

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA EN CONSERVACIÓN DE
SUELOS Y AGUA



CARBONO ALMACENADO EN TRES SISTEMAS CON *Elaeis guineensis* (PALMA ACEITERA), *Theobroma cacao* (CACAO) Y *Musa Sp.* (PLATANO), DISTRITO DE POLVORA - TOCACHE

Tesis

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Cesar Leopoldo Villavicencio Ramos'.

Para optar al título de:

INGENIERO EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA

PRESENTADO POR:

CESAR LEOPOLDO VILLAVICENCIO RAMOS

Tingo María – Perú

2025



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 006-2026-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 25 de Noviembre de 2025, a horas 10:00 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“CARBONO ALMACENADO EN TRES SISTEMAS CON *Elaeis guineensis* (PALMA ACEITERA), *Theobroma cacao* (CACAO) Y *Musa Sp.* (PLATANO), DISTRITO DE POLVORA-TOCACHE”

Presentado por el Bachiller: **VILLAVICENCIO RAMOS, CESAR LEOPOLDO** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO EN CONSERVACION DE SUELOS Y AGUA**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 26 de enero de 2026

Dr. JOSE DOLORES LEVANO CRISOSTOMO
PRESIDENTE

Ing. MSc. ANDY WILLIAMS VELA ZEVALLOS
MIEMBRO

Dr. SANDRO JUNIOR RUIZ CASTRE
MIEMBRO



Ing. MSc. JUAN PABLO RENGIFO TRIGOZO
ASESOR



UNAS

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 083 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
CARBONO ALMACENADO EN TRES SISTEMAS CON <i>Elaeis guineensis</i> (PALMA ACEITERA), <i>Theobroma cacao</i> (CACAO) Y <i>Musa Sp.</i> (PLATANO), DISTRITO DE POLVORA - TOCACHE	CESAR LEOPOLDO VILLAVICENCIO RAMOS	18 % Dieciocho	0 % Cero

Tingo María, 19 de marzo de 2026.


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO
ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA EN CONSERVACION DE
SUELOS Y AGUA



CARBONO ALMACENADO EN TRES SISTEMAS CON *Elaeis guineensis* (PALMA ACEITERA), *Theobroma cacao* L. (CACAO) Y *Musa Sp.* (PLATANO), DISTRITO DE POLVORA - TOCACHE

Autor : Cesar Leopoldo, VILLAVICENCIO RAMOS
Asesor (es) : Ing. MSc. Juan Pablo, RENGIFO TRIGOZO
Programa de Investigación : Ciencias Básicas
Grupo de investigación : Ciencias Básicas
Línea (S) de investigación : Ecología y Conservación de Suelos
Lugar de Ejecución : Fundo Julio Cesar - Pólvora.
Duración : 06 meses
Financiamiento : 5,4044.60 Soles
FEDU : No
PROPIO : Si
OTROS : No



Tingo María – Perú

2025

DEDICATORIA

A mi padre Custodio Villavicencio Rosales, por su fuerza y perseverancia para forjar mí, espíritu de investigador y no rendirme jamás en esta vida.

A mi madre Justina Ramos Campomanes, por acompañarme, por su apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida.

A mi hermana Marlitt por su amistad y por sus sabios consejos para lograr esta meta.

Finalmente, dedicar este trabajo de investigación a todos mis amigos y familiares que siempre creyeron en mí, y me dieron las armas oportunas para enfrentarme a la vida de la manera más sutil e inteligente.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la vida y la salud que me brinda durante mi vida profesional y social.

A mi familia por el apoyo incondicional en esta etapa de mi vida y mis estudios de pregrado.

A mi alma mater, Universidad Nacional Agraria de la Selva y a todos los profesores de la facultad de Recursos Naturales Renovables, por haber contribuido en mi formación personal y profesional.

Al ingeniero MSc. Juan Pablo Rengifo Trigozo, por sus consejos y ayuda incondicional durante esta investigación.

Y a todos aquellos amigos y familiares que de una y otra forma contribuyeron con el término del presente trabajo de investigación.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Marco teórico	3
2.1.1. El carbono	3
2.1.2. El ciclo del carbono.....	3
2.1.3. El dióxido de carbono (CO ₂)	4
2.1.4. Almacenamiento de carbono.....	5
2.1.5. Inventario de carbono.....	6
2.1.6. Monitoreo del almacenamiento de carbono	6
2.1.7. Componentes del almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles... 6	
2.2. Estado del arte.....	7
III. MATERIALES Y MÉTODOS	10
3.1. Lugar de ejecución.....	10
3.1.1. Ubicación política	10
3.1.2. Ubicación geográfica	10
3.1.3. Condiciones climáticas.....	10
3.1.4. Ecología.....	11
3.1.5. Suelo.....	11
3.1.6. Hidrografía	11
3.1.7. Topografía	11
3.1.8. Accesibilidad.....	11
3.1.9. Descripción de los sistemas de uso	11
3.2. Materiales y equipos	12
3.2.1. Materiales	12
3.2.2. Equipos.....	12
3.3. Generalidades de la investigación.....	12
3.3.1. Enfoque de investigación	12
3.3.2. Tipo de investigación	12
3.3.3. Nivel de la investigación	13
3.3.4. Diseño de la investigación	13
3.3.5. Población y muestra	13

	6
3.3.6. Variables en estudio	13
3.3.7. Operacionalización de variables	13
3.3.8. Técnicas de recolección de datos	14
3.3.9. Análisis e interpretación.....	15
3.4. Metodología	15
3.4.1. Estimar el carbono de la biomasa sobre el suelo (herbácea y hojarasca) en tres sistemas con <i>E. guineensis</i> (palma aceitera), <i>Theobroma cacao</i> (cacao) y <i>Musa sp.</i> (plátano)	15
3.4.2. Estimar el carbono en la biomasa radicular y carbono orgánico del suelo en tres sistemas con <i>E. guineensis</i> (palma aceitera), <i>Theobroma cacao</i> (cacao) y <i>Musa sp.</i> (plátano)	18
3.4.3. Estimar el almacenamiento total del suelo en los tres sistemas con <i>E. guineensis</i> (palma aceitera), <i>Theobroma cacao</i> (cacao) y <i>Musa sp.</i> (plátano)	20
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1. Estimar el carbono de la biomasa sobre el suelo (herbácea y hojarasca) en tres sistemas con <i>E. guineensis</i> (palma aceitera), <i>Theobroma cacao</i> (cacao) y <i>Musa sp.</i> (plátano).....	21
4.1.1. Carbono orgánico en la biomasa herbácea.....	21
4.1.2. Carbono orgánico en la biomasa de la hojarasca	22
4.2. Estimar el carbono en la biomasa radicular y carbono orgánico del suelo en tres sistemas con <i>E. guineensis</i> (palma aceitera), <i>Theobroma cacao</i> (cacao) y <i>Musa sp.</i> (plátano).....	23
4.2.1. Carbono orgánico en el suelo	23
4.2.2. Carbono orgánico en la biomasa radicular.....	27
4.3. Estimar el almacenamiento total del suelo en los tres sistemas con <i>E. guineensis</i> (palma aceitera), <i>Theobroma cacao</i> (cacao) y <i>Musa sp.</i> (plátano).....	29
V. CONCLUSIONES	31
VI. PROPEUSTA A FUTURO	32
VII. REFERENCIAS.....	33
ANEXOS	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Coordenadas UTM de los diferentes sistemas de uso del suelo.....	10
2. Variables en estudio.....	14
3. ANVA de almacenamiento de carbono orgánico en la biomasa Herbácea en diferentes sistemas de uso.....	21
4. Carbono orgánico en la biomasa herbácea, en tres sistemas de uso (t/ha), (promedio \pm error estándar)	22
5. ANVA del almacenamiento de carbono orgánico en la biomasa de la hojarasca en tres sistemas de uso.....	23
6. Carbono orgánico en la biomasa de la hojarasca, en diferentes sistemas de uso (t/ha), (promedio \pm error estándar)	23
7. ANVA del carbono orgánico almacenado en el suelo en tres sistemas de uso.	25
8. Carbono orgánico almacenado en el suelo en diferentes sistemas de uso (t/ha), (promedio \pm error estándar)	26
9. ANVA del almacenamiento de carbono orgánico almacenado en la Biomasa radicular en tres sistemas de uso.....	28
10. Carbono orgánico almacenado en la biomasa radicular en tres sistemas de uso (t/ha), (promedio \pm error estándar)	29
11. Carbono orgánico total en diferentes sistemas del suelo.....	31
12. Colecta de datos biomasa de cacao.....	38
13. Colecta de datos biomasa palma aceitera	38
14. Colecta de datos biomasa de plátano	38
15. Colecta de datos biomasa raíz de cacao.....	39
16. Colecta de datos biomasa raíz de palma aceitera.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Metodología de muestreo (ICRAF).....	16
2. Carbono orgánico almacenado en la biomasa herbácea en tres sistemas de uso del suelo (t/ha).....	22
3. Carbono orgánico almacenado en la biomasa de la hojarasca, en tres sistemas de uso (t/ha).....	24
4. Carbono almacenado en tres sistemas de uso del suelo (t/ha).....	28
5. Carbono orgánico en la biomasa radicular en tres sistemas de uso del suelo (t/ha).....	29
6. Sistema de uso palma aceitera.....	40
7. Sistema de uso plátano.....	40
8. Sistema de uso cacao.....	41
9. Cuadrado muestreador sistema de uso palma aceitera.....	41
10. Transepto con hilo rafia sistema de uso palma aceitera.....	42
11. Cuadrado muestreador sistema de uso palma aceitera para biomasa.....	42
12. Muestreo de suelo a diferentes profundidades palma aceitera.....	43
13. Muestreo para biomasa sistema de uso cacao.....	43
14. Peso de muestra de biomasa hojarasca en laboratorio.....	44
15. Secado de muestra de biomasa en estufa del laboratorio.....	44
16. Peso de muestras de biomasa radicular en laboratorio.....	45

RESUMEN

El estudio cuantificó y comparó el almacenamiento de carbono en tres sistemas de uso del suelo dominantes en Pólvora–Tocache (Amazonía peruana): *Elaeis guineensis* (palma aceitera), *Theobroma cacao* (cacao) y *Musa* sp. (plátano). Se evaluaron cuatro compartimentos: biomasa herbácea, hojarasca, biomasa radicular y carbono orgánico del suelo (0–30 cm, estratos 0–10, 10–20 y 20–30 cm). El diseño fue no experimental y comparativo. Para el suelo, se aplicó ANOVA de dos vías (Sistema \times Profundidad) y pruebas de Tukey; para la biomasa, contrastes entre sistemas según procedió. Los resultados muestran que el carbono del suelo difiere significativamente entre sistemas y decrece con la profundidad: palma 22,59 t C·ha⁻¹, cacao 18,91 t C·ha⁻¹ y plátano 10,96 t C·ha⁻¹ (0–30 cm). La integración por compartimentos confirma el patrón comparativo del almacenamiento total de carbono (t C·ha⁻¹): palma 39,39 > cacao 32,88 > plátano 30,10. Estos hallazgos evidencian que el tipo de sistema condiciona la magnitud del stock de carbono, con la palma mostrando mayor capacidad de acumulación bajo las condiciones locales, y proporcionan una línea de base útil para monitoreo, reporte y verificación (MRV) y para la toma de decisiones en manejo de suelos y mitigación del cambio climático.

