línea]: *Produccionanimal*, (https://www.produccionanimal-y-manejo_pasturas/producción_y_manejo_pasturas.htm), documentos, 20 Nov. 2007).

- 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. p. 54-55.
- 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 studyng root system. Berlin, GE, Springer Verlag, 179 p.
- CÁRDENAS. E. 1992. Introducción al establecimiento y producción de las pasturas tropicales. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Huánuco - Perú. 303 p.
- DA CRUZ, W. 2006. Manejo de pasturas tropicales, Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Huánuco Perú. 188 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma). 1999. Desafíos y oportunidades para el sector forestal en virtud del protocolo de Kyoto. Roma, Italia. 156 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma). 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la Tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos. Roma, Italia. 60 p.

- 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. Documento Técnico N° 29. Loreto, Perú, p. 42-43.
- GAYOSO J. 2006. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques nativos y plantaciones de Chile. IN Revista Forestal Iberoamericana. Universidad Austral de Chile. Volumen N° 1. Santiago de Chile.
- GOMEZ, L. 2000. Cambio Climático y desarrollo. San José, Costa Rica. PNUD-Yale School of Forestry and Environment Studies. 465 p.
- GUO, L., GIFFORD, R. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. In: *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. p. 269-302.
- HUAMANCAYO, G. 2012. Tesis para optar el título de Ingeniero Zootecnista: Carbono almacenado en tres sistemas ganaderos en el Distrito de José Crespo y Castillo, Aucayacu, Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Huánuco, Perú. 69 p.

- IIAP. 2002. Estudio de Línea Base de secuestro de carbono en la cuenca del río Nanay. Iquitos Perú. 7 p.
- IBRAHIM, M., PEZO, D. 2003. Monitoreo del secuestro de carbono en sistemas silvopastoriles. Agroforestería de las Américas. 10(39-40):109-116.
- IBRAHIM M. (2000). Sistemas forestales. [En línea]: Eaden, (<https://www.eaden.vitualcentre.org/es/ele/conferencia3/articulo1.htm>., documentos, 25 Ago. 2016).
- IPCC (Intergubernamental Panel on Climate Change). 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. México. s.p.
- IPCC (Intergubernamental Panel on Climate Change). 2001., Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, CH, Cambridge University Press.1000 p.
- IPCC (Intergubernamental Panel on Climate Change). 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). p. 472-478.
- JACKSON, M.L. 1994. Análisis químico de suelos (Traducido por J. Beltrán). Ediciones Omega, S. A. Barcelona, España. 662 p.

- LOPEZ, A., SCHLÖNVOIGT, A., IBRAHIM, M., KLEINN, C., KANNINEN, M. 2005. Cuantificación del carbono almacenado en el suelo de un sistema silvopastoril en la Atlántica de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*. 6(23):51-53.
- LOPEZ, U., VELDKAMP, E., KONING, G. 1999. Soil carbon stabilization in converted tropical pastures and forests depends on soil type. In: *Soil Science Society of América 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.
- MARTINEZ, E., FUENTES, P., ACEVEDO, E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *SciELO*. 8(1):68-96. [En línea]: SciELO, (<http://www.scielo.cl/pdf/rcsuelo/v8n1/art06.pdf>, artículo, 01 Jul. 2010).
- MARQUEZ, L. (ed.). 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso del suelo. Fundación Solar. Guatemala. 26 p.
- PEZO, D., OSPINA, S. 2009. Rol de los pastizales seminaturales en las fincas ganaderas de Muy Muy, Nicaragua percepciones de productores en investigadores. En: *Agroforestería de las Américas*. 47:7-11.
- PINEDA, L., ORTIZ, C., SÁNCHEZ, V. 2005. Los cafetales y su papel en la captura de carbono: un servicio ambiental aún no valorado en Veracruz. *Madera y Bosques, Veracruz*. 11(2):3-14.
- POLIDORO, B., WINOWIECKI, L., MAYNARD, J., MCDANIEL, P., MORRA, M. 2008. Suelos del valle y del piedemonte en Talamanca: un paisaje

dinámico para el almacenamiento de carbono. En: Agroforestería de las Américas. 46:40-44.

POWELL, M., DELANEY, M. 1998. Carbon sequestration and sustainable coffee in Guatemala. Final report. Arlington, US, Winrock International. 14 p.

