

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 DE USO DEL SUELO Y SU
INFLUENCIA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO, DISTRITO LA MORADA, PROVINCIA
DE MARAÑÓN – HUÁNUCO PERÚ**

Tesis

Para optar al título de:

INGENIERO EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA

PRESENTADO POR:

YESSENIA LIZETH FLORES BRICEÑO

Tingo María – Perú

2025



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 005-2026-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 01 de setiembre de 2025, a horas 06:00 p.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 DE USO DEL SUELO Y SU INFLUENCIA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO, DISTRITO LA MORADA, PROVINCIA DE MARAÑÓN – HUÁNUCO PERÚ”

Presentado por la Bachiller: **FLORES BRICEÑO, YESSENIA LIZETH** 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, la 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, 20 de enero de 2026

Dr. WILFREDO ALVA VALDIVIEZO
PRESIDENTE

Ing. MSc. JOSE VICTOR QUIROZ RAMIREZ
MIEMBRO



Ing. MSc. ANDY WILLIAMS VELA ZEVALLOS
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 065 - 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 DE USO DEL SUELO Y SU INFLUENCIA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO, DISTRITO LA MORADA, PROVINCIA DE MARAÑÓN – HUÁNUCO PERÚ	YESSENIA LIZETH FLORES BRICEÑO	09 % Nueve	0 % Cero

Tingo María, 26 de febrero de 2026.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
J E F E

C.C. Archivo

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 DE USO DEL SUELO Y SU
INFLUENCIA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO, DISTRITO LA MORADA, PROVINCIA
DE MARAÑÓN – HUÁNUCO PERÚ**

Autor : Flores Briceño, Yessenia Lizeth.
Asesor de proyecto de tesis : Ing. MSc. Rengifo Trigozo, Juan Pablo.
Programa de investigación : Ciencias básicas.
Grupo de investigación : Ciencias básicas.
Línea de investigación : Física y química del suelo.
Lugar de ejecución : Distrito la Morada, provincia Marañón – Huánuco Perú.
Duración : Fecha de inicio 07-06-2024.
: Fecha de término 07-12-2024.
Financiamiento : Recursos propios.
Presupuesto : S/ 3 909,95
FEDU : No
Propio : Si
Otros : No

Tingo María – Perú

DEDICATORIA

A Dios, por la vida, la salud y por acompañarme en cada paso de mi formación personal y profesional.

A mi familia, por su apoyo incondicional y amor constante a lo largo de esta etapa universitaria.

A mi alma máter, la Universidad Nacional Agraria de la Selva, y a todos los docentes de la Facultad de Recursos Naturales Renovables, por haber contribuido significativamente a mi formación académica.

A mi asesor, Ing. MSc. Juan Pablo Rengifo Trigozo, por su orientación, compromiso y guía durante el desarrollo de esta investigación.

Y a todos los amigos y seres queridos que, de una u otra manera, hicieron posible la culminación de este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Dios, por su protección, fortaleza y sabiduría brindadas a lo largo de mi vida académica y personal.

A mis padres y familiares, por su amor, paciencia y motivación constante, pilares fundamentales en la culminación de mi carrera.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva y a sus docentes, quienes me brindaron los conocimientos y herramientas necesarias para mi desarrollo profesional.

Mi especial gratitud al Ing. MSc. Juan Pablo Rengifo Trigozo, por su valiosa asesoría y apoyo incondicional a lo largo de esta investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, directa o indirectamente, aportaron a la realización de este trabajo de tesis.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Hipótesis	1
1.2. Objetivo general.....	2
1.3. Objetivos específicos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Marco teórico	3
2.1.1. El carbono (C)	3
2.1.2. El ciclo del carbono	3
2.1.3. El carbono del suelo y su relación con el cambio climático	4
2.1.4. Gases de efecto invernadero	4
2.1.5. El dióxido de carbono (CO ₂).....	5
2.1.6. Almacenamiento de carbono	5
2.1.7. Inventarios de carbono.....	5
2.1.8. Monitoreo del almacenamiento de carbono.....	5
2.1.9. Componentes del almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles	5
2.1.10. El cambio climático.....	6
2.1.11. El suelo.....	7
2.1.12. Componentes del suelo.....	7
2.2. Estado del arte	8
2.2.1. Antecedentes	8
III. MATERIALES Y MÉTODOS	10
3.1. Lugar de ejecución.....	10
3.1.1. Condiciones climáticas.....	10
3.1.2. Ecología	10
3.1.3. Suelo	10
3.1.4. Topografía.....	10
3.1.5. Accesibilidad	11
3.1.6. Descripción de los sistemas de uso del suelo	11
3.2. Materiales y equipos.....	11
3.2.1. Materiales.....	11
3.2.2. Equipos	11

3.3.	Generalidades de la investigación.....	11
3.3.1.	Enfoque de investigación	12
3.3.2.	Tipo de investigación	12
3.3.3.	Nivel de la investigación	12
3.3.4.	Diseño de la investigación.....	12
3.3.5.	Población y muestra.....	12
3.3.6.	Variables evaluadas.....	12
3.3.7.	Técnicas de recolección de datos.....	12
3.3.8.	Análisis e interpretación de resultados	13
3.4.	Metodología	13
3.4.1.	Estimar el carbono de la biomasa sobre el suelo (herbácea y hojarasca) en tres sistemas con soto bosque (purma baja), <i>Theobroma cacao</i> L. (cacao) y <i>Musa Sp.</i> (plátano), distrito la Morada - Cholón	13
3.4.2.	Estimar el carbono almacenado en los sistemas radiculares y carbono orgánico en el suelo en tres sistemas con soto bosque (purma baja), <i>Theobroma cacao</i> L. (cacao) y <i>Musa Sp.</i> (plátano), distrito la Morada - Cholón.....	15
3.4.3.	Estimar el almacenamiento total de carbono de los suelos en los sistemas con soto bosque (purma baja), <i>Theobroma cacao</i> L. (cacao) y <i>Musa Sp.</i> (plátano), distrito la Morada - Cholón	17
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
4.1.	Estimar el carbono de la biomasa sobre el suelo (herbáceo y hojarasca) en tres sistemas con soto bosque (purma baja), <i>Theobroma cacao</i> L. (cacao) y <i>Musa Sp.</i> (plátano), distrito la Morada - Cholón.....	19
4.2.	Estimar el carbono almacenado en los sistemas radiculares y carbono orgánico del suelo en tres sistemas con soto bosque (purma baja), <i>Theobroma cacao</i> L. (cacao) y <i>Musa Sp.</i> (plátano), distrito de Morada - Cholón.....	22
4.3.	Estimar el almacenamiento total de carbono de los suelos en los sistemas con soto bosque (purma baja), <i>Theobroma cacao</i> L. (cacao) y <i>Musa Sp.</i> (plátano), distrito la Morada - Cholón	24
V.	CONCLUSIONES	27
VI.	PROPUESTAS A FUTURO.....	28
VII.	REFERENCIAS.....	29
	ANEXO.....	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Coordenadas UTM de los tres sistemas de uso del suelo.....	10
2. ANOVA del almacenamiento de carbono orgánico en la biomasa herbácea en tres sistemas de uso del suelo.....	19
3. TUKEY del contenido de carbono en la biomasa herbácea (tha^{-1}) en tres sistemas de uso del suelo, (promedio \pm error estándar).....	19
4. ANOVA del almacenamiento de carbono orgánico en la biomasa de la hojarasca en tres sistemas de uso del suelo	20
5. TUKEY del contenido de carbono orgánico en la hojarasca (tha^{-1}) en tres sistemas de uso del suelo, (promedio \pm error estándar).....	21
6. ANOVA del carbono orgánico almacenado en el suelo en tres sistemas de uso	22
7. TUKEY de contenido de carbono orgánico del suelo (tha^{-1}) en tres sistemas de uso del suelo, (promedio \pm error estándar).....	22
8. ANOVA almacenamiento de carbono en biomasa radicular en tres sistemas de uso del suelo	23
9. TUKEY contenido de carbono en la biomasa radicular (tha^{-1}) en tres sistemas de uso del suelo, (promedio \pm error estándar).....	24
10. Almacenamiento total de carbono orgánico (tha^{-1}) en tres sistemas de uso del suelo (sumatoria de todas las fracciones).....	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Metodología de muestreo (ICRAF, 2009).....	14
2. Subparcela para la colecta de muestras de suelo.....	16
3. Colecta de muestras de suelos a tres profundidades (0 – 30 cm).....	17
4. Dimensiones del cilindro metálico para determinar densidad aparente del suelo.	17
5. Carbono orgánico en biomasa herbácea (t ha-1) en tres sistemas de uso del suelo	20
6. Carbono orgánico en biomasa de hojarasca (t ha-1) en tres sistemas de uso del suelo ..	21
7. Carbono orgánico del suelo (tha-1) en tres sistemas de uso del suelo	23
8. Carbono orgánico radicular (t ha-1) en tres sistemas de uso del suelo	24
9. Carbono orgánico total (t ha-1) en tres sistemas de uso del suelo	26

RESUMEN

El cambio climático constituye una de las principales amenazas ambientales a nivel global, siendo los gases de efecto invernadero (GEI), especialmente el dióxido de carbono (CO₂), los principales responsables de este fenómeno. El suelo cumple un rol importante en el ciclo del carbono, funcionando como sumidero natural a través de la captura y almacenamiento de carbono en la biomasa vegetal y en la materia orgánica del suelo.