Palabras clave: carbono orgánico del suelo; biomasa radicular; hojarasca; palma aceitera; cacao; plátano; Amazonía peruana; ANOVA; secuestro de carbono.

ABSTRACT

This study quantified and compared carbon storage in three dominant land-use systems in Pólvara–Tocache (Peruvian Amazon): *Elaeis guineensis* (oil palm), *Theobroma cacao* (cacao), and *Musa* sp. (plantain). Four compartments were assessed—herbaceous biomass, litter, root biomass, and soil organic carbon (SOC)—with SOC integrated over 0–30 cm using stratified layers (0–10, 10–20, 20–30 cm) and bulk density. The design was non-experimental, cross-sectional, and comparative. For SOC, a two-way ANOVA (System × Depth) followed by Tukey’s HSD tested differences among systems and depths; biomass compartments were compared among systems as appropriate. SOC (0–30 cm) differed significantly among systems and decreased with depth: oil palm 22.59 t C ha⁻¹, cacao 18.91 t C ha⁻¹, and plantain 10.96 t C ha⁻¹. The system-level total carbon stock (soil + biomass) confirmed the comparative pattern: oil palm 39.39 > cacao 32.88 > plantain 30.10 t C ha⁻¹. These findings demonstrate that land-use system strongly conditions carbon storage magnitude, with oil palm exhibiting the highest capacity under the local edaphoclimatic context. The results provide a locally grounded baseline for Monitoring, Reporting, and Verification (MRV), and support decision-making in soil management and climate-change mitigation strategies in Amazonian agroecosystems.

Keywords: soil organic carbon; root biomass; litter; oil palm; cacao; plantain; Peruvian Amazon; ANOVA; carbon sequestration.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático exige cuantificar con rigor los sumideros de carbono en agroecosistemas tropicales. En la Amazonía peruana, el distrito de Pólvora (Tocache) alberga sistemas productivos dominantes—*Elaeis guineensis* (palma aceitera), *Theobroma cacao* (cacao) y *Musa sp.* (plátano)—cuyo potencial de almacenamiento de carbono permanece poco documentado. La información local comparativa y estratificada por compartimentos (biomasa herbácea y hojarasca, biomasa radicular y carbono orgánico del suelo 0–30 cm) es insuficiente para sustentar decisiones de manejo y esquemas de mitigación. Ante la ausencia de datos cuantitativos y comparables del almacenamiento total de carbono en dichos sistemas bajo las condiciones edáficas y climáticas en el distrito de Pólvora. Generándose ante ello la siguiente interrogante ¿Cuánto carbono almacenan, y en qué magnitud difieren entre sí, los sistemas con palma, cacao y plátano cuando se integra suelo (0–30 cm) y biomasa (herbácea, hojarasca y raíces)?

La Justificación científica (evidencia local y reducción de incertidumbre), ambiental (apoyo a estrategias de mitigación) y de gestión (insumos para monitoreo, reporte y verificación—MRV—y para políticas de uso sostenible del suelo). El alcance del estudio no experimental, transversal y comparativo, realizado durante seis meses en el distrito de Pólvora–Tocache, con evaluación por compartimentos y profundidades edáficas hasta 30 cm; los resultados se interpretan para las condiciones locales del sitio de estudio. Ante esto se plantean la Hipótesis: el almacenamiento total de carbono difiere entre sistemas y sigue el patrón palma aceitera, cacao y plátano, tanto en el suelo (0–30 cm) como en la suma integrada de compartimentos. Con ello, la investigación contribuye a establecer una línea de base local para la evaluación y comparación de sistemas de uso del suelo con fines de conservación y mitigación. Respecto a este contexto se plantean los siguientes objetivos:

1.1. Objetivo general

Estimar el carbono almacenado en tres sistemas con *Elaeis guineensis* (palma aceitera), *Theobroma cacao* L. (cacao) y *Musa Sp.* (plátano), distrito de Pólvora - Tocache.

1.2. Objetivos específicos

- Estimar el carbono de la biomasa sobre el suelo (herbáceo y hojarasca) en tres sistemas con *Elaeis guineensis* (palma aceitera), *Theobroma cacao* (cacao) y *Musa Sp.* (plátano).

- Estimar el carbono almacenado en la biomasa radicular y carbono orgánico del suelo en tres sistemas con *Elaeis guineensis* (palma aceitera), con *Theobroma cacao* (cacao) y con *Musa Sp.* (plátano).
- Estimar el almacenamiento total de carbono del suelo en los tres sistemas con *Elaeis guineensis* (palma aceitera), con *Theobroma cacao* (cacao) y con *Musa Sp.* (plátano).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. El carbono (C)

Es un elemento clave de los componentes orgánicos, circula entre océanos, atmósfera y suelo, que actúan como reservorios. Este ciclo es crucial para la sostenibilidad agrícola, pues influye en los parámetros del suelo que determinan el rendimiento de los cultivos (Martínez et al., 2008).

El COS lo encontramos en forma de residuos orgánicos poco alterados de origen vegetal, animal y microbiano, así como en humus y compuestos condensados similares al C elemental (Jackson, 1964; citado por Martínez et al., 2008).

2.1.2. El ciclo del carbono

Inicia con la fijación del CO₂ atmosférico por la fotosíntesis de plantas y microorganismos, que convierten el CO₂ y el agua en carbohidratos, liberando oxígeno. Parte de estos carbohidratos son utilizados directamente por las plantas para obtener energía, liberando CO₂ mediante sus hojas y raíces. Otra parte lo consumen animales, que también liberan CO₂ al respirar. Al morir, plantas y animales son degradados por microorganismos del suelo, oxidando el C de sus tejidos y devolviéndolo a la atmósfera.

El C es fundamental para la vida en el planeta, y su ciclo es esencial para el desarrollo de todos los organismos (Alegre et al., 2001).

2.1.2.1. El papel de los suelos en el ciclo del carbono

El suelo representa el mayor reservorio de carbono que interactúa con la atmósfera, con un COS estimado en 1500 Pg C a 1 m de profundidad y aproximadamente 2456 Pg a 2 m de profundidad (Espinoza, 2005). Si bien el C inorgánico almacena alrededor de 1700 Pg, este se secuestra en formas más estables, como el carbonato de calcio (ÁVILA et al., 2001). La vegetación (650 Pg) y la atmósfera (750 Pg) retienen considerablemente menos carbono que los suelos. Los flujos entre el COS y la atmósfera son significativos, actuando como sumideros de carbono o fuentes de CO₂.

Históricamente, la agricultura fue la causa primordial del aumento de CO₂ atmosférico. Sin embargo, actualmente, la combustión de combustibles fósiles por la industria y el transporte son los mayores contribuyentes (6.5 Pg/año). La deforestación tropical genera emisiones de carbono estimadas en 1.5 Pg/año, pero simultáneamente, los ecosistemas

terrestres acumulan entre 1.8 y 2 Pg/año, representando el "carbono faltante" del ciclo, un sumidero posiblemente ubicado en el hemisferio norte (Arévalo *et al.*, 2003).

El suelo representa el mayor reservorio de carbono que interactúa con la atmósfera, con un carbono orgánico del suelo estimado en 1500 Pg C a 1 m de profundidad y aproximadamente 2456 Pg a 2 m de profundidad (Espinoza, 2005). Si bien el C inorgánico almacena alrededor de 1700 Pg, este se secuestra en formas más estables, como el carbonato de calcio (ÁVILA *et al.*, 2001). La vegetación (650 Pg) y la atmósfera (750 Pg) acumulan considerablemente menos carbono que los suelos. Los flujos entre el COS y la atmósfera son significativos, actuando como sumideros de carbono o fuentes de CO₂.

Gómez (2000) afirma que el cambio de la MO depende de la vegetación, el aporte de residuos, estructura vegetal, los componentes climáticos (temperatura y humedad) y los parámetros de la tierra (textura, contenido de arcilla y mineralogía, acidez).

2.1.3. El dióxido de carbono (CO₂)

El CO₂ es el primordial gas de efecto invernadero (GEI) y contribuyente al calentamiento global. Su concentración aumentó de 280 ppm en 1750 a 360 ppm en 2000, con el uso de combustibles fósiles representando el 80-85 % de las emisiones (Gómez-Echeverri, 2000).

El aumento de emisiones de GEI, también denominados gases que alteran el clima (Venegas, 2003), exacerba el grave problema ecológico del cambio climático global.

Además de reducir las emisiones, mitigar los problemas del CO₂ implica secuestrarlo: capturarlo y almacenarlo en la biomasa, la tierra y océanos. El secuestro de biomasa ocurre a través de la fotosíntesis, mientras que el secuestro en el suelo se da por la meteorización y mineralización de la MO. Los bosques son el primordial sumidero de CO₂, aunque su capacidad de absorción y retención depende de elementos como la temperatura, la precipitación, la densidad de biomasa, el tipo de suelo, la pendiente, la altitud, la topografía, las tasas de crecimiento y la edad (Albrecht-Kandji, 2003).

A nivel mundial, los bosques retienen y almacenan más C que cualquier otro ecosistema terrestre, representando el 90 % del flujo anual de C entre la atmósfera y la superficie terrestre. Los bosques retienen una proporción significativa de carbono tanto en la vegetación como en el suelo, desempeñando un papel crucial en el intercambio de CO₂ entre la biosfera y la atmósfera (Pineda, Ortiz y Sánchez, 2005). Estos ecosistemas funcionan como sumideros

cuando retienen CO₂ y lo convierten en carbohidratos por la fotosíntesis, y como fuentes cuando el CO₂ se libera a la atmósfera mediante la combustión.