RAO, I., RIPPSTEIN, G., ESCOBAR, G., RICAURTE, J. 2001. Producción de biomasa vegetal epígea 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. p. 124-145.

RIOS, J. 2007. Armazenamiento de carbono e valoração económica em sistemas de uso-da-terra comparados com o de cultivo da coca (*Erythroxylon coca* Lam.) no distrito de José Crespo e Castillo. Perú. Belém, (PA). 125 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. 31(3):217-227.

RÜGNITZ, M., CHACÓN, M., PORRO, R. 2009. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)/ Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). Lima, Perú. 79 p.

SALAZAR, A. 2007. Servicios ambientales de los aguajales y las oportunidades de un negocio global para Loreto. 2 - 3. [En línea]: Moderncms, (http://moderncms.ecosystemmarketplace.com/repository/moderncms_documents/AguajalesEspanol.1.1.1.1.pdf, documentos, 03 Oct. 2016).

- SEGURA, M., KANNINEN, M. 2002. Inventario para estimar carbono en ecosistemas forestales tropicales. Inventarios forestales en América Central. CATIE. (Serie Técnica, Manual Técnico N° 50). p. 202-212.
- 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. 114 p.
- SWIFT, R.S. 2001. Sequestration of carbon by soil. Soil Sci., Decomposition in terrestrial ecosystems, Studies in Ecology 5. Blackwell Scientific Publications, London. 166:858-871.
- TROUVE, C., MARIOTTI, A., SCHWARTZ, D., GUILLET, B. 1994. Soil organic carbon dynamics under eucalyptus and pinus plantations 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.

ANEXO

Cuadro 13. Cuadro de resultados de los diferentes sistemas evaluados.

Sistema	Código	Rep.	C. herbáceo	C. hojarasca	C. arbóreo
Multiestrato	SSP1	R ₁	2.14	6.79	8.23
Multiestrato	SSP1	R ₂	2.07	6.43	8.23
Multiestrato	SSP1	R ₃	2.07	5.77	8.23
Multiestrato	SSP1	R ₄	2.53	5.69	8.23
Multiestrato	SSP1	R ₅	1.98	6.72	8.23
Multiestrato	SSP1	R ₆	2.71	6.70	8.23
Multiestrato	SSP1	R ₇	2.68	5.50	8.23
Multiestrato	SSP1	R ₈	3.21	5.32	8.23
Multiestrato	SSP1	R ₉	2.05	5.43	8.23
Multiestrato	SSP1	R ₁₀	1.75	6.83	8.23
Aguaje	SSP2	R ₁	1.05	7.51	2.12
Aguaje	SSP2	R ₂	0.9	7.83	2.12
Aguaje	SSP2	R ₃	0.67	7.06	2.12
Aguaje	SSP2	R ₄	1.17	7.09	2.12
Aguaje	SSP2	R ₅	1.14	6.81	2.12
Aguaje	SSP2	R ₆	0.61	6.79	2.12
Aguaje	SSP2	R ₇	1.18	5.97	2.12
Aguaje	SSP2	R ₈	1.15	7.92	2.12
Aguaje	SSP2	R ₉	0.98	5.65	2.12
Aguaje	SSP2	R ₁₀	0.94	7.30	2.12
Capirona	SSP3	R ₁	1.02	1.27	1.98
Capirona	SSP3	R ₂	0.9	1.06	1.98
Capirona	SSP3	R ₃	1.00	1.45	1.98
Capirona	SSP3	R ₄	1.07	1.24	1.98
Capirona	SSP3	R ₅	0.91	1.17	1.98
Capirona	SSP3	R ₆	1.2	1.30	1.98
Capirona	SSP3	R ₇	1.16	1.74	1.98
Capirona	SSP3	R ₈	1.36	1.11	1.98
Capirona	SSP3	R ₉	1.04	1.39	1.98
Capirona	SSP3	R ₁₀	0.81	1.81	1.98
Natural	ST	R ₁	0.38	0.17	0
Natural	ST	R ₂	0.49	0.23	0
Natural	ST	R ₃	0.41	0.35	0
Natural	ST	R ₄	0.34	0.43	0
Natural	ST	R ₅	0.30	0.38	0
Natural	ST	R ₆	0.43	0.41	0
Natural	ST	R ₇	0.32	0.3	0
Natural	ST	R ₈	0.22	0.32	0
Natural	ST	R ₉	0.25	0.36	0
Natural	ST	R ₁₀	0.23	0.36	0