La presente investigación tuvo como objetivo estimar el carbono almacenado en tres sistemas de uso del suelo: soto bosque (purma baja), *Theobroma cacao* L. (cacao) y *Musa* sp. (plátano), en el distrito La Morada, provincia de Marañón – Huánuco. Para ello, se cuantificó el carbono contenido en la biomasa aérea (herbácea y hojarasca), en el sistema radicular y en el suelo. Se aplicó un diseño completamente al azar con diez repeticiones por sistema y el análisis estadístico se realizó con ANOVA y prueba de Tukey al 5% de significancia.

Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre los sistemas evaluados. El sistema con soto bosque (purma baja) presentó el mayor almacenamiento total de carbono (121,36 t ha⁻¹), seguido por el sistema de cacao (112,27 t ha⁻¹) y plátano (95,64 t ha⁻¹). Se concluye que el sistema con soto bosque posee mayor capacidad de captación de carbono, representando una estrategia eficaz frente al cambio climático y aportando a los servicios ecosistémicos de la zona.

Palabras clave: carbono, cambio climático, biomasa, suelo, purma baja, cacao, plátano.

ABSTRACT

Climate change is one of the main global environmental threats, with greenhouse gases (GHGs), especially carbon dioxide (CO₂), being the main cause of this phenomenon. Soil plays an important role in the carbon cycle, functioning as a natural sink through the capture and storage of carbon in plant biomass and soil organic matter.

This research aimed to estimate the carbon stored in three land-use systems: undergrowth (lowland forest), *Theobroma cacao* L. (cocoa), and *Musa sp.* (banana), in the La Morada district, Marañón province, Huánuco. To this end, the carbon contained in aboveground biomass (herbs and litter), in the root system, and in the soil was quantified. A completely randomized design with ten replications per system was applied, and statistical analysis was performed using ANOVA and Tukey's test at a 5% significance level.

The results showed significant differences among the evaluated systems. The secondary forest system (purma baja) had the highest total carbon storage (121.36 t ha⁻¹), followed by the cacao system (112.27 t ha⁻¹) and the banana system (95.64 t ha⁻¹). It is concluded that the secondary forest system has a higher carbon sequestration capacity, representing an effective strategy to mitigate climate change and contributing to ecosystem services in the region.

Keywords: carbon, climate change, biomass, soil, secondary forest, cacao, banana.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático (CC) es un fenómeno sistémico impulsado por el incremento de gases de efecto invernadero (GEI). En este contexto, el suelo cumple un rol crítico como sumidero de carbono (C) al almacenarlo en la biomasa y en la materia orgánica del suelo (MOS). La cuantificación de las reservas de C en distintos sistemas de uso del suelo permite evaluar su contribución a la mitigación del CC y orientar decisiones de manejo sostenible. En la Amazonía peruana, soto bosque (purma baja), *Theobroma cacao* L. (cacao) y *Musa* sp. (plátano) son arreglos frecuentes cuyo potencial de almacenamiento de C requiere ser medido y comparado bajo condiciones locales.

La información cuantitativa y comparativa del carbono total almacenado en purma baja, cacao y plátano en el distrito La Morada es insuficiente para sustentar decisiones de manejo de suelos y para valorar su aporte a la mitigación del CC.

Ante ello, surge la interrogante: ¿El sistema con soto bosque (purma baja) almacena mayor carbono total que los sistemas con cacao y con plátano en el distrito La Morada (provincia de Marañón, Huánuco–Perú)?

La investigación se justifica científica y técnica: (i) provee líneas base de C por fracciones (herbácea, hojarasca, raíces y suelo), (ii) permite comparar arreglos productivos locales con criterios estadísticos, y (iii) aporta evidencia para gestión del territorio, restauración y potenciales esquemas de servicios ecosistémicos. Metodológicamente, estandariza mediciones y unidades ($t\ ha^{-1}$), facilitando replicabilidad y seguimiento.

El alcance de la investigación es espacial, debido a que la evaluación se realizó en un predio del distrito La Morada (provincia de Marañón, Huánuco), en tres sistemas: soto bosque (purma baja), cacao y plátano; se registraron coordenadas y superficies para control de muestreo. La ejecución del proyecto abarcó junio–diciembre de 2024. Se cuantificó C en cuatro fracciones: biomasa aérea no leñosa (herbácea), hojarasca, biomasa radicular y carbono orgánico del suelo (COS). El COS se evaluó en 0–30 cm (agregación de 0–10, 10–20 y 20–30 cm). El carbono total por sistema se obtuvo como suma de fracciones. Los procedimientos se basaron en ICRAF/Winrock (Rügnitz et al., 2009; MacDicken, 1997). Se empleó un diseño completamente aleatorizado (DCA) con tres tratamientos (sistemas) y diez repeticiones por tratamiento; el análisis consideró ANOVA y Tukey ($\alpha = 0,05$).

1.1. Hipótesis

H_0 (nula): No existen diferencias estadísticamente significativas en el carbono total almacenado entre soto bosque (purma baja), cacao y plátano.

H_a (alternativa): El sistema con soto bosque (purma baja) almacena mayor cantidad de

carbono total que los sistemas con cacao y plátano.

Respecto a este contexto se plantean los siguientes objetivos:

1.2. Objetivo general

Estimar el carbono almacenado en tres sistemas de uso del suelo (soto bosque –purma baja–, *Theobroma cacao* L. y *Musa* sp.) y evaluar su comportamiento frente al cambio climático en el distrito La Morada, provincia de Marañón, Huánuco–Perú.

1.3. Objetivos específicos

- Cuantificar el carbono contenido en la biomasa aérea no leñosa (herbácea) y en la hojarasca en los tres sistemas.
- Cuantificar el carbono de la biomasa radicular y el carbono orgánico del suelo (COS) a 0–10, 10–20 y 20–30 cm de profundidad en los tres sistemas.
- Estimar el almacenamiento total de carbono por sistema como suma de todas las fracciones (herbácea, hojarasca, raíces y suelo).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. El carbono (C)

El carbono es un elemento esencial de los sistemas terrestres y circula entre atmósfera, vegetación y suelos, donde la materia orgánica del suelo (MOS) constituye un reservorio crítico para la productividad y la regulación de flujos de GEI. En el suelo, el C se localiza en residuos orgánicos, humus y formas condensadas, integrando procesos de entrada (fotosíntesis y aportes de residuos) y salida (respiración microbiana y mineralización).

El carbono circula a través de los océanos, la atmósfera, el suelo y el subsuelo, que actúan como reservorios. En el suelo, se encuentra en residuos orgánicos, humus y formas condensadas. Su renovación atmosférica ocurre cada 20 años mediante la respiración de las plantas y la actividad microbiana del suelo. Mediante la fotosíntesis, las plantas capturan el CO₂ del aire y liberan oxígeno gracias a la clorofila (FAO, 2017; IPCC, 2021).

Los tipos de carbonos son:

2.1.1.1. Carbono orgánico

La fracción orgánica del C del suelo participa en procesos físicos, químicos y biológicos clave, sosteniendo la fertilidad y la estabilidad estructural; su magnitud y calidad dependen del uso del suelo, clima y manejo (FAO, 2017; FAO, 2020; Lal, 2010).

2.1.1.2. Carbono inorgánico

El C inorgánico, principalmente como carbonatos, es más estable y su dinámica está condicionada por factores geoquímicos y climáticos (FAO, 2017; IPCC, 2021).

2.1.2. El ciclo del carbono

El ciclo del C articula procesos de fijación fotosintética de CO₂, transferencia a biomasa aérea y subterránea, aporte de residuos al suelo y respiración/microdescomposición que devuelve CO₂ a la atmósfera. Su balance neto depende del uso del suelo y manejo; transiciones hacia coberturas con mayor estratificación vegetal y retorno de residuos tienden a aumentar stocks de C, mientras que la conversión a usos agrícolas intensivos los reduce (IPCC, 2021; FAO, 2017).

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

El depósito de C orgánico del suelo es el más grande que interactúa con la atmósfera, estimándose en 1500 Pg C a 1 m de profundidad (2456 Pg a 2 m). Ávila (2001) El carbono inorgánico, principalmente como carbonato de calcio, representa alrededor de 1700 Pg, pero se almacena en formas más estables. La vegetación (650 Pg) y la atmósfera (750 Pg) retienen considerablemente menos carbono. Los flujos entre el C orgánico del suelo/terrestre y la atmósfera son significativos, actuando como sumideros de carbono (captura) o fuentes (emisiones de CO₂) (Lal, 2010; IPCC, 2021).

Los suelos constituyen un gran reservorio y pueden comportarse como sumidero o fuente de CO₂ según el manejo (Lal, 2010; FAO, 2017; MINAM, 2016). En trópicos húmedos, la cobertura permanente, el reciclaje de hojarasca y el bajo disturbio favorecen la acumulación de C en la fracción activa y estable del suelo (IPCC, 2021; FAO, 2020).

2.1.3. El carbono del suelo y su relación con el cambio climático

El carbono orgánico del suelo (COS) contribuye a la mitigación del CC al retener CO₂ atmosférico en la matriz edáfica. Cambios de uso (deforestación, labranza intensiva) y manejo inadecuado aceleran pérdidas de COS; en contraste, bosques secundarios y sistemas agroforestales aumentan entradas de C vía biomasa y hojarasca (IPCC, 2021; MINAM, 2019; Don et al., 2011).

2.1.4. Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) son gases atmosféricos que atrapan la radiación terrestre. Aunque las concentraciones atmosféricas de GEI suelen ser relativamente constantes debido al equilibrio entre producción y consumo, han aumentado significativamente en el último siglo. Este aumento se debe principalmente al consumo de combustibles fósiles (CO₂) y a las actividades agroforestales (CH₄ y N₂O), que contribuyen con más del 25% al efecto invernadero (Watts et al., 2015). La quema de residuos agrícolas también libera carbono del suelo a la atmósfera como CO₂ (Ruiz, 2015). Las emisiones continuas de GEI, tanto de origen natural como antropogénico, intensifican el calentamiento global al absorber más radiación de la que emiten (CEPSA, 2015).