El C es un compuesto dinámico primordial para la biosfera, con un ciclo de unos 10 000 años. Este ciclo implica la fijación de carbono por los árboles durante su crecimiento y su posterior liberación a la atmósfera tras su muerte. Las tierras forestales son los mayores reservorios de C en los ecosistemas terrestres, almacenando cuatro veces más C que la vegetación, lo que los convierte en un foco importante para la búsqueda de mecanismos de almacenamiento de carbono y posibles servicios ambientales. El C del suelo se encuentra en la hojarasca, los sistemas radiculares vivos y muertos, y el "carbono negro". Aunque la mineralización de las moléculas orgánicas ocurre en promedio en cuatro años, algunas fracciones ligadas a óxidos y arcillas persisten de cientos a miles de años. Es crucial comprender las etapas clave del suelo y su relación con componentes como la temperatura, la humedad y los nutrientes, especialmente el nitrógeno.

2.1.4. Almacenamiento de carbono

Gayoso (2006) indica que la acumulación de C por unidad de área varía considerablemente según el tipo y la condición del bosque. Los bosques perennifolios maduros son los que más almacenan, con un total de 606,80 Mg C.ha⁻¹, distribuidos de la siguiente manera: 283,75 Mg C.ha⁻¹ en biomasa aérea; 79,92 Mg C.ha⁻¹ en raíces (diámetro > 5 mm); 2,79 Mg C.ha⁻¹ en vegetación del sotobosque; 53,56 Mg C.ha⁻¹ en necromasa; 5,87 Mg C.ha⁻¹ en hojarasca; y 180,91 Mg C.ha⁻¹ en los 30 cm superiores del suelo. El almacenamiento de C en el suelo supera sistemáticamente los 140 Mg C.ha⁻¹ en los 30 cm superiores, ya que los cambios por debajo de esta profundidad se consideran insignificantes. Segura y Kanninen (2002) señalan que los sistemas forestales y agroforestales (SAF) actúan como sumideros de CO₂, acumulando un promedio de 95 Mg C.ha⁻¹ en zonas tropicales, lo que suma un total de 2100 millones de Mg C al año en estas regiones.

2.1.5. Inventarios de carbono

Ofrecen una visión general de las reservas actuales de C (biomasa, hojarasca, raíces y suelo) en términos de proporción. Este método permitiría comparaciones entre sitios, sistemas y períodos (Rügnitz *et al.*, 2009) y depende de consideraciones de costo-beneficio.

2.1.6. Monitoreo del almacenamiento de carbono

Las parcelas de muestreo permanentes (PSP) son una herramienta estadística esencial para el monitoreo de la acumulación de C en ecosistemas forestales, ya que proporcionan datos realistas y verificables sobre el crecimiento de la vegetación para evaluar

los cambios temporales (Rügnitz et al., 2009). Los cambios temporales en la retención de C dentro de las PSP representan flujos de carbono.

Según Rügnitz et al. (2009), la forma, el tamaño y el número de las PSP son aspectos clave del monitoreo. La forma de la parcela debe coincidir con la distribución espacial de los árboles: parcelas lineales para plantaciones lineales, circulares para árboles distribuidos aleatoriamente y rectangulares para árboles distribuidos sistemáticamente.

2.1.7. Componentes del almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles

Los sistemas forestales y agroforestales almacenan C en cuatro compuestos primordiales: biomasa aérea, hojarasca, biomasa subterránea (raíces) y COS (Snowdon *et al.*, 2001).

La biomasa aérea se compone fundamentalmente de biomasa leñosa y biomasa herbácea, incluyendo pastos, leguminosas, hierbas, plantas jóvenes y otros.

En los sistemas silvopastoriles, la vegetación herbácea es un componente principal. El muestreo debe capturar la variabilidad de la biomasa herbácea mediante la ubicación de puntos de muestreo a distintas distancias de los árboles, utilizando marcos de muestreo (50 x 50 cm) para su cuantificación (López *et al.*, 1999).

La hojarasca, compuesta por restos orgánicos (hojas, ramas, frutos y semillas) sobre la tierra, se cuantifica de forma parecida a la vegetación herbácea. Los sistemas radiculares, que representan la biomasa subterránea, son otro sumidero de C, representando entre el 10 % y el 40 % de la biomasa total en proyectos de secuestro de carbono. El método de muestreo central, que consiste en tomar muestras de suelo con una barrena de volumen conocido, separa las raíces del suelo para la valoración de la biomasa específica de cada especie. La estratificación del suelo por profundidad es crucial, ya que la densidad de raíces finas suele ser mayor en los horizontes superficiales.

El cálculo del almacenamiento de carbono se basa en los inventarios de biomasa del ecosistema y la fracción de C. En árboles, se suele usar un valor predeterminado de 0.5 para la fracción de C (López, 1999), mientras que en sistemas silvopastoriles, esta fracción en los troncos varía entre 0,42 y 0,47 (Andrade, 1999).

El COS también es significativo, ya que este constituye un importante sumidero de C. Sin embargo, los proyectos de C suelen pasar por alto este componente porque las negociaciones actuales sobre carbono no lo incluyen, ya que es menos visible que la biomasa aérea. Los cambios en el COS deben medirse en todo el emplazamiento del proyecto a una profundidad de 30 cm, ya que el cambio de uso del suelo afecta principalmente a las capas superiores (IPCC, 1996).

2.2. Estado del Arte

La retención de C en el suelo, como señalan Ingram y Fernández (1999), FAO (2000) y Acuña y Oviedo (2001), se ve influenciado por la estructura, textura, profundidad, DA y aireación del suelo. El potencial máximo de C está limitado por la producción de biomasa, los efectos climáticos directos sobre las etapas edáficas y los efectos climáticos indirectos sobre la producción de biomasa. El almacenamiento actual de C se ve reducido por la erosión, la lixiviación y las prácticas de gestión de residuos de cultivos que limitan la entrada de C.

Quiñe (2009) cuantificó la biomasa y el almacenamiento de C en sistemas agroforestales de *Coffea arabica* a dos altitudes en la región de San Martín. Este estudio tuvo como objetivo apoyar proyectos de comercialización de créditos de C mediante la promoción de la agroforestería de café como sumidero de GEI y motor de desarrollo para los productores. Se realizó un análisis descriptivo y comparativo del almacenamiento de C en sistemas agroforestales de café en la Estación Experimental - ICT (cerca de Tarapoto) y el Fundo Sananguillo (cerca de Lamas).

Los resultados indicaron que en el Fundo Juan Benito, el carbono total almacenado fue de 119.37 t/ha, con 74.76 t/ha en el suelo, seguido por árboles vivos (32.85 t/ha), árboles caídos muertos (5.32 t/ha), hojarasca (4.87 t/ha) y arbustos-herbáceas (1.89 t/ha). En el Fundo Sananguillo, el C retenido fue de 165.81 t/ha, superando al Fundo Juan Benito, con 114.99 t/ha en el suelo, seguido por árboles vivos (27.83 t/ha), árboles caídos muertos (17.65 t/ha), hojarasca (2.98 t/ha) y arbustos-herbáceas (2.35 t/ha).

Mariño (2013) estimó la retención de C en sistemas de cultivo de arroz en Tingo María, bajo riego (41.20 tC/ha) y secano (57.40 tC/ha).

Hidalgo (2014) estimó la retención de C en la biomasa de plantaciones de maíz en el distrito José Crespo y Castillo - Aucayacu, relacionándolo con parámetros meteorológicos y etapas de crecimiento del maíz. El C total en la plantación de maíz fue de 35.66 t C ha⁻¹, con 0.86 t C ha⁻¹ (2.41%) en la biomasa y 34.80 t C ha⁻¹ (97.59%) en el suelo. El modelo Gompit indicó que la retención de C en 240 plantas de maíz es de aproximadamente 0.85%, y el 92.85% de la variación en la acumulación de C se explica por las variables independientes analizadas.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El estudio fue realizado en los predios del señor Shem Espinoza Caico con un área de terreno de 2.5 ha con cultivo de cacao de 11 años de edad, en producción y con distanciamiento de 2.90 m x 2.90 m, Custodio Villavicencio Rosales con un área de terreno de 4 ha con cultivos de palma aceitera de 10 años de edad y con distanciamiento de 9 m x 9 m y Andrés Mendieta Martínez con un área de terreno de 8 ha, con cultivos de cacao y plátano 1 ha de 1 año de edad en producción y con distanciamiento de 3 m x 3 m, ubicada en el caserío Nuevo Horizonte.

3.1.1. Ubicación política

Políticamente se desarrolló en el caserío Nuevo Horizonte, distrito de Pólvora, Provincia de Tocache, departamento y región San Martín.

3.1.2. Ubicación geográfica

El caserío Nuevo Horizonte, se encuentra ubicada a 8°6'30.96" de Latitud Sur con respecto a la Línea Ecuatorial, 76°37'0.12" de Longitud Oeste con respecto al meridiano de Greenwich; asimismo la ubicación de los sistemas de uso en coordenadas UTM del empalme 18 J se encuentra en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas UTM de los diferentes sistemas de uso del suelo

Sistemas de uso del suelo	Coordenadas UTM		Altitud (m.s.n.m.)
	E	N	
Palmera aceitera	320785	9101288	502
Cacao	318592	9100216	523
Plátano	322272	9105871	482

3.1.3. Condiciones climáticas

El clima es tropical húmedo subtropical, con una precipitación anual promedio de 3000 mm. Las lluvias torrenciales son frecuentes entre octubre y abril, mientras que de mayo a septiembre predominan las altas temperaturas y la escasez de lluvias. La humedad relativa es alta, con un promedio del 90%. La temperatura media es de 24 °C, con una máxima de 32 °C y una mínima de 19 °C (Estación Meteorológica de Tocache, 2018).

3.1.4. Ecología

De acuerdo con el mapa ecológico y la clasificación de las zonas de vida, están ubicadas en la zona de vida de bosque húmedo-premontano tropical (bh-PT) transición a bosque húmedo Tropical (bh-T) (Holdridge, 1987).

3.1.5. Suelo

Los suelos son de clase textural franco arcilloso a franco arenoso, bajo en fertilidad de reacción moderadamente ácido. También presenta una fisiografía de terraza coluvio aluvial, con pendiente de 4%.

3.1.6. Hidrografía

El distrito de Pólvora cuenta con una red fluvial diversa, destacando los ríos Cañuto y Challuayacu, tributarios del importante río Huallaga. Este último, navegable en su totalidad por embarcaciones pequeñas, facilita la interconexión con otras áreas.

3.1.7. Topografía

La topografía del distrito es mayormente plana, salpicada de elevaciones de pendiente moderada, típicas de la selva. Sobresalen elevaciones como el cerro Copal, el cerro Belaúnde, la Cordillera Azul al este, y una sección de la Cordillera de los Andes al oeste.

3.1.8. Accesibilidad

Se accede por vía terrestre por la carretera Fernando Belaúnde Terry, aproximadamente a 10 km desde la ciudad de Tocache hacia Juanjui.

3.1.9. Descripción de los sistemas de uso

El sistema de uso *E. guineensis* (palmera aceitera) cuenta con doce años promedio, localizada a una altitud de 520 msnm y presenta un distanciamiento de 9 m × 9 m. En sus contornos se encuentra las especies tales como *Trema micrantha* (L.) Blume (atadijo), *Parkia multijuga* (pashaco), *Aniba perutilis* (moena negra), *Ocotea olivácea* (moena amarilla), *Miconia barbeyana* (rifari) y *Bursera graveolens* (incienso).

El sistema de empleo de tierra de *Theobroma cacao* (cacao, variedad CCN 51) cuenta con siete años promedio, localizada a una altitud de 523 msnm y presenta un distanciamiento de 3 m × 3 m. En sus contornos se encuentra una asociación de plantas con *Inga edulis* (guaba), plantadas cada 30 m, complementadas con árboles de la especie *Guazuma crinita* (bolaina blanca), con un distanciamiento de 4 m, y *Calycophyllum spruceanum* (capirona), todos establecidos en el lindero como cortinas rompeviento.

El cultivo de *Musa* sp. se encuentra a una altitud de 482 msnm, con aproximadamente dieciseis meses de establecido, presenta una pendiente del 10% y está cubierto por especies herbáceas.

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales

Mandil, lapiceros, lapicero marcador con tinta indeleble, Tablero de apuntes, cuaderno de apuntes y papel periódico, hilo rafia color (verde, negro y blanco) balanza de

romanilla, wincha (50 m), bolsas plásticas (10 x 20), jalones de 50 cm, baldes de plástico, cuadrado de madera de 1 m², costales de yute, Machetes, pala recta, cilindro de aluminio para muestreo de densidad aparente, tijera de podar y cuchillo de campo, y material vegetativo, Biomasa (hojarasca, restos de madera, raíces de los sistemas de *Elaeis guineensis* (palma aceitera), *Theobroma cacao* L. (cacao) y *Musa Sp.* (plátano).

3.2.2. Equipos

GPS (Sistema de Posicionamiento Global) marca Garmin, cámara digital marca Lumix, flexómetro (25 m), balanza digital, horno secador.

3.3. Generalidades de la investigación

3.3.1. Enfoque de investigación

Fue cuantitativo, ya que buscó medir y determinar numéricamente la cantidad de COS, en la biomasa de raíces, hojarasca y herbáceas, utilizando datos recolectados de campo y analizados en laboratorio (Supo, 2016).

3.3.2. Tipo de investigación

Fue de tipo aplicada, porque utilizó conocimientos científicos para resolver un problema práctico: cuantificar el carbono del suelo en parcelas de un bosque reservado, con implicancias en la conservación y manejo de ecosistemas (Sánchez y Reyes, 2006).

3.3.3. Nivel de la investigación

De acuerdo con la clasificación de Supo (2016), esta investigación fue de tipo descriptivo, comparativo, porque se enfocó en la explicación de un fenómeno, como es el uso de los sistemas de uso tienen un efecto sobre la cuantificación del C en el suelo.

3.3.4. Diseño de la investigación

Según Hernández Sampieri et al. (2014), es no experimental, transversal y comparativo. Es no experimental porque las variables no se manipularon, se observaron y analizaron en su contexto natural. Es transversal ya que la recolección información se realizó en un único momento, y comparativo porque se contrastaron los valores de C entre los diferentes sistemas de uso.

3.3.5. Población y muestra

La población es toda el área de los sistemas de empleo de tierra (palmera aceitera, cacao y plátano). La muestra fueron los tres sistemas de uso del suelo, cada una de 1 ha.

3.3.6. Variables en estudio

Fueron consideradas las siguientes variables dependientes e independientes:

a. Variable independiente (Y) = Sistemas de uso del suelo

Indicadores Y = Tipos de sistemas del suelo

Y1 = SU *Elaeis guineensis*. L “palma aceitera”

Y2 = SU *Theobroma cacao* L. “cacao”

Y3 = SU *Musa sp.* “platano”

b. Variable dependiente (X) = Propiedades físicas y químicas del suelo

X1 = físicas

X2 = químicas

Indicadores X = Carbono almacenado en el suelo

X1 = Suelo (% o g/kg)

X2 = Hojarasca (g/m² o mg/ha)

X3 = Herbáceas (g/m² o mg/ha)

X4 = Raíces (g/m² o mg/ha)

3.3.7. Operacionalización de variables

Las variables evaluadas en la investigación estuvieron desglosadas de la siguiente manera:

Tabla 2. Variables en estudio.

Variable	Dimensiones	Indicadores	Índices	
Variable independiente	Sistemas de uso del suelo	Tipos de sistemas	<i>Elaeis guineensis</i> L. “palma aceitera”	ha
			<i>Theobroma cacao</i> L “cacao”	ha
			<i>Musa sp.</i> L. “platano”	ha
Variable dependiente	Propiedades físicas y químicas	Físicas	Textura	Granulometría
			Densidad Aparente	g/cm ³
			MO	%
			N	%
Variable interviniente	Indicadores de Variables	Carbono almacenado del suelo	Carbono del suelo Carbono de la hojarasca Carbono en la biomasa herbácea Carbono de las Raíces	Kg (m ²)

3.3.8. Técnicas de recolección de datos

La técnica empleada fue la observación directa, dado que se realizó el registro de variables en campo y laboratorio sin manipular los fenómenos, mediante el levantamiento sistemático de información en los sistemas de uso del suelo.

El instrumento de recolección fue una ficha de campo y laboratorio, diseñada para anotar los datos correspondientes a cada componente evaluado (suelo, raíces, biomasa herbáceas y hojarasca). Esta ficha tuvo casillas para registrar:

Identificación de los sistemas de uso del suelo.

Profundidad de muestreo (para suelo y raíces).

Peso fresco y seco de muestras (raíces, herbáceas, hojarasca).

Datos de laboratorio para % de carbono.

Observaciones generales.

3.3.9. Análisis e interpretación de resultados

El estudio fue realizado considerando el carácter explicativo y comparativo de la investigación. Para las variables asociadas a la biomasa aérea (herbácea y hojarasca), se aplicó un ANOVA de un factor (Sistema de uso del suelo: palma aceitera, cacao y plátano). Para el C del suelo y de la biomasa radicular, se utilizó un ANOVA de dos vías, incorporando como factores fijos al Sistema de uso del suelo y la Profundidad de muestreo (0–10, 10–20 y 20–30 cm), así como su interacción.

Previo a los análisis se verificó los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro–Wilk) y homogeneidad de varianzas (prueba de Levene). En los casos en que se incumplieron, se aplicaron pruebas no paramétricas alternativas: Kruskal–Wallis para comparaciones de un factor y Dunn con corrección de FDR para contrastes múltiples.

Cuando los efectos principales resultaron significativos ($p < 0,05$), se realizaron comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey HSD para identificar diferencias entre sistemas de uso y profundidades. Se reportaron los valores de **p**, los intervalos de confianza al 95%, así como medidas de tamaño de efecto (η^2 parcial) con el fin de cuantificar la magnitud de las diferencias observadas.

El análisis se efectuó en un diseño no experimental, transversal y comparativo, empleando como unidades experimentales las subparcelas dentro de cada sistema. Se reconoce como limitación la ausencia de réplicas independientes a nivel de finca, lo que restringe la generalización de los resultados a los sitios estudiados.

3.4. Metodología

3.4.1. Estimar el carbono de la biomasa sobre el suelo (herbácea y hojarasca) en tres sistemas con *E. guineensis* (palma aceitera), *Theobroma cacao* (cacao) y *Musa Sp.* (plátano)

La metodología desarrollada para la estimación de carbono en tres sistemas con *E. guineensis* (palma aceitera), *Theobroma cacao* (cacao) y *Musa Sp.* (plátano) es una mixtura

de la propuesta por el Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) (RÜGNITZ *et al.*, 2009), por la Winrock International Institute For Agricultural Development (WINROCK) (Macdicken, 1997).

- **Reconocimiento de las parcelas experimentales**

Para desarrollar la investigación fueron seleccionados tres sistemas, la primera con cultivo de *Elaeis guineensis* (palma aceitera), la segunda con cultivo de *Theobroma cacao* L. (cacao) y la tercera parcela con cultivo de *Musa Sp.* (plátano). Las tres parcelas presentaron características uniformes de 1 ha, con pendientes de moderadamente (plana) a moderadamente ondulada.

- **Determinar el tamaño de muestra**

Para estudiar la biomasa en los tres sistemas se delimitó un área de 1.000 m², empleando la metodología sugerida por el Centro Internacional de Investigación en Agroforestería (ICRAF) (Rügnitz *et al.*, 2009) y el Instituto Internacional Winrock para el Desarrollo Agrícola (WINROCK) (Macdicken, 1997).

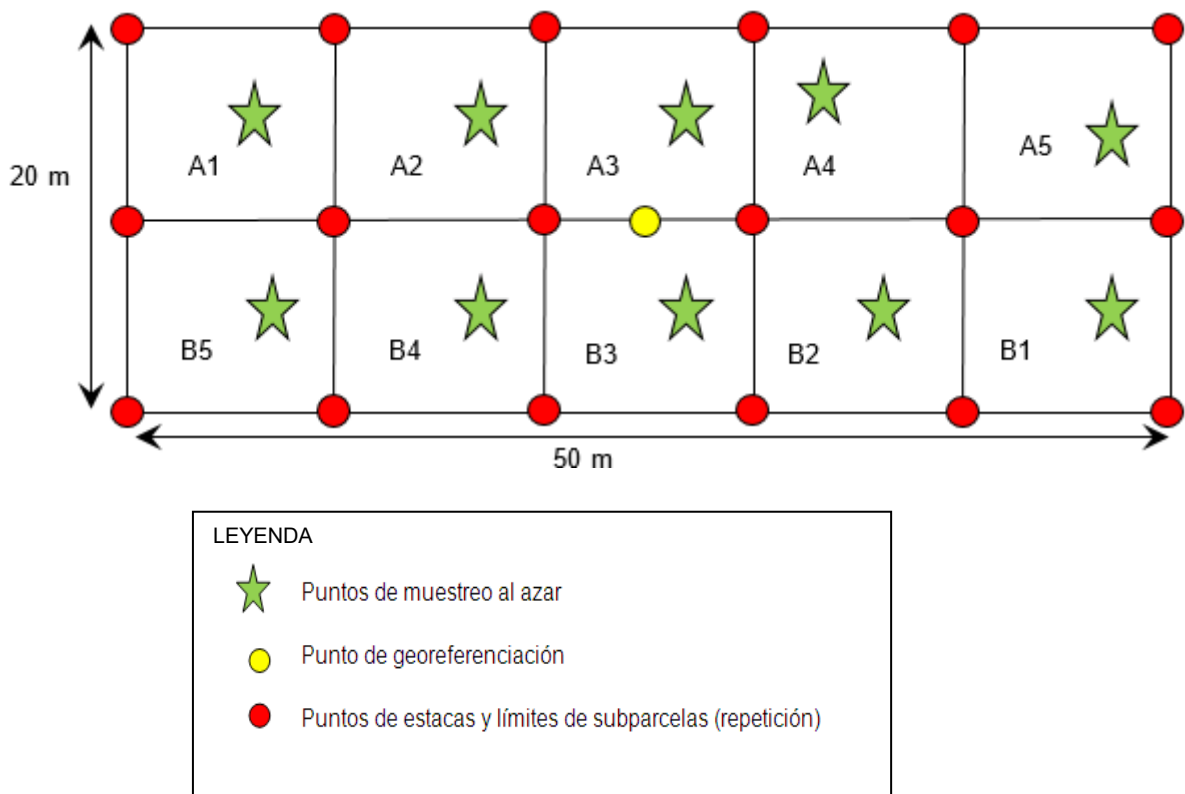


Figura 1. Metodología de muestreo (ICRAF)

Cada subparcela (repetición), delimitada con rafia de color, midió 10 m x 10 m. Los puntos verdes (estrella) señalan los puntos de muestreo aleatorios de biomasa aérea (herbácea y hojarasca) y subterránea (raíces); los puntos rojos, los límites de cada subparcela; y el punto amarillo, el punto de georreferenciación.