Los principales GEI relacionados con sistemas terrestres son CO₂, CH₄ y N₂O. Sus concentraciones y vida media determinan su forzamiento radiativo; la agricultura, el cambio de uso y la silvicultura (USCUSS) son fuentes relevantes en el Perú (MINAM, 2016;

IPCC, 2021).

En el Perú, las principales fuentes de emisión de GEI son el Uso de Suelo, Cambio de Uso del Suelo y Silvicultura (USCUSS), la Energía y la Agricultura, contribuyendo con alrededor del 92% de las emisiones totales (MINAM, 2016). El impacto climático de estos gases depende de su concentración, tiempo de permanencia en la atmósfera y su influencia en la temperatura global (CEPSA, 2015).

2.1.5. El dióxido de carbono (CO₂)

El CO₂, un subproducto de la combustión de MO es reconocido globalmente como un GEI. Su acumulación en la atmósfera impide la liberación de calor terrestre, contribuyendo al calentamiento global (Ruiz, 2015).

El CO₂ es el GEI de mayor contribución antropogénica; su aumento proviene principalmente de la combustión de combustibles fósiles y del cambio de uso del suelo. Los ecosistemas forestales y agroforestales funcionan como sumideros al fijar C en biomasa y suelo; su eficacia depende de clima, composición y manejo (IPCC, 2021; Segura & Kanninen, 2002; Montagnini & Nair, 2004).

2.1.6. Almacenamiento de carbono

El almacenamiento total se distribuye entre biomasa aérea, biomasa subterránea, necromasa/hojarasca y C del suelo. En trópicos, sistemas siempreverdes y arreglos agroforestales presentan altas reservas, con variaciones por edad, densidad y manejo (Segura & Kanninen, 2002; Montagnini & Nair, 2004). (Unidad: t ha⁻¹).

2.1.7. Inventarios de carbono

Los inventarios cuantifican los depósitos (biomasa, hojarasca, raíces y suelo) con metodologías comparables; su selección depende del objetivo y relación costo-precisión (Rügnitz et al., 2009; MacDicken, 1997).

2.1.8. Monitoreo del almacenamiento de carbono

El monitoreo se apoya en parcelas permanentes de muestreo (PPM) y protocolos estandarizados para evaluar variación temporal de la biomasa y el suelo, facilitando la verificación de cambios y la comparabilidad entre sitios (Rügnitz et al., 2009).

2.1.9. Componentes del almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles

Los sistemas agroforestales y bosques secundarios almacenan C en biomasa aérea, hojarasca, raíces y suelo; su desempeño depende de la estratificación vegetal, el retorno de residuos y el bajo disturbio (Snowdon et al., 2001; Montagnini & Nair, 2004; Don et al., 2011).

Diversos estudios han demostrado que los sistemas agroforestales y los bosques secundarios tienen un alto potencial para almacenar C, tanto en la biomasa aérea como en la tierra. De acuerdo con Montagnini & Nair (2004), los sistemas agroforestales bien manejados contribuyen significativamente a la mitigación del cambio climático, al promover la acumulación de C en los componentes vegetales y edáficos del ecosistema. Por su parte, los sistemas agrícolas convencionales, especialmente aquellos que implican la deforestación y el uso intensivo de agroquímicos, tienden a reducir la capacidad de la tierra que actúan como sumidero de C (Don et al., 2011).

La biomasa sobre la tierra se compone básicamente de biomasa leñosa y herbácea (pastos, leguminosas, hierbas y estados juveniles). En sistemas silvopastoriles, el componente herbáceo principal es la pastura. Para reflejar su variabilidad, los puntos de muestreo de la biomasa herbácea deben ubicarse a distintas distancias de los árboles, y se cuantifica por marcos de muestreo de 50 x 50 cm (López et al., 1999).

La hojarasca, formada por residuos orgánicos (hojas, ramas, frutos y semillas) en la superficie del suelo, se cuantifica de forma parecida a la biomasa herbácea. Los sistemas radiculares, que representan del 10 al 40% de la biomasa total, constituyen otro reservorio de carbono bajo el suelo. Su muestreo se realiza comúnmente con barrenos, separando las raíces del suelo y estimando su biomasa por especies, estratificando la tierra según la profundidad, ya que la mayor densidad de raíces finas están en los horizontes superficiales (Burbano, 2018).

El carbono orgánico en suelos, aunque de gran importancia por su capacidad de acumulación, a menudo se ignora en los proyectos de carbono, ya que las negociaciones actuales no lo incluyen al no ser tan visible como la biomasa aérea (IPCC, 1996).

2.1.10. El cambio climático

Constituye un importante desafío ambiental, impulsado por el incremento de los niveles de GEI de origen antropogénico principalmente CO₂, CH₄ y N₂O, lo que ocasiona un incremento de la temperatura media global. El rol del suelo como sumidero de carbono es crucial en esta dinámica. Se prevé que este efecto se intensifique en las próximas décadas, lo que genera preocupación mundial (Vela et al., 2012; MINAM, 2016; Orellana et al., 2012; Burbano-Orejuela, 2018).

El CC se explica por el incremento de GEI de origen antropogénico; su mitigación requiere sumideros robustos y prácticas de manejo sostenible del suelo. Las

políticas nacionales reconocen a USCUS y Agricultura como sectores clave para la reducción de emisiones en Perú (IPCC, 2021; MINAM, 2016; MINAM, 2019).

Este factor es una de las amenazas más relevantes a nivel mundial, ya que sus efectos impactan en la biodiversidad, la actividad agrícola, los recursos hídricos y, en general, en el bienestar humano. En este contexto, el ciclo del carbono ha adquirido gran relevancia, debido al papel que desempeña en la regulación de los GEI, principalmente el CO₂, que es uno de los responsables primordiales del calentamiento global (IPCC, 2021).

2.1.11. El suelo

El suelo es un sistema trifásico (sólido, líquido, gaseoso) con componentes minerales y orgánicos cuya estructura, porosidad y MOS controlan la retención de C y la provisión de servicios ecosistémicos. Mantener cobertura y aportes de residuos favorece la estabilización del C (FAO, 2020; Lal, 2010).

El suelo, por su parte, actúa como un reservorio natural de carbono, ya que es capaz de acumular grandes porporciones en su estructura y en la materia orgánica que contiene. Según Lal (2010), los suelos pueden contener hasta tres veces más carbono que la atmósfera, por lo que su preservación y uso adecuado son fundamentales mitigando el cambio climático. La captura de C en tierras depende de múltiples factores, entre ellos: el tipo de uso del suelo, el manejo agrícola, el contenido de MO, la vegetación y las condiciones climáticas (FAO, 2020).

2.1.12. Componentes del suelo

Los componentes minerales, orgánicos, agua y aire interactúan con la biota para dar lugar a propiedades emergentes (agregación, CIC, estabilidad) que condicionan la capacidad de almacenamiento de C y su resiliencia frente a perturbaciones (FAO, 2017; FAO, 2020).

En el Perú, investigaciones realizadas en regiones amazónicas han evidenciado la importancia de conservar los bosques secundarios o purmas, ya que estos contribuyen al secuestro de carbono y a la regeneración natural de los ecosistemas (MINAM, 2019). Asimismo, cultivos como el cacao (*Theobroma cacao* L.) y el plátano (*Musa* sp.) desempeñan un rol necesario al capturar carbono, especialmente cuando son manejados bajo prácticas sostenibles y en asociación con especies forestales o leguminosas que mejoren la calidad del suelo (Pardé et al., 2018).

Por lo tanto, evaluar la cantidad de C retenido en distintos sistemas de

manejo de la tierra permite identificar estrategias que favorezcan la sostenibilidad ambiental y la resiliencia frente al cambio climático. Este conocimiento es crucial para orientar políticas públicas, programas de conservación y esquemas de compensación por servicios ecosistémicos en regiones vulnerables como la Amazonía peruana.

2.2. Estado del arte

2.2.1. Antecedentes

Mariño (2013) en Tingo María realizó estimaciones del almacenamiento de C en sistemas con establecimientos de parcelas de arroz bajo dos sistemas de siembra. El primer sistema consistió la parcela de arroz bajo riego el cual reportó una reserva de carbono total de 41,20 tC/ha, mientras que el sistema de cultivo en secano reportó una reserva total de 57,40 tC/ha.

En el distrito de José Crespo y Castillo - Aucayacu, Hidalgo (2014) estimó que el almacenamiento total de C en un cultivo de maíz es de 35,66 t C ha⁻¹, compuesto por biomasa (0,86 t C ha⁻¹, 2,41%) y suelo (34,80 t C ha⁻¹, 97,59%). El estudio evaluó la relación entre el almacenamiento de C (variable dependiente no cuantitativa) y características meteorológicas (altura de la planta, temperatura, humedad y radiación solar) por cuatro estadios vegetativos del maíz. Mediante el modelo Gompit, se determinó que la acumulación de C en 240 plantaciones de maíz es de aproximadamente 0,85%. El coeficiente de definición de McFadden (R-squared) indica que el 92,85% de las variables independientes influyen significativamente ($p < 0,05$) en el almacenamiento de carbono.