- **Determinación de la biomasa herbácea**

Dentro de cada subparcela de 10 m x 10 m, se colocó aleatoriamente un cuadrante de 1 m x 1 m para seleccionar un punto de muestreo. Toda la biomasa herbácea aérea dentro del cuadrante se cortó a nivel del suelo (2 cm por encima de la superficie) utilizando tijeras de podar y registrado como materia verde (MV).

El MV de cada subparcela se pesó en el campo utilizando una báscula de resorte de 10 kg; se recolectaron 20 réplicas por parcela. Para disponer la materia seca (MS), se recolectó una submuestra de biomasa herbácea (aproximadamente 200 g) en bolsas etiquetadas.

En el laboratorio, cada submuestra se pesó con una báscula digital, se colocó en una bolsa de papel etiquetada y se secó en horno a 70 °C por tres días hasta alcanzar un peso seco constante. Tras volver a pesarla con la misma báscula, se calculó el porcentaje de MS. Finalmente, se usó una regla de tres simple para determinar la biomasa seca por m², que se extrapoló a t ha⁻¹ mediante fórmulas:

$$\% \text{ MS} = (\text{MS}_{\text{ submuestra}} / \text{MV}_{\text{ submuestra}}) * 100 \dots\dots\dots(1)$$

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

$$\text{Biomasa herbácea (t ha}^{-1}\text{)} = \text{MVH}_{\text{ muestra}} * (\% \text{ MS}) * 10 \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

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

MVH muestra: Materia verde herbácea de la muestra expresada en kg m⁻²

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

10: Factor para convertir kg m⁻² a t ha⁻¹

- **Determinación de la biomasa hojarasca**

Dentro del m² donde se muestreó la biomasa herbácea, se recolectó toda la MO muerta (hojas secas, tallos, ramas) en un cuadrante de 0.25 m² (0.50 m x 0.50 m). Se recolectaron 20 repeticiones de hojarasca por parcela, depositadas en bolsas codificadas y pesadas en laboratorio con una báscula digital. Al igual que con la biomasa herbácea, se definió la MS. El peso seco de la hojarasca se extrapoló a t ha⁻¹ utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Biomasa hojarasca (t ha}^{-1}\text{)} = \text{MVh}_{\text{ muestra}} * (\% \text{ MS}) * 10 \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

Biomasa hojarasca (t ha⁻¹) : Biomasa hojarasca (materia seca)

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

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

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

3.4.2. Estimar el carbono almacenado en la biomasa radicular y carbono orgánico del suelo en tres sistemas con *E. guineensis* (palma aceitera), *Theobroma cacao* (cacao) y *Musa Sp.* (plátano)

Para definir el C existente en cada biomasa, se utilizó la metodología propuesta por el ICRAF (Rügnitz *et al.*, 2009) multiplicando por un factor 0.5. Se utilizó la siguiente fórmula:

Carbono herbáceo (t ha^{-1}) (CH) = biomasa herbácea (t ha^{-1})*0.5

Carbono hojarasca (t ha^{-1}) (Ch) = biomasa hojarasca (t ha^{-1})*0.5

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

- Determinación de la biomasa radicular

Para estimar la biomasa radicular de herbáceas, se excavó una calicata de 50 cm x 30 cm x 50 cm. Se empleó el método directo de Böhm (1979), muestreando el suelo con un barreno de 20.25 cm^2 de área y 10 cm de largo. Siguiendo a Rügnitz *et al.* (2009), se tomaron muestras a 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm de profundidad, dada la concentración de raíces en los primeros 30 cm. Cada muestra se puso en bolsas codificadas por profundidad.

En el laboratorio, las raíces finas (2 mm) se tamizaron y lavaron manualmente. Después de secarlas con papel, se pesaron en fresco con una báscula digital. Luego, se secaron en estufa a 70 °C por tres días hasta peso constante para determinar la materia seca. Este peso de biomasa radicular se extrapola a t ha^{-1} mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Biomasa radicular (t ha}^{-1}\text{)} = \sum_{i=1}^{i=n} (\text{MVr}_{\text{muestra}} * (\% \text{ MS}) * 10)_{\text{profundidad}} \dots\dots\dots(4)$$

Dónde:

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}

% MS = Porcentaje de la materia de la muestra

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

- Estimación del carbono orgánico del suelo

Para evaluar el COS en cada estrato de estudio (0 - 10 cm, 10 - 20 cm, y 20 - 30 cm), se empleó la fórmula recomendada por Macdicken (1997).

$$\text{COS (t ha}^{-1}\text{)} = \sum_{i=1}^{i=n} ([\text{CO}/100] * \text{Dap} * \text{Ps} * 10000)_{\text{profundidad}} \dots\dots\dots(5)$$

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 & Black, 1938)

Dap (t m⁻³): densidad aparente de la profundidad evaluada (t m⁻³)

Ps(m): profundidad de muestreo (m)

10,000: área m⁻²

La DA se determinó por el método del cilindro, extrayendo 10 muestras de suelo por sistema con un cilindro metálico de volumen conocido (502,66 cm³). Las muestras se secaron en horno a 105 °C durante 72 horas para obtener la MS, que se dividió entre el volumen del suelo. El C orgánico se estimó a partir del contenido de MO mediante la conversión de Walkley y Black (1938), citada por Rügntz et al. (2009). Para definir la proporción de MO por profundidad, se tomaron muestras con un barreno de cada estrato (0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm), se mezclaron para homogeneizarlas y se enviaron 200 g de cada muestra codificada al laboratorio.

3.4.3. Estimar el almacenamiento total de carbono del suelo en los tres sistemas con *E. guineensis* (palma aceitera), *Theobroma cacao* (cacao) y *Musa Sp.* (plátano)

Para determinar la proporción de C retenido por los sistemas (palmera aceitera, cacao y plátano) se desarrolló la siguiente ecuación:

$$\text{CAS (t h}^{-1}\text{)} = \text{CA} + \text{CH} + \text{Ch} + \text{CR} + \text{COS} \dots\dots\dots(6)$$

Dónde:

CAS: Carbono almacenado por sistema (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)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Estimar el carbono de la biomasa sobre el suelo (herbácea y hojarasca) en tres sistemas con *E. guineensis* (palma aceitera), *Theobroma cacao* (cacao) y *Musa Sp.* (plátano)

4.1.1. Carbono orgánico en la biomasa herbácea

La Tabla 3 presenta el ANVA para la biomasa herbácea, revelando un efecto significativo ($p = 0,0012$). Esto indica diferencias estadísticamente significativas en la retención de C orgánico en la biomasa herbácea entre los sistemas de empleo de la tierra evaluados. Como señalan Ingram y Fernández (1999), citados por la FAO (2000), y Acuña y Oviedo (2001), la retención de C se ve influenciado por elementos como la estructura mineral del suelo, textura, profundidad, DA y aireación. La capacidad potencial de acumulación de C del suelo está limitada por la producción de biomasa aérea y subterránea, los efectos climáticos directos sobre las etapas edáficas y los efectos climáticos indirectos sobre la producción de biomasa.

Tabla 3. ANVA del almacenamiento de carbono orgánico en la biomasa herbácea en diferentes sistemas de uso

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Sig
Modelo	2	7,43	3,71	12,46	0,0012 *
Sistema de uso	2	7,43	3,71	12,46	0,0012 *
Error	12	3,58	0,30		
Total	14	11,00			

*significativo

Tabla 4 presenta los valores medios y desviación estándar (prueba de TUKEY, $\alpha=0,05$) del almacenamiento de C orgánico en la biomasa herbácea, mostrando diferencias estadísticas significativas entre los sistemas de uso de suelo. Los sistemas de plátano y palma aceitera presentaron el mayor almacenamiento (3,40 t/ha y 2,78 t/ha, respectivamente), mientras que el cacao mostró el menor (1,69 t/ha). Factores como la erosión, la lixiviación y el manejo de residuos de cosechas limitan el almacenamiento de carbono en el suelo (Ingram & Fernández, 1999, citado por FAO, 2000; Acuña y Oviedo, 2001). Jandl (2003) reporta que los suelos forestales son los mayores depósitos de carbono en ecosistemas terrestres, encontrándose este en la hojarasca, sistema radicular (vivo y muerto) y "carbono negro". López et al. (1999) sugiere que los muestreos deberían retener la variabilidad de la biomasa herbácea localizando puntos a

distintas distancias de los árboles. La biomasa herbácea se cuantificó por marcos de muestreo (50 x 50 cm), aunque en esta investigación se utilizó un muestreo de 1 m².

Tabla 4. Carbono orgánico en la biomasa herbácea, en tres sistemas de uso del suelo (t/ha), (promedio \pm error estándar)

Sistema de uso	Media \pm DE (t/ha)	IC 95% (t/ha)	Tukey ($\alpha=0,05$)
Plátano	3,40 \pm 0.24	[2,87 – 3,93]	a
Palma aceitera	2,78 \pm 0.24	[2,25 – 3,31]	a
Cacao	1,69 \pm 0.24	[1,16 – 2,22]	b

Letras distintas en la columna Tukey indican diferencias estadísticas entre sistemas ($p=0.05$)

La Figura 2, muestra la retención de C orgánico en la biomasa herbácea, donde mayor almacenamiento se presentan en los sistemas, plátano y palma aceitera con 3,40 t/ha y 2,78 t/ha respectivamente, el cacao presenta un menor almacenamiento con 1,69 t/ha.

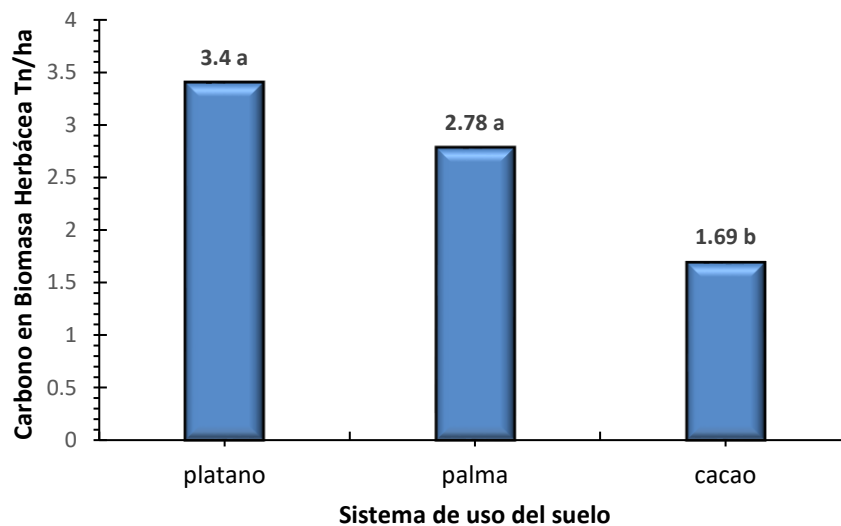


Figura 2. Carbono orgánico almacenado en la biomasa herbácea en tres sistemas de uso del suelo (t/ha)

4.1.2. Carbono orgánico en la biomasa de la hojarasca

La Tabla 5, indica el ANVA correspondiente al C orgánico en la biomasa de la hojarasca, presenta un efecto significativo p-valor (0.0003), donde las variables estudiadas muestran diferencias estadísticas en cuanto a la retención de C orgánico en la hojarasca de los distintos sistemas de empleo de suelo evaluados.

Tabla 5. ANVA del almacenamiento de carbono orgánico en la biomasa de la hojarasca en tres sistemas de uso del suelo

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Sig
Modelo	2	34,70	17,35	16,83	0,0003 *

Sistema de uso	2	34,70	17,35	16,83	0,0003 *
Error	12	12,37	1,03		
Total	14	47,08			

*significativo

En la Tabla 6 muestra los valores expresados como medias y desviación estándar a un nivel de significancia ($\alpha=0,05$), apreciándose diferencias estadísticas en los diferentes sistemas de empleo de la tierra, en cuanto a la retención de C orgánico en la biomasa de la hojarasca, mayor almacenamiento en los sistemas, cacao y palma aceitera con 7,05 t/ha y 5,78 t/ha respectivamente, menor almacenamiento el sistema plátano con 3,38 t/ha.

Tabla 6. Carbono orgánico en la biomasa de la hojarasca, en tres sistemas de uso del suelo (t/ha), (promedio \pm error estándar)

Sistema de uso	Media \pm DE (t/ha)	IC 95% (t/ha)	Tukey ($\alpha=0,05$)
Cacao	7,05 \pm 0,45	[5,99 – 8,11]	a
Palma aceitera	5,78 \pm 0,45	[4,72 – 6,84]	a
Plátano	3,38 \pm 0,45	[2,32 – 4,44]	b

Letras distintas en la columna Tukey indican diferencias estadísticas entre sistemas ($p=0,05$)

La Figura 3, muestran mayor retención de C orgánico en la biomasa de la hojarasca de los sistemas, cacao y palma aceitera con 7,05 t/ha y 5,78 t/ha respectivamente, menor almacenamiento el sistema plátano con 3,38 t/ha.

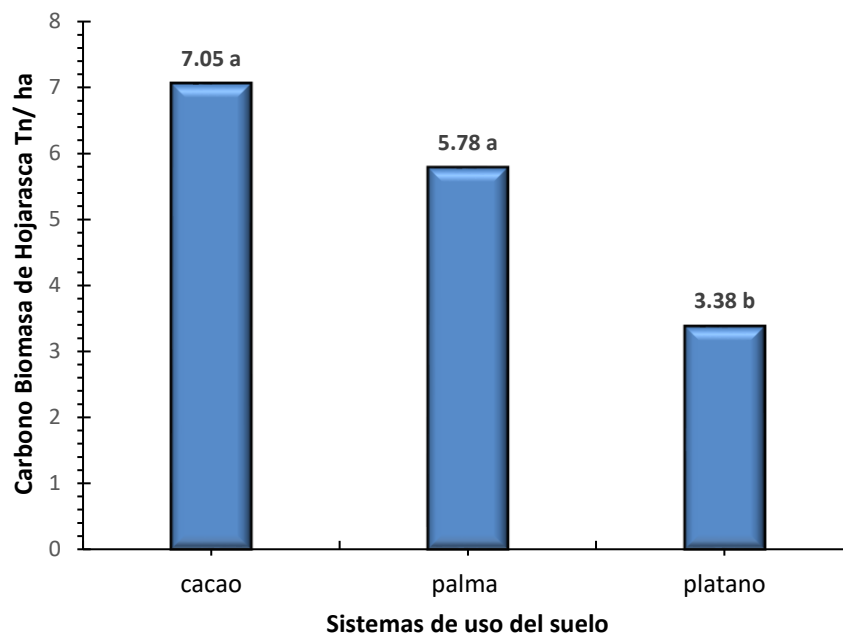


Figura 3. Carbono orgánico almacenado en la biomasa de la hojarasca, en tres sistemas de uso del suelo (t/ha)

4.2. Estimar el carbono almacenado en los sistemas radicales y carbono orgánico del suelo en tres sistemas con *E. guineensis* (palma aceitera), *Theobroma cacao* (cacao) y *Musa Sp.* (plátano)

4.2.1. Carbono orgánico en el suelo

Tabla 7 muestra un análisis de varianza significativo ($p < 0,0001$), indicando diferencias estadísticas en el COS entre los distintos sistemas de uso evaluados. Un estudio de Hidalgo (2014) en José Crespo y Castillo - Aucayacu estimó la retención de C en biomasa de maíz, relacionándolo con parámetros meteorológicos y el crecimiento de la planta en cuatro estadios vegetativos (germinación, crecimiento vegetativo, floración femenina y fecundación del grano). El C total almacenado en el suelo fue de 34,80 t C ha⁻¹ (97,59%). Según el IPCC (1996), el suelo es un sumidero de C importante; sin embargo, los proyectos de C a menudo ignoran este componente en las negociaciones actuales porque no es tan visible como la biomasa aérea. Mientras en el COS debe medirse hasta una profundidad de 30 cm, ya que el cambio de empleo del suelo afecta principalmente las capas superiores.

Tabla 7. ANVA del carbono orgánico almacenado en el suelo en tres sistemas de uso

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Sig
Modelo	2	353,52	176,76	109,86	<0,0001 **
Sistema de uso	2	353,52	176,76	109,86	<0,0001**
Error	12	19,31	1,61		
Total	14	372,83			

**altamente significativo

En la Tabla 8 muestran los valores medios de COS (t/ha) en los tres sistemas de empleo de la tierra analizados (palma aceitera, cacao y plátano) y en tres profundidades (0–10, 10–20 y 20–30 cm). El ANVA de dos vías mostró efectos significativos tanto para el sistema de uso ($p < 0,0001$) como para la profundidad ($p < 0,001$), así como una interacción significativa entre ambos elementos ($p < 0,05$).

Se observó que, de manera consistente, el contenido de C disminuyó con la profundidad en los tres sistemas. En el estrato superficial (0–10 cm), el sistema de palma aceitera presentó los valores más altos de carbono orgánico (25,10 t/ha), seguido de cacao (20,40 t/ha) y plátano (12,40 t/ha). Esta tendencia se mantuvo en las capas más profundas (10–20 cm y 20–30 cm), aunque con valores progresivamente menores.

El promedio total evidenció diferencias significativas entre sistemas, con mayor carbono almacenado en palma aceitera ($22,59 \pm 0,57$ t/ha), intermedio en cacao ($18,91 \pm 0,57$

t/ha) y menor en plátano ($10,96 \pm 0,57$ t/ha). Las comparaciones múltiples de Tukey confirmaron que los tres sistemas difieren estadísticamente entre sí ($p < 0,05$).

Estos resultados indican que la palma aceitera constituye el sistema de uso con mayor capacidad de retención de C en el suelo, atribuible probablemente a la mayor producción y descomposición de residuos orgánicos, así como a las características de su sistema radicular. En contraste, el plátano mostró los valores más bajos, lo que podría estar relacionado con su menor aporte de biomasa y la rápida descomposición de residuos.

En términos de dinámica vertical, la reducción de carbono con la profundidad refleja el predominio de la acumulación de materia orgánica en los horizontes superficiales, donde ocurre la mayor incorporación de residuos y actividad biológica. Este patrón es consistente con lo reportado por Hidalgo (2014) en cultivos de maíz en Aucayacu, y con lo descrito por el IPCC (1996), que señala que el cambio en el empleo de la tierra ejerce un efecto más marcado en los primeros 30 cm del perfil.

Tabla 8. Carbono orgánico almacenado en el suelo en tres sistemas de uso y tres profundidades (t/ha), (promedio \pm error estándar)

Sistema de uso	Profundidad de 0 – 10 (ta/ha)	Profundidad de 10 - 20	Profundidad de 20 - 30	Media \pm DE (t/ha)	Tukey ($\alpha=0,05$)
Palma aceitera	$25,10 \pm 1,20$	$22,30 \pm 0,95$	$20,38 \pm 0,85$	$22,59 \pm 0,57$	a
Cacao	$20,40 \pm 1,15$	$18,60 \pm 0,87$	$17,70 \pm 0,72$	$18,91 \pm 0,57$	b
Plátano	$12,40 \pm 0,92$	$10,80 \pm 0,65$	$9,70 \pm 0,55$	$10,96 \pm 0,57$	c

Letras distintas en la columna Tukey indican diferencias estadísticas entre sistemas ($p=0.05$)

Los resultados obtenidos evidencian que el COS difiere significativamente entre los sistemas de uso evaluados y entre los estratos de profundidad, confirmando que el almacenamiento de carbono está influenciado por el tipo de cultivo y por la distribución vertical de la MO en el perfil edáfico.