Burbano-Orjuela (2018) argumenta que el cambio climático es un desafío ambiental global, pero destaca el potencial de los suelos para mitigar sus efectos. El artículo analiza la capacidad de tierra acumula C en el contexto del ciclo del C y el cambio climático, haciendo hincapié en una iniciativa global centrada en la gestión del suelo.

Duche y Llugsa (2020) investigaron el COS en Yasipan y Atillo a profundidades de 0 - 30 cm y de 30-60 cm, así como la biomasa aérea (paja) y subterránea (raíz de paja). Utilizando un diseño de muestreo factorial balanceado con 72 puntos de monitoreo en altitudes de 3400 a 4200 m.s.n.m., recolectaron y analizaron muestras de suelo (pérdida por ignición) y biomasa (pérdida de humedad). El ANOVA reveló que los valores de COS se vieron significativamente influenciados por la profundidad, el tramo altitudinal y la ubicación. La biomasa aérea se vio afectada significativamente por el piso altitudinal, mientras que la biomasa subterránea se vio afectada por la ubicación. El contenido de COS fue del 12 % en Atillo y del 2,5 % en Yasipan. En cuanto a la profundidad, el COS fue del 7,5

% a 0-30 cm y del 8,5 % a 30-60 cm. El COS tendió a aumentar a altitudes de 4000-4200 m.s.n.m. (11 %). Si bien los valores de COS fueron relativamente similares entre las profundidades, la diferencia estadística fue significativa. El contenido de C en la biomasa de Atillo y Yasipan fue alto en comparación con el contenido de C de la tierra. Esta investigación indica que los suelos y la biomasa de los páramos andinos sirven como sumideros naturales de carbono, contribuye a mitigar el cambio climático.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El estudio se realizó en un predio del distrito La Morada (provincia de Marañón, Huánuco–Perú), con tres sistemas de uso del suelo: soto bosque (purma baja), *Theobroma cacao* L. (cacao) y *Musa sp.* (plátano). Se registraron coordenadas UTM y superficies para cada sistema. Las coordenadas UTM fueron registradas para cada sistema, permitiendo su ubicación georreferenciada.

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

Propietario	Cultivo	Altitud (msnm)	Este	Norte	Área (ha)
	Soto Bosque (purma)	644	359662	9026609	4,00
Conversión Flores Rodríguez	<i>Theobroma cacao</i> L. (cacao)	608	359822	9026591	2,00
	<i>Musa sp.</i> (plátano)	1441	359786	9026586	1,0

3.1.1. Condiciones climáticas

La zona presenta un clima tropical húmedo, con temperaturas promedio de 29 °C, alcanzando máximas de hasta 32 °C y mínimas de 18 °C. La precipitación media anual es de aproximadamente 521 mm, con lluvias más intensas entre los meses de octubre y abril (Morales, 2021).

3.1.2. Ecología

De acuerdo con el mapa ecológico y la clasificación de las zonas de vida, el área pertenece a la zona de vida de bosque húmedo premontano tropical (bh-PMT), en transición hacia bosque húmedo tropical (bh-T), según la clasificación de Holdridge (1987).

3.1.3. Suelo

Los suelos predominantes presentan texturas arcillosas a franco-arcillosas, con baja fertilidad natural, moderadamente ácidos y con bajo contenido de materia orgánica. La fisiografía corresponde a terrazas coluvio-aluviales con pendientes de entre 2 % y 15 %.

3.1.4. Topografía

La topografía del distrito es relativamente plana, el relieve se caracteriza por ofrecer una configuración topográfica con un relieve casi dominante con pendientes de regulares dimensiones, características propias de la selva.

3.1.5. Accesibilidad

Acceso vía terrestre es a través de la carretera Fernando Belaúnde Terry, aproximadamente a 195 km de distancia desde la ciudad de Tingo María hasta la ciudad de Tocache.

3.1.6. Descripción de los sistemas de uso del suelo

El sistema de uso purma o soto bosque, el cambio de uso de bosque a purma se realizó hace catorce años aproximadamente y se encuentra en un proceso de transición, se localiza a una altitud de 644 msnm. Con presencia de especies arbóreas que tipifican el área como *Cecropia membranacea* (cético), *Trema micrantha* (atadijo), *Micrandra spruceana* (higuerilla), *Parkia multijuga* (pashaco), *Alchornea glandulosa*, *Tapirira guianensis*, *Mabea nitida*, *Cecropia sciadophylla*, *Miconia poeppigii*, *Nectandra brittonii*, *Vismia macrophylla*, *Piptocoma discolor*, *Aparisthium cordatum*, *Alchornea triplinervia*, *Iriartea deltoidea*, *Oenocarpus bataua*, y algunas lianas presentes en esta, estrato bajo como herbáceas presentes se encuentran las especies gramíneas, Cyperáceas, Helechos/Pteridófitas, Dicot. herbáceas y otros.

El sistema de uso *Theobroma cacao* (cacao) de la variedad CCN51. Se encuentra a una altitud de 608 msnm, en producción y fue sembrada aproximadamente hace 2 años. estrato bajo como herbáceas presentes se encuentran las especies gramíneas, *Desmodium* sp., *Solanum* sp., *Acalypha macrostachya*, *Macrocnemum roseum*, malezas y hierbas

El sistema de uso *Musa sp* (plátano). Se encuentra a una altitud de 1441 msnm, con especies establecidas de 18 meses aproximadamente, estrato bajo como herbáceas presentes se encuentran las especies gramíneas, *Vernonanthura patens*, *Pouraqueiba sericea*, *Paspalum* sp., malezas y hierbas, las cuales son especies comunes o frecuentes encontradas en el área evaluada.

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales

Se incluyeron: cuadrantes de muestreo, bolsas de muestreo, machetes, baldes, rafia de colores, costales, cilindros de aluminio, entre otros.

3.2.2. Equipos

Para las mediciones se emplearon equipos como GPS, cámara digital, balanza digital, horno secador y flexómetro.

3.3. Generalidades de la investigación

3.3.1. Enfoque de investigación

El enfoque de la investigación fue cuantitativo, ya que buscó medir y determinar numéricamente la cantidad de carbono almacenado en el suelo, en la biomasa de raíces, hojarasca y herbáceas, utilizando datos recolectados de campo y analizados en laboratorio (Supo y Caverro, 2014).

3.3.2. Tipo de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, porque utilizó conocimientos científicos para resolver un problema práctico: cuantificar el carbono del suelo en los sistemas de uso sotobosque (purma), cacao y plátano (Supo y Caverro, 2014).

3.3.3. Nivel de la investigación

De acuerdo con la clasificación de Supo y Caverro (2014), esta investigación fue de tipo descriptivo, comparativo, porque se enfocó en la explicación de un fenómeno, como es el uso de los tres sistemas de uso y su efecto sobre la cuantificación del carbono en el suelo.

3.3.4. Diseño de la investigación

De acuerdo con Supo y Caverro (2014), el diseño de investigación es no experimental, transversal y comparativo, porque no se manipularon deliberadamente las variables, sino porque se observó y analizó tal como ocurrió en su contexto natural. En este caso, el estudio fue transversal porque la recolección de datos se realizó en un único momento en el tiempo, y es comparativo porque buscó contrastar los valores de carbono entre los tres sistemas de uso del suelo.

3.3.5. Población y muestra

La población es toda el área de los sistemas de uso del suelo. La muestra fueron las dos parcelas de soto bosque (purma), cacao y plátano, cada una de 1 ha.

3.3.6. Variables evaluadas

Para el estudio fueron considerados las siguientes variables dependientes e independientes:

- **Variables independientes:** sistemas de uso del suelo (purma baja, cacao y plátano).

Variables dependientes: es el carbono almacenado en raíces, hojarasca y suelo. Carbono en raíces (g/m^2 o Mg/ha), hojarasca (g/m^2 o Mg/ha), herbácea (g/m^2 o Mg/ha), y en el suelo (% o g/kg).

3.3.7. 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 las parcelas permanentes de medición.

El instrumento de recolección fue una ficha de campo y laboratorio, diseñada para anotar los datos correspondientes a cada componente evaluado (suelo, raíces, biomasa herbácea 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.

3.3.8. Análisis e interpretación de resultados

Se realizó el muestreo y análisis de suelos a tres profundidades de 0 – 10 cm, 10 cm a 20 cm y de 20 cm a 30 cm, donde se evaluó la compactación, densidad aparente, biomasa de las hojarasca y las raíces, actividades que se realizó entre un periodo de seis meses. Para la contrastación de hipótesis, el modelo experimental en el diseño fue con muestras diferentes.

Para el análisis estadístico, se empleó la prueba t de Student para muestras independientes, con el fin de comparar el carbono almacenado entre los tres sistemas de uso del suelo. Se verificó previamente la normalidad de los datos (prueba de Shapiro-Wilk) y la homogeneidad de varianzas (prueba de Levene). Se consideró un nivel de significancia de $p < 0.05$

Los resultados permitieron interpretar la dinámica de almacenamiento de carbono en función los sistemas de uso y los componentes del suelo (raíces, hojarasca, biomasa herbácea y el propio suelo). Esto ayudó a valorar el papel de los sistemas de uso en la mitigación del cambio climático a través del secuestro de carbono.

3.4. Metodología

3.4.1. Estimar el carbono de la biomasa sobre el suelo (herbácea y hojarasca) en tres sistemas con soto bosque (purma baja), *Theobroma cacao* L. (cacao) y *Musa Sp.* (plátano), distrito la Morada - Cholón

La metodología desarrollada para la estimación de C en tres sistemas con soto bosque (purma baja), *Theobroma cacao* L. (cacao) y *Musa Sp.* (plátano) fue realizada en función del protocolo propuesta por el Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) (Rügnitz *et al.*, 2009), por la Winrock International Institute For Agricultural Development

(WINROCK) (Macdicken, 1997).