El mayor almacenamiento de C observado en el sistema de palma aceitera concuerda con lo reportado por Segura y Kanninen (2002), quienes indican que los sistemas agroforestales y forestales presentan una elevada capacidad de acumulación de carbono en comparación con cultivos de menor densidad estructural. En este caso, la palma genera una

considerable cantidad de residuos orgánicos (hojas, raíces y tallos), que tras su descomposición se incorporan al suelo, incrementando la proporción de C orgánico.

Por otro lado, el sistema de cacao presentó un nivel intermedio de carbono orgánico, lo cual coincide con lo expuesto por Quiñe (2009) en sistemas agroforestales de café en San Martín, donde el suelo fue el principal reservorio de carbono, aunque en valores menores respecto a especies de mayor biomasa como la palma. Esto se explica porque el cacao, al ser un cultivo perenne, mantiene un aporte constante de MO a través de hojarasca y raíces finas, aunque en menor volumen que la palma.

En contraste, el sistema de plátano mostró los valores más bajos de C en el suelo. Este hallazgo es consistente con lo observado por Mariño (2013) en cultivos de arroz bajo riego en Tingo María, donde sistemas con menor cobertura y menor aporte de biomasa registraron reducida capacidad de acumulación de C. En el plátano, la rápida descomposición de sus residuos y la baja persistencia de la materia orgánica explican esta menor acumulación.

En cuanto a la distribución vertical, la tendencia decreciente del carbono con la profundidad concuerda con lo señalado por Jandl (2003) y el IPCC (1996), quienes destacan que la mayor parte del carbono edáfico se concentra en los horizontes superficiales (0–30 cm), debido a que en ellos ocurre la descomposición de la hojarasca, la incorporación de raíces finas y la actividad microbiana más intensa. Hidalgo (2014), en cultivos de maíz en Aucayacu, encontró un comportamiento similar, confirmando que el efecto del uso del suelo sobre el C orgánico es más marcado en las capas superficiales.

En síntesis, la palma aceitera demuestra mayor capacidad de acumulación de carbono edáfico, seguida del cacao y, en menor medida, del plátano. Estos resultados refuerzan la importancia de considerar el tipo de sistema de uso del suelo como factor determinante en la reducción del cambio climático por la retención de C, y confirman que las diferencias encontradas responden a las características de la biomasa aportada y a la dinámica de la MO en cada sistema.

La Figura 4, muestran la retención de C retenido en la tierra en los diferentes sistemas, mayor retención de C se presenta en palma aceitera con 22,59 t/ha, seguido del cacao con 18,91 t/ha y el plátano con 10,96 t/ha.

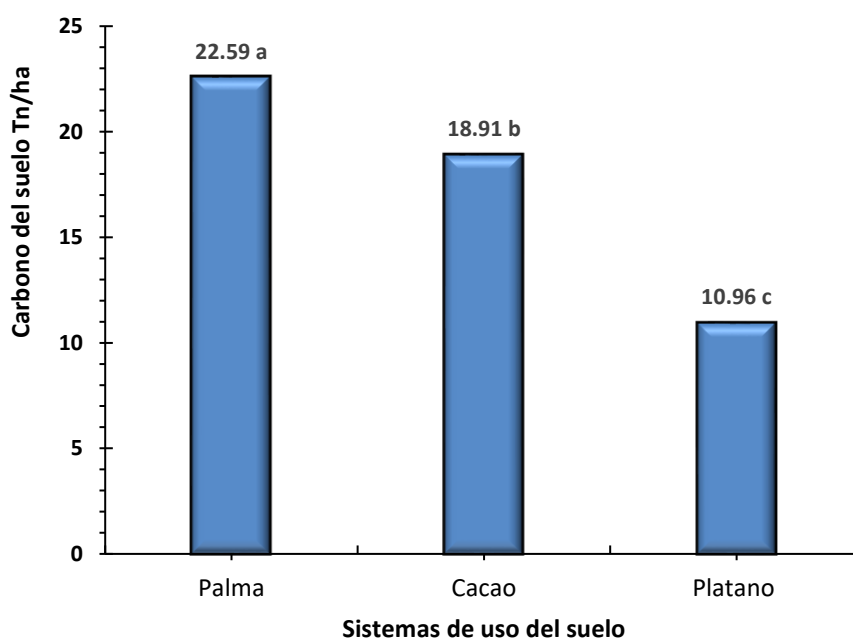


Figura 4. Carbono almacenado en tres sistemas de uso del suelo (t/ha)

4.2.2. Carbono orgánico en la biomasa radicular

En la Tabla 9, observamos el análisis de varianza correspondiente a la biomasa radicular, presentando un efecto significativo p-valor ($<0,0001$), donde las variables estudiadas presentan diferencias estadísticas en cuanto al retención de C orgánico de la biomasa radicular, en los diferentes sistemas de uso estudiados. Para Rüginitz *et al.* (2009) los inventarios de C proporcionan una instantánea de la condición actual de cada compuesto de C (biomasa, hojarasca, raíces y suelo) en términos de proporción. Este método facilita comparar diferentes sitios, sistemas y periodos de tiempo, como se aplicó en esta investigación al evaluar tres sistemas de uso del suelo: palma aceitera, plátano y cacao.

Tabla 9. ANVA del almacenamiento de carbono orgánico en la biomasa radicular en tres sistemas de uso

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Sig
Modelo	2	51,71	25,85	23,83	$<0,0001$ **
Sistema de uso	2	51,71	25,85	23,83	$<0,0001$ **
Error	12	13,02	1,08		
Total	14	64,73			

**altamente significativo

En la Tabla 10, muestra los valores expresados como medias y desviación estándar. IC95% calculados sobre las medias (o EMMs si usaste modelos a un nivel de significancia ($\alpha=0,05$), apreciándose diferencias estadísticas en los distintos sistemas de uso, en

cuanto a la acumulación de C orgánico en la biomasa radicular, mayor almacenamiento de carbono lo presenta el sistema de palma aceitera con 3,10 t/ha, seguido del cacao con 2,35 t/ha y el plátano con 1,85 t/ha. Snowdon *et al.* (2001) manifiestan que los sistemas forestales y agroforestales retienen C en cuatro compuestos: biomasa sobre el suelo, hojarasca, sistemas radiculares y COS.

Tabla 10. Carbono orgánico almacenado en la biomasa radicular en tres sistemas de uso del suelo (t/ha), (promedio \pm error estándar)

Sistema de uso	Media \pm DE (t/ha)	IC 95% (t/ha)	Tukey ($\alpha=0,05$)
Palma aceitera	3,10 \pm 0,28	[2,53 – 3,671]	a
Cacao	2,35 \pm 0,26	[1,82 – 2,88]	ab
Plátano	1,85 \pm 0,22	[2,32 – 4,44]	c

Letras distintas en la columna Tukey indican diferencias estadísticas entre sistemas ($p=0.05$)

La Figura 5, muestra la acumulación de C orgánico en la biomasa radicular, obteniendo un mayor retención de C el sistema de palma aceitera con 3,10 t/ha, seguidamente el sistema de cacao con 2,35 t/ha y el sistema plátano con 1,85 t/ha.

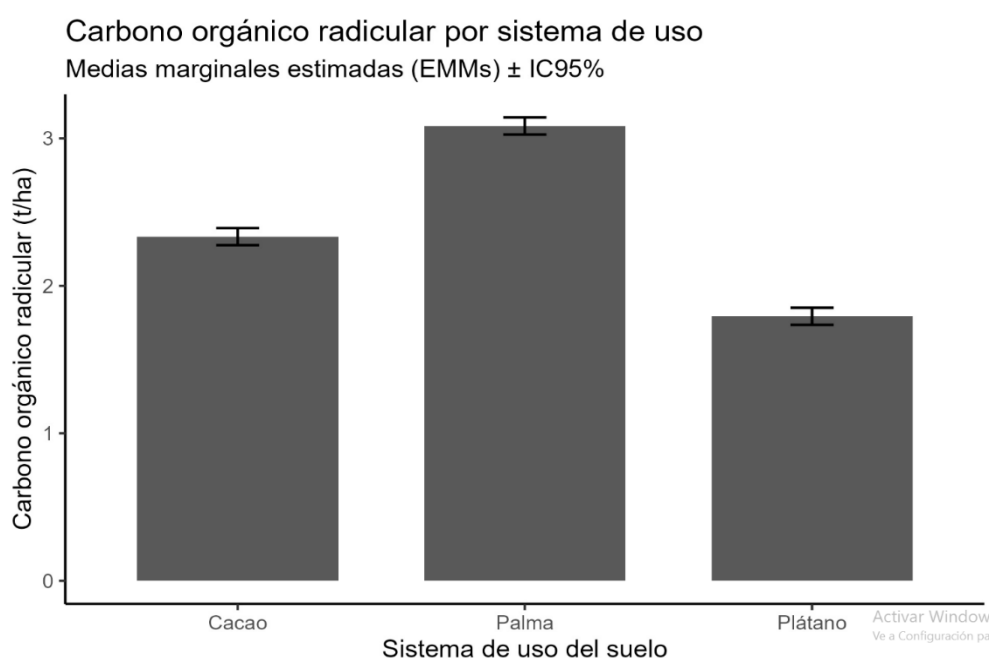


Figura 5. Carbono orgánico en la biomasa radicular en tres sistemas de uso del suelo (t/ha)

4.3. Estimar el almacenamiento total de carbono de los suelos en los sistemas con *E. guineensis* (palma aceitera), *Theobroma cacao* (cacao) y *Musa Sp.* (plátano)

Tabla 11 muestra el C orgánico total retenido en tres sistemas de empleo de la tierra. El almacenamiento total de carbono del suelo (0–30 cm) difirió significativamente entre los usos del suelo, con los siguientes valores medios: palma aceitera (34,25 t C·ha⁻¹), cacao

(30,00 t C·ha⁻¹) y plátano (19,59 t C·ha⁻¹). Quiñe (2009) cuantificó la biomasa y retención de C en sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) en dos pisos altitudinales en la región San Martín (EE - ICT, a 2,5 km de Tarapoto, y en el Fundo Sananguillo, a 10 km de Lamas). En el Fundo Juan Bernito, el carbono total acumulado fue de 119,37 t/ha, con la mayor contribución del C en el suelo (74,76 t/ha), seguido de árboles vivos (32,85 t/ha), árboles caídos muertos (5,32 t/ha), hojarasca (4,87 t/ha) y arbustos-herbáceas (1,89 t/ha). En el Fundo Sananguillo, el C acumulado fue de 165,81 t/ha, también con la mayor contribución del carbono en el suelo (114,99 t/ha), seguido de árboles vivos (27,83 t/ha), árboles caídos muertos (17,65 t/ha), hojarasca (2,98 t/ha) y arbustos-herbáceas (2,35 t/ha). Mariño (2013) estimó las reservas de C en sistemas de cultivo de arroz en Tingo María, encontrando 41,20 tC/ha en sistemas de riego y 57,40 tC/ha en sistemas de secano.