- Estratificación del área de estudio

Para desarrollar el estudio se hizo se reconocimiento de acuerdo con el mapa de ubicación y seleccionaron tres sistemas, soto bosque (purma baja), *Theobroma cacao* L. (cacao) y *Musa Sp.* (plátano) con el propósito de estratificar e identificar puntos de parcelas muestrales. Las tres parcelas presentaron características uniformes de 1 ha, con pendientes de moderadamente (plana) a moderadamente ondulada.

- Colecta de muestras de biomasa hojarasca

Se empleó la metodología sugerida por el Centro Internacional de Investigación Agroforestal (ICRAF) (Rügnitz et al., 2009) y Winrock International Institute For Agricultural Development (WINROCK) (Macdicken, 1997). Para el análisis de biomasa en los tres sistemas, se delimitó una zona de 1000 m². Cada muestra colectada fue correctamente codificada para ser llevado al laboratorio.

Se colectaron toda la hojarasca y fragmento orgánico menor a 4 cm de diámetro que estuvo dentro de un cuadrante de 0.5 m x 0.5 m ubicado en la subparcela de 20 m x 5 m, en total se colectaron diez muestras de hojarasca por cada parcela establecida.

Las muestras de hojarasca fueron pesadas para obtener el peso fresco, luego se colocaron en una bolsa de papel para ser colocada en la estufa a 70 °C por un tiempo de 48 horas (ICRAF, 2009) y después se pesaron y se obtuvo el peso seco de la muestra.

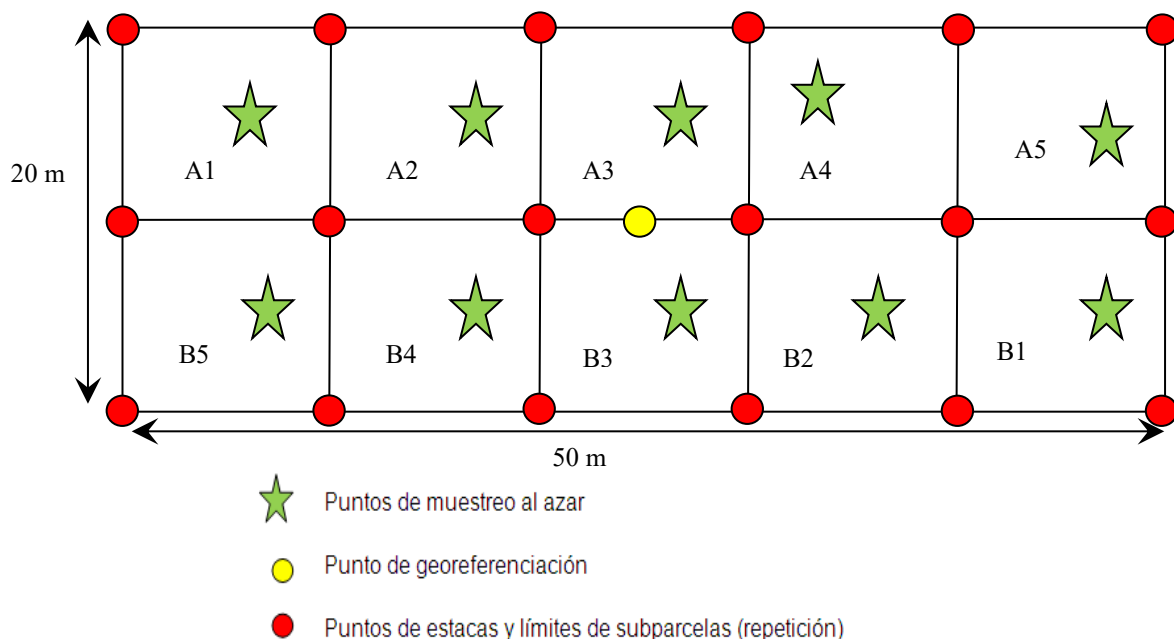


Figura 1. Metodología de muestreo (ICRAF, 2009)

- **Determinación de la biomasa herbácea**

En el caso de la biomasa herbácea, se evaluó de forma independiente a la hojarasca al tratarse de compartimentos distintos: la primera corresponde a vegetación viva de porte bajo y la segunda a materia orgánica muerta. La colecta de herbáceas se realizó dentro de las subparcelas de cada sistema de uso del suelo, delimitando cuadrantes de 0.5×0.5 m en los que se cortó toda la vegetación a ras del suelo. Las muestras fueron pesadas en fresco, secadas en estufa a $65\text{--}70$ °C durante 48 horas hasta peso constante y el valor seco obtenido se convirtió a carbono mediante el factor 0.50 propuesto por el IPCC (2007).

- **Estimación de almacenamiento de carbino en hojarasca**

En la estimación de carbono almacenado en la hojarasca y herbáceas. se utilizó las fórmulas propuestas por (ICRAF, 2009) e (IPCC, 2007).

$$CH = BH \text{ (t/ha}^{-1}\text{)} \times 0.50 \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

CH : Carbono en hojarascas

BH : Biomasa de hojarascas (Diferencia de pesos de hojarascas)

0.50 : Valor propuesto por el IPCC

3.4.2. Estimar el carbono almacenado en los sistemas radiculares y carbono orgánico en el suelo en tres sistemas con soto bosque (purma baja), *Theobroma cacao* L. (cacao) y *Musa Sp.* (plátano), distrito la Morada - Cholón

- **Estratificación del área de estudio**

Para desarrollar el estudio se hizo se reconocimiento de acuerdo con el mapa de ubicación y seleccionaron tres sistemas, soto bosque (purma baja), *Theobroma cacao* L. (cacao) y de *Musa Sp.* (plátano) con el propósito de estratificar e identificar puntos de parcelas muestrales.

- **Colecta de muestras de raíces**

Se empleó la metodología sugerida por el Centro Internacional de Investigación Agroforestal (ICRAF) (Rügnitz et al., 2009) y Winrock International Institute For Agricultural Development (WINROCK) (Macdicken, 1997). Para el análisis de biomasa en los tres sistemas, se delimitó una zona de 1000 m^2 . Cada muestra colectada fue correctamente codificada para ser llevado al laboratorio.

Se realizó una calicata en cada una de las 25 subparcelas de $20 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, con dimensiones de $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ y 20 cm de profundidad, la cual fue subdividida en dos

estratos: 0–10 cm y 10–20 cm. Las muestras recolectadas en cada estrato fueron depositadas en bolsas debidamente rotuladas para su análisis posterior en el laboratorio de suelos (Figura 2).

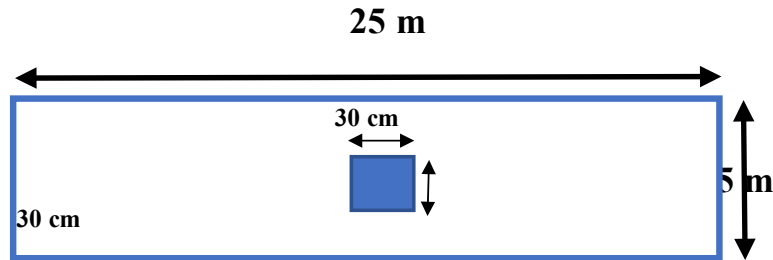


Figura 2. Subparcela para la colecta de muestras de suelo.

- Colecta de datos de suelos

Cada muestra de suelo fue secada al aire libre en sombra por un lapso de 3 días, enseguida fueron tamizadas y pasadas por un tamiz de 2 mm y luego se realizó análisis de porcentaje de materia orgánica (Walkley y Black, 1934).

$$CR = BR \times 0.50 \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

CR : Carbono en raíces (t/ha^{-1}).

BR : Biomasa seca de raíces extrapolada a hectárea, obtenida a partir del peso seco de las muestras por unidad de área de calicata.

0.50 : Fracción de carbono de la biomasa propuesta por IPCC.

- Estimación de almacenamiento de carbono en el suelo

Para definir la estimación del C almacenado en las raíces, se utilizó la metodología propuesta por el ICRAF (Rügnitz *et al.*, 2009) así como la siguiente fórmula:

$$CS = \%C \times Da \times Ps \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

CS : Carbono en el suelo (t/ha^{-1}).

%C : $0.58 \times \% \text{ Materia Orgánica}$.

Da : Densidad aparente (g/cm^3).

Ps : Profundidad del suelo (cm).

Para estimar la DA, se midieron muestras de suelo utilizando el método del cilindro. Este método implica insertar un cilindro metálico en la tierra, extraer un volumen

conocido de la muestra y luego secarlo a 105 °C durante 72 h para definir su peso seco (dm). Luego, el peso seco fue dividido entre el volumen de suelo (el volumen interno del cilindro). Se realizaron diez réplicas para cada sistema. El contenido de COS se estimó utilizando el método de conversión de Walkley y Black (1938), que fue citado por Rügntz et al. (2009) con base en el contenido de MO. Se recolectaron muestras de suelo de cada capa de suelo (0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm) utilizando una barrena. Las muestras de cada capa de suelo se mezclaron bien. Se enviaron 200 g de cada muestra codificada (tipo de sistema de cultivo: plátano de bajo rendimiento, cacao y banano; profundidad) al laboratorio para análisis de materia orgánica.

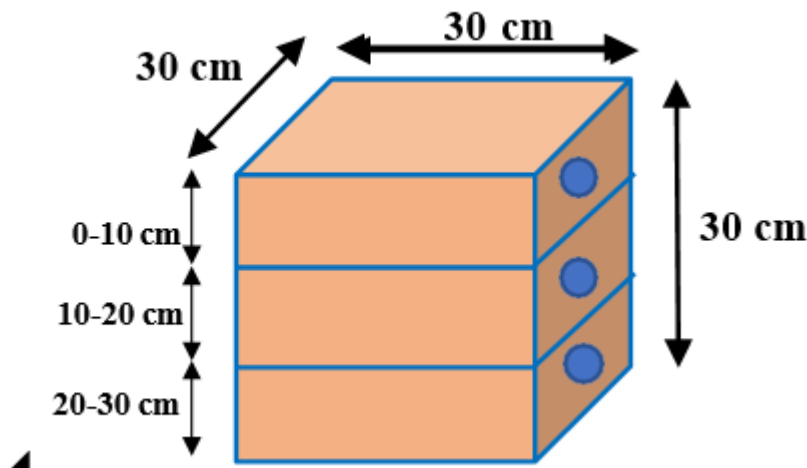


Figura 3. Colecta de muestras de suelos a tres profundidades (0 – 30 cm).

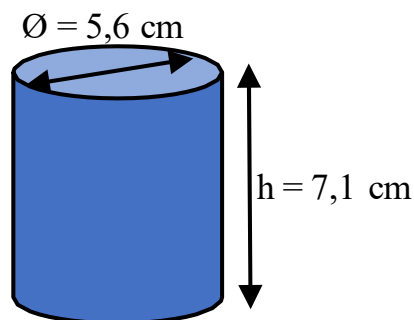


Figura 4. Dimensiones del cilindro metálico para determinar densidad aparente del suelo.

3.4.3. Estimar el almacenamiento total de carbono de los suelos en los sistemas con soto bosque (purma baja), *Theobroma cacao* L. (cacao) y *Musa Sp.* (plátano), distrito la Morada - Cholón

Para definir la proporción de C almacenado por los sistemas (purma baja, cacao y plátano) se desarrolló la siguiente Ecuación:

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

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 (herbáceo y hojarasca) en tres sistemas con soto bosque (purma baja), *Theobroma cacao* L. (cacao) y *Musa Sp.* (plátano), distrito la Morada - Cholón

4.1.1. Carbono orgánico en la biomasa herbácea

Los resultados del ANOVA indicaron diferencias significativas en la acumulación de C orgánico de la biomasa herbácea entre los sistemas de uso del suelo ($p = 0,0012$). La composición mineral del suelo, la textura, la profundidad, la DA y la aireación controlan la captura de carbono (Acuña y Oviedo, 2001; FAO, 2000; Ingram y Fernández, 1999). La producción de biomasa aérea y subterránea, los efectos climáticos directos sobre el suelo y los efectos climáticos indirectos sobre la producción de biomasa limitan el potencial de C del suelo.

Tabla 2. ANOVA del almacenamiento de carbono orgánico en la biomasa herbácea en tres sistemas de uso del suelo

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

La Tabla 2 muestra los valores del ANOVA indicó diferencias significativas entre sistemas ($p = 0,0012$). Mientras que la tabla 5 muestran los promedios (\pm EE) estimados por Tukey ($\alpha = 0,05$) fueron: soto bosque (purma baja) $1,85 \pm 0,12$ t ha⁻¹, cacao $1,62 \pm 0,10$ t ha⁻¹ y plátano $1,43 \pm 0,08$ t ha⁻¹; CV = 10 % y R² = 0,88. Estos resultados evidencian mayor aporte de biomasa herbácea en soto bosque y cacao respecto de plátano, consistente con coberturas de mayor estratificación y menor disturbio. Este patrón coincide con la literatura que reporta mayores entradas de residuos en sistemas forestales/agroforestales frente a cultivos limpios (Montagnini & Nair, 2004; Segura & Kanninen, 2002; Don et al., 2011).

Tabla 3. TUKEY del contenido de carbono en la biomasa herbácea (tha⁻¹) en tres sistemas de uso del suelo, (promedio \pm error estándar)

Sistema de uso	Carbono t/ha	Significancia
Soto bosque (purma baja)	$1,85 \pm 0,12$	a
Cacao	$1,62 \pm 0,10$	b
Plátano	$1,43 \pm 0,08$	c

p-valor	0,0012
CV	10%
R ²	88%

Letras distintas por columnas indican diferencias estadísticas ($\alpha=0.05$), según prueba de Tukey

La Figura 5, muestra el almacenamiento de C orgánico en la biomasa herbácea, mayor almacenamiento se presentan en los sistemas, soto bosque (purma baja) y cacao con 1,85 t ha⁻¹ y 1,62 t ha⁻¹ respectivamente, el plátano presenta un menor almacenamiento con 1,43 t ha⁻¹.

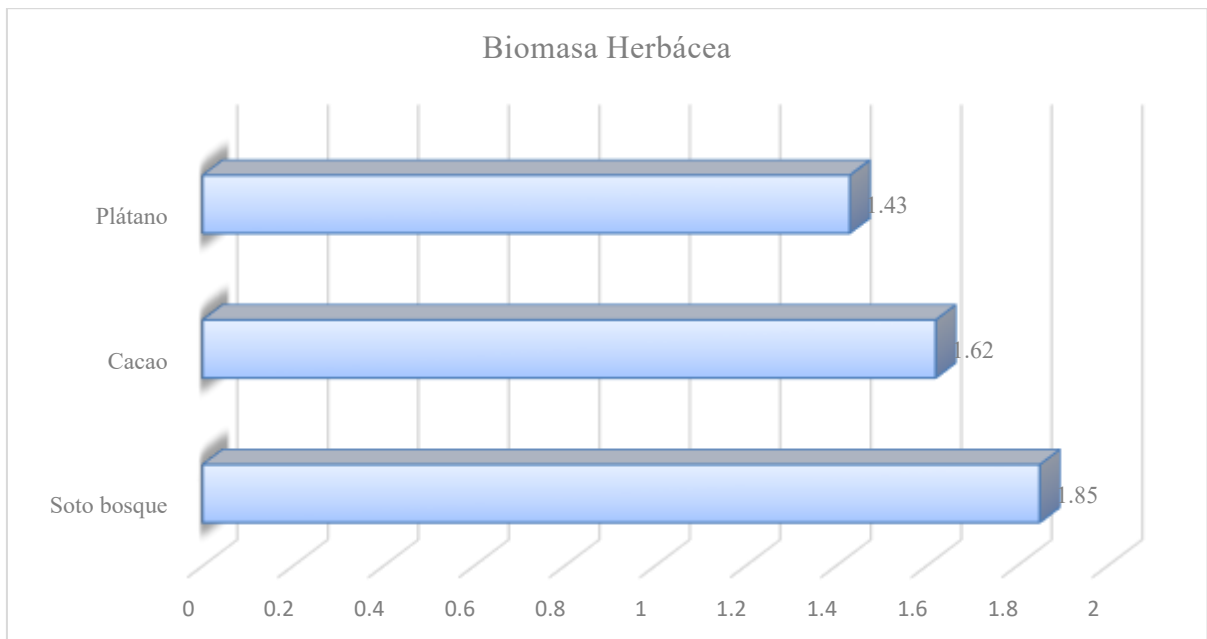


Figura 5. Carbono orgánico en biomasa herbácea (t ha⁻¹) en tres sistemas de uso del suelo

4.1.2. Carbono orgánico en la biomasa de la hojarasca

La Tabla 4, observamos el análisis de la varianza 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 reserva de C orgánico en la hojarasca de los distintos sistemas de uso de suelo evaluados.

Tabla 4. ANOVA 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

El ANOVA para hojarasca mostró diferencias significativas entre sistemas (ver Tabla 4), confirmadas por la prueba de Tukey (Tabla 5). La mayor acumulación de carbono en la necromasa superficial se asocia a (i) mayor cobertura perenne y (ii) reciclaje de residuos característicos de sistemas con estratificación vegetal; en contraste, prácticas de deshierbe intenso reducen el retorno de hojarasca. Esto es congruente con estudios en trópicos que documentan mayores stocks superficiales en coberturas arbóreas y arreglos agroforestales. Presentar los promedios (\pm EE) por sistema, con letras de Tukey ($\alpha = 0,05$), y Figura 3 con barras y error estándar.

Tabla 5. TUKEY del contenido de carbono orgánico en la hojarasca (t ha^{-1}) en tres sistemas de uso del suelo, (promedio \pm error estándar)

Sistema de uso	Carbono t/ha	Significancia
Soto bosque (purma baja)	2,94 \pm 0,15	a
Cacao	2,33 \pm 0,14	b
Plátano	2,10 \pm 0,12	b
p-valor		0,0003
CV		18%
R ²		78%

Letras indican diferencias significativas entre medias según prueba de Tukey($\alpha=0.05$)

La Figura 6, muestran mayor reserva de C orgánico en la biomasa de la hojarasca de los sistemas, soto bosque (purma baja) y cacao con $2,94 \text{ t ha}^{-1}$ y $2,33 \text{ t ha}^{-1}$ respectivamente, menor almacenamiento el sistema plátano con $2,10 \text{ t ha}^{-1}$.