En 2014, Hidalgo estimó la acumulación de C en la biomasa del maíz mediante la fotosíntesis y la retención de MOS en el distrito de José Crespo y Castillo - Aucayacu. El estudio correlacionó el probable almacenamiento de carbono (una variable dependiente no cuantitativa) con características meteorológicas independientes mediante tres distribuciones estadísticas. Las variables explicativas, incluyendo la altura de la planta, la temperatura, la humedad y la radiación solar, se registraron en las cuatro etapas vegetativas del maíz (14 días, germinación; 52 días, desarrollo vegetativo; 73 días, floración femenina; y 82 días, fertilización del grano). El C total en cultivos de maíz fue de 35,66 t C ha⁻¹ (100%), con 0,86 t C ha⁻¹ (2,41%) provenientes de la biomasa y 34,80 t C ha⁻¹ (97,59%) almacenadas en el suelo.

Tabla 11. Carbono orgánico total almacenado en tres sistemas del suelo

Sistema de uso	Suelo	Biomasa radicular	Biomasa herbácea	Hojarasca	Total
	(t/ha)	(t/ha)	(t/ha)	(t/ha)	(t/ha)
Palma aceitera	22,59	3,10	2,78	5,78	34,25
Cacao	18,91	2,35	1,69	7,05	30,00
Plátano	10,96	1,85	3,40	3,38	19,59

V. CONCLUSIONES

1. Se estimó el stock de carbono en los tres sistemas del suelo evidenciándose diferencias significativas entre sistemas y una disminución consistente del carbono con la profundidad. Los valores medios (0–30 cm) fueron: palma 22,59 t C·ha⁻¹, cacao 18,91 t C·ha⁻¹ y plátano 10,96 t C·ha⁻¹.
2. Se cuantificó el carbono en los tres compartimentos de biomasa bajo cada sistema. En términos funcionales, la biomasa radicular y la hojarasca aportaron de manera relevante y diferenciada al almacenamiento, coherentes con la estructura y dinámica de residuos de cada cultivo; la fracción herbácea presentó contribuciones menores y, en algunos casos, equivalencias estadísticas entre sistemas. Estos resultados respaldan la heterogeneidad de aportes bióticos al ciclo del carbono.
3. Se estimó el almacenamiento total de carbono para los tres sistemas y se determinó que palma aceitera presenta la mayor capacidad de almacenamiento, seguida de cacao y plátano. Este patrón es consistente con los resultados por compartimentos (en particular, el suelo 0–30 cm) y con la mayor incorporación de residuos y estructura radicular en palma bajo las condiciones locales evaluadas.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Ampliar una réplica mayor de 5 sistemas de uso, realizando la corrección por masa de suelo equivalente (ESM) y modelos mixtos (Sistema×Profundidad) para estimar efectos causales y perfiles verticales con IC95%.
2. Monitorear dinámica estacional de hojarasca, herbácea y raíces finas (trampas, cortes, minirrizotrones), con ensayos de descomposición y fraccionamiento físico (C particulado vs. mineral-asociado) para explicar mecanismos que vinculan biomasa y C del suelo.
3. Escalar a paisaje con Monitoreo, Reporte y Verificación para integrar stocks de campo con covariables geoespaciales y modelos de aprendizaje estadístico para mapear t C·ha⁻¹ e incertidumbre, estimar potencial de créditos de carbono y priorizar intervenciones.

VII. REFERENCIAS

- Ávila, G. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. **Agroforestería en las Américas**, 8(30). CATIE.
- Benjamín, A., & Masera, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. **Madera y Bosques**, 7(1), 3–12.
- Brown, S. (1997). **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer**. FAO.
- Böhm, W. (1979). **Methods of studying root systems**. Springer-Verlag.
- Ciesla, W. M. (1996). **Cambio climático, bosques y ordenación forestal: Una visión de conjunto**. FAO.
- FAO. (1999). **Desafíos y oportunidades para el sector forestal en virtud del Protocolo de Kyoto**. FAO.
- FAO. (2002). **Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra** (Informes sobre recursos mundiales de suelos). FAO.
- Gayoso, J. (2006). Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques nativos y plantaciones de Chile. **Revista Forestal Iberoamericana**, 1(1). Universidad Austral de Chile.
- Guo, L. B., & Gifford, R. M. (2002). Soil carbon stocks and land-use change: A meta-analysis. **Global Change Biology**, 8, 345–360.
- Gómez-Echeverri, L. (2000). **Cambio climático y desarrollo**. PNUD – Yale School of Forestry and Environmental Studies.
- Ibrahim, M., & Pezo, D. (2003). Monitoreo del secuestro de carbono en sistemas silvopastoriles. **Agroforestería en las Américas**, 10(39–40), 109–116.
- IPCC. (1996). **Report of the Twelfth Session of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Reference manual and workbook of the 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories**. IPCC.
- Jandl, R. (2003). Almacenamiento de carbono en bosques: El papel del suelo. **Revista Forestal Iberoamericana**, 1(1). IUFRO.
- López, A., Schlönvoigt, A., Ibrahim, M., Kleinn, C., & Kanninen, M. (1999). Cuantificación del carbono almacenado en el suelo de un sistema silvopastoril en la zona Atlántica de Costa Rica. **Agroforestería en las Américas**, 6(23), 51–53.

- MacDicken, K. (1997). **A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects**. Winrock International.
- Mariño, Y. (2013). **Evaluación del carbono almacenado en el cultivo de arroz bajo dos sistemas de siembra en Tingo María** (Tesis de título). Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Martínez, E., Fuentes, P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. **Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal**, 8(1), 68–96.
- Monier, G., Thevenet, G., & Lesaffre, B. (1994). Simplification of the soil. En **Colloques INRA** (N.º 65).
- Ordóñez, J., & Masera, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. **Madera y Bosques**, 7(1), 3–12.
- Pineda, I., 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**, 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. **Agroforestería en las Américas**, (46), 40–44.
- Powell, M., & Delaney, M. (1998). **Carbon sequestration and sustainable coffee in Guatemala: Final report**. Winrock International.
- Proyecto Especial Alto Huallaga. (2012). **Estudio de suelos del distrito Luyando: Reforestación con fines de recuperación de suelos degradados (1300 ha). Informe final**. Tingo María, Perú.
- Quiñe, P. (2009). **Cuantificación de biomasa y reserva de carbono en sistemas agroforestales de café (Coffea arabica L.) en dos pisos altitudinales** (Tesis). Universidad Nacional de San Martín.
- Rao, I., Rippstein, G., Escobar, G., & Ricaurte, J. (2001). Producción de biomasa epígea e hipógea en sabanas nativas. En **Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia** (pp. 124–145). CIAT/CIRAD.
- Reicosky, D. C., & Lindstrom, M. J. (1995). Impact of fall tillage on short-term carbon dioxide flux. En **Soils and Global Change** (pp. 132–...). CRC Press.
- Rügnitz, M., Chacón, M., & Porro, R. (2009). **Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales**. ICRAF/Consortio Iniciativa Amazónica.
- Segura, M., & Kanninen, M. (2002). Inventario para estimar carbono en ecosistemas forestales tropicales. En L. Orozco & C. Brumer (Eds.), **Inventarios forestales para bosques*

latifoliados en América Central* (pp. 202–212). CATIE (Serie Técnica, Manual Técnico N.º 50).

Senanayake, R., & Gamboa, L. (2003). *Fortaleciendo relaciones comunitarias: Intercambio internacional para el manejo de recursos naturales*. Taller de Forestería Análoga, Santa María Huatulco, México.

Snowdon, P., Raison, J., Keith, H., Montagu, K., Bi, H., Ritson, P., Grierson, P., Adams, M., Burrows, W., & Eamus, D. (2001). *Protocol for sampling tree and stand biomass*. Australian Greenhouse Office.

Trouvé, C., Mariotti, A., Schwartz, D., & Guillet, B. (1994). Soil organic carbon dynamics under eucalyptus and pine planted on savannas in Congo. *Soil Biology & Biochemistry*, 26, 287–295.

ANEXO

Anexo 1. Evaluación de datos**Tabla 12.** Colecta de datos biomasa de cacao

Cacao				
	Hojarasca		Herbácea	
N° muestra	Peso fresco (g)	Peso seco (g)	Peso fresco (g)	Peso seco (g)
1	1105,10	639,05	0	0
2	908	631,02	0	0
3	652,20	478,33	0	0
4	551,50	419,51	0	0
5	882,20	660,32	0	0

Tabla 13. Colecta de datos biomasa palma aceitera

Palma aceitera				
	Hojarasca		Herbácea	
N° muestra	Peso fresco (g)	Peso seco (g)	Peso fresco (g)	Peso seco (g)
1	245,40	184,80	248	76
2	276,50	168,80	202,30	66,60
3	179,20	138,50	92,20	85,10
4	127	105,60	285	87
5	193,70	148,60	204,70	79,20

Tabla 14. Colecta de datos biomasa de plátano

Plátano				
	Hojarasca		Herbácea	
N° muestra	Peso fresco (g)	Peso seco (g)	Peso fresco (g)	Peso seco (g)
1	245,40	184,80	248	76
2	276,50	168,80	202,30	66,60
3	179,20	138,50	92,20	85,10
4	127	105,60	285	87
5	193,70	148,60	204,70	79,20

Tabla 15. Colecta de datos biomasa raíz de cacao

Raíz - Cacao		
Muestra cm	peso fresco (g)	peso seco (g)
0 - 10	22,50	15,10
10 - 20	9,30	7,50
20 - 30	6,10	5,10

Tabla 16. Colecta de datos biomasa raíz de palma aceitera

Raíz - palma		
Muestra cm	Peso fresco (g)	Peso seco (g)
0 - 10	11,70	9,70
10 - 20	7,60	6,50
20 - 30	18	13,40

Anexo 2. Panel fotográfico



Figura 6. Sistema de uso palma aceitera



Figura 7. Sistema de uso plátano



Figura 8. Sistema de uso cacao



Figura 9. Cuadrado muestreador sistema de uso palma aceitera



Figura 10. Transepto con hilo rafia sistema de uso palma aceitera



Figura 11. Cuadrado muestreador sistema de uso palma aceitera para biomasa



Figura 12. Muestreo de suelos a diferentes profundidades palma aceitera



Figura 13. Muestreo para biomasa sistema de uso cacao



Figura 14. Peso de muestras de biomasa hojarasca en laboratorio



Figura 15. Secado de muestras de biomasa en estufa del laboratorio



Figura 16. peso de muestras de biomasa radicular en laboratorio