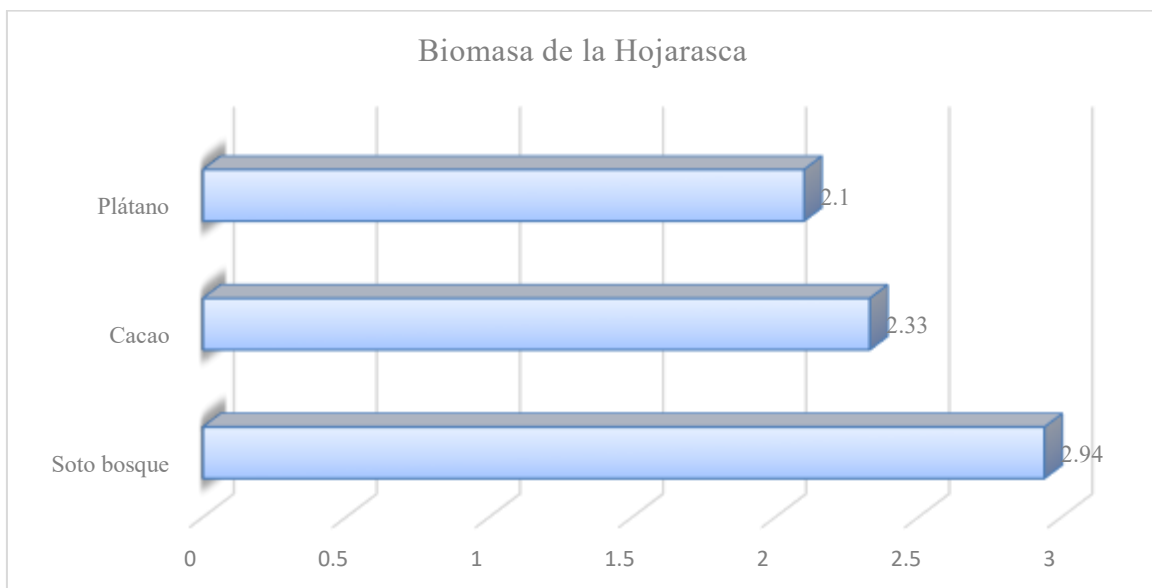


Figura 6. Carbono orgánico en biomasa de hojarasca (t ha^{-1}) en tres sistemas de uso del suelo

4.2. Estimar el carbono almacenado en los sistemas radiculares y carbono orgánico del suelo en tres sistemas con soto bosque (purma baja), *Theobroma cacao* L. (cacao) y *Musa Sp.* (plátano), distrito de Morada - Cholón

4.2.1. Carbono orgánico en el suelo

Tabla 6 muestra un ANOVA significativo ($p < 0,0001$), indicando diferencias estadísticas en el C orgánico de la tierra entre los distintos sistemas de uso analizados. Si bien el suelo es un importante sumidero de C (IPCC, 1996), los proyectos de C a menudo no le prestan suficiente atención, ya que las negociaciones actuales se centran más en la biomasa aérea. Es crucial medir el cambio en el COS a 30 cm de profundidad en el sitio del proyecto, ya que los cambios en el manejo de tierra tienen mayor impacto en las capas superiores.

Tabla 6. ANOVA 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

El ANOVA para COS detectó diferencias entre sistemas (Tabla 6), y Tukey confirmó contrastes de medias (Tabla 7). Reportar los promedios (\pm EE) por sistema y por estrato (0–10; 10–20; 20–30 cm) y la agregación a 0–30 cm en $t\ ha^{-1}$. En sistemas con cobertura permanente y retorno de residuos (soto bosque, cacao bajo manejo con sombreado y mínima alteración del horizonte A) es esperable un mayor stock en los primeros 10–20 cm, donde se concentra la entrada de materia orgánica fina; este comportamiento es consistente con la evidencia en trópicos húmedos.

Tabla 7. TUKEY de contenido de carbono orgánico del suelo (tha^{-1}) en tres sistemas de uso del suelo, (promedio \pm error estándar)

Sistema de uso	Carbono t/ha	Significancia
Soto bosque (purma baja)	112,69 \pm 4,7	a
Cacao	105,20 \pm 4,2	b
Plátano	89,42 \pm 3,9	c
p-valor	<0.0001	
CV	7.25%	
R ²	95%	

Letras distintas por columnas indican diferencias estadísticas ($\alpha=0.05$), según prueba de Tukey

La Figura 7, muestran la retención de C almacenado en la tierra en los diferentes sistemas, mayor almacenamiento de C se presenta en soto bosque (purma baja) con $112,69 \text{ t ha}^{-1}$, seguido del cacao con $105,20 \text{ t ha}^{-1}$ y el plátano con $89,42 \text{ t ha}^{-1}$.

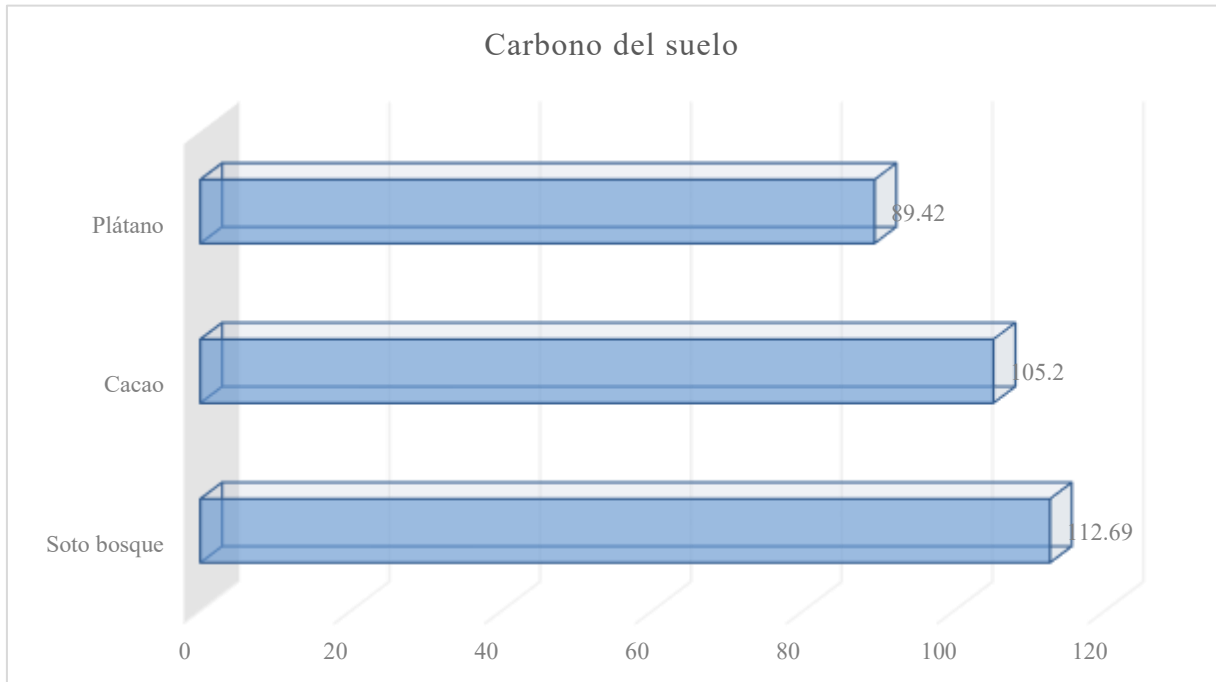


Figura 7. Carbono orgánico del suelo (t ha^{-1}) en tres sistemas de uso del suelo

4.2.2. Carbono orgánico en la biomasa radicular

El ANOVA de la biomasa radicular (Tabla 8) muestra un efecto significativo ($p < 0,0001$), indicando diferencias estadísticas en la reserva de C orgánico entre los distintos sistemas de uso evaluados. Siguiendo a Rüginitz et al. (2009), los inventarios de C ofrecen una evaluación cuantitativa del estado actual de los componentes de C (biomasa, hojarasca, raíces y suelo), permitiendo la comparación entre sitios, sistemas y periodos, como se realizó en esta investigación con soto bosque (purma baja), cacao y plátano.

Tabla 8. ANOVA almacenamiento de carbono en biomasa radicular en tres sistemas de uso del suelo

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

El ANOVA (Tabla 8) indica diferencias entre sistemas; la prueba de Tukey (Tabla 9) discrimina los contrastes. En coberturas con mayor densidad de raíces finas y aporte laminar (como soto bosque), se incrementa la incorporación de C al suelo por rizodeposición

y mortalidad radicular, lo que contribuye a stocks más altos a **0–20 cm**. Presentar los promedios (\pm EE) por sistema, y la Figura 5 (media \pm EE).

Tabla 9. TUKEY contenido de carbono en la biomasa radicular (t ha^{-1}) en tres sistemas de uso del suelo, (promedio \pm error estándar)

Sistema de uso	Carbono t/ha	Significancia
Soto bosque (purma baja)	$8,24 \pm 0,47$	a
Cacao	$5,23 \pm 0,47$	b
Plátano	$3,72 \pm 0,47$	c
p-valor	<0,0001	
CV	17,87%	
R ²	80%	

Letras distintas por columnas indican diferencias estadísticas ($\alpha=0.05$), según prueba de Tukey

La Figura 8, muestra la retención de C orgánico en la biomasa radicular, obteniendo un mayor almacenamiento de carbono el sistema de soto bosque (purma baja) con $8,24 \text{ t ha}^{-1}$, seguidamente el sistema de cacao con $5,23 \text{ t ha}^{-1}$ y el sistema plátano con $3,72 \text{ t ha}^{-1}$.

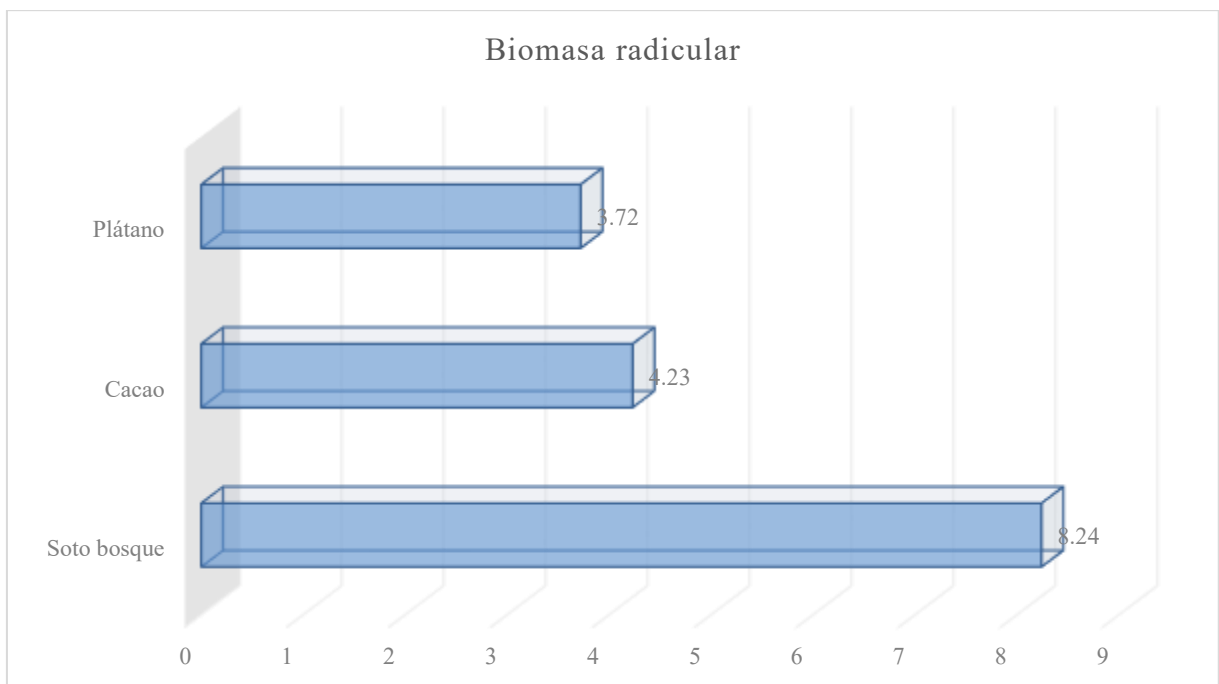


Figura 8. Carbono orgánico radicular (t ha^{-1}) en tres sistemas de uso del suelo

4.3. Estimar el almacenamiento total de carbono de los suelos en los sistemas con soto bosque (purma baja), *Theobroma cacao* L. (cacao) y *Musa Sp.* (plátano), distrito la Morada - Cholón

En la Tabla 10, muestra la sumatoria de fracciones (herbácea + hojarasca + raíz + suelo) evidenció mayor almacenamiento total en soto bosque (purma baja) ($121,36 \text{ t ha}^{-1}$),

seguido de cacao (112,27 t ha⁻¹) y plátano (95,64 t ha⁻¹). Estas diferencias confirman la mayor capacidad de captación y retención de C en coberturas con estratificación vegetativa y bajo disturbio, coherente con la literatura. Incluir Tabla 12 (sumatoria de fracciones) y Figura 6 (media ± EE) con letras de Tukey si se aplicó contraste post hoc al total. Montagnini & Nair (2004) y Segura & Kanninen (2002) señalan tasas superiores de almacenamiento en sistemas forestales/agroforestales frente a cultivos limpios; Don et al. (2011) documentan disminuciones de COS tras conversiones agrícolas intensivas en trópicos.

Herbácea y hojarasca son los sistemas con mayor cobertura y reciclaje de residuos concentran más C superficial (soto bosque, seguido de cacao), mientras que plátano presenta menores valores en herbácea (y potencialmente en hojarasca si el manejo reduce el retorno de residuos).

Raíz y suelo: la rizo deposición y el bajo disturbio favorecen el COS en el estrato 0–20 cm en coberturas perennes.

Total: el orden soto bosque > cacao > plátano en t ha⁻¹ confirma la importancia de mantener coberturas perennes y minimizar disturbios para maximizar stocks de C.

Tabla 10. Almacenamiento total de carbono orgánico (tha⁻¹) en tres sistemas de uso del suelo (sumatoria de todas las fracciones)

Sistema de uso	Suelo	Biomasa radicular	Biomasa herbácea	Hojarasca	Total
	(t ha ⁻¹)	(t ha ⁻¹)	(t ha ⁻¹)	(t ha ⁻¹)	(t ha ⁻¹)
Soto bosque (purma baja)	112,69	3,88	1,85	2,94	121,36
Cacao	105,20	3,12	1,62	2,33	112,27
Plátano	89,42	2,69	1,43	2,10	95,64

La Figura 9, muestra el almacenamiento total de C orgánico en los tres sistemas del suelo, mayor almacenamiento de C se presenta en el sistema de soto bosque (purma baja) con 121,36 t ha⁻¹, seguido del sistema de cacao con 112,27 t ha⁻¹ y el sistema plátano con 95,64 t ha⁻¹.

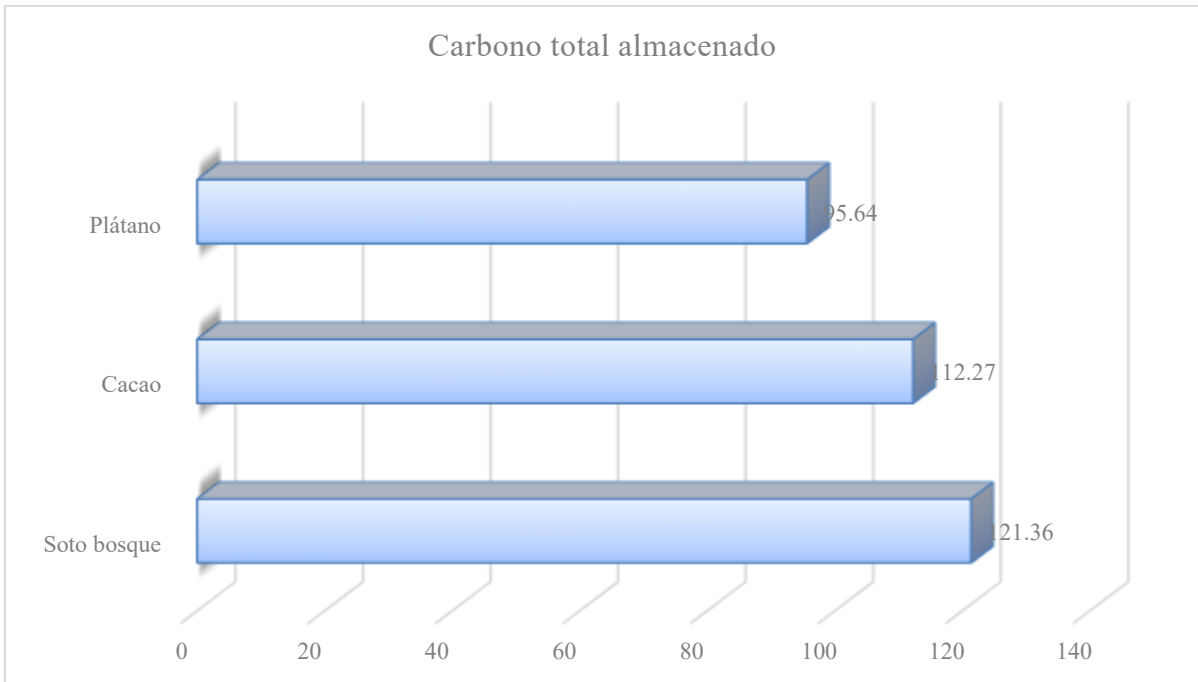


Figura 9. Carbono orgánico total (t ha⁻¹) en tres sistemas de uso del suelo

V. CONCLUSIONES

1. El sistema con soto bosque (purma baja) presentó una mayor capacidad de acumulación de carbono en la biomasa sobre el suelo, tanto en la vegetación herbácea como en la hojarasca, en comparación con los sistemas agrícolas de cacao y plátano.
2. El mayor almacenamiento de carbono en raíces y suelo también fue registrado en el sistema con soto bosque, condición que está influenciada por la cobertura vegetal permanente, la diversidad de especies y menor perturbación del suelo. El COS representó la fracción más significativa del total, evidenciando la necesidad de conservar y manejar adecuadamente estos sistemas para potenciar su rol como sumideros de carbono.
3. El sistema con soto bosque (purma baja) demostró almacenar la mayor cantidad de carbono total ($121,36 \text{ t ha}^{-1}$), superando al cacao ($112,27 \text{ t ha}^{-1}$) y al plátano ($95,64 \text{ t ha}^{-1}$). Estas diferencias, estadísticamente significativas, respaldan la hipótesis planteada y posicionan al soto bosque como una estrategia efectiva para la mitigación del cambio climático mediante del secuestro de carbono.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Dado que el sistema con soto bosque presentó mayor acumulación de carbono en biomasa superficial, se recomienda conservar y restaurar áreas de purma baja, en los cultivos de cacao y plátano se integre vegetación de cobertura y se reduzca la remoción de residuos orgánicos, promoviendo así el aporte constante de hojarasca y material herbáceo para fortalecer el ciclo superficial del carbono.
2. Frente a los mayores valores observados en el soto bosque, se propone aplicar prácticas que mejoren la calidad estructural y biológica del suelo en sistemas agrícolas, como la incorporación de abonos orgánicos, cultivos de cobertura y rotación con especies perennes, así como monitorear periódicamente el contenido de COS como indicador clave de sostenibilidad.
3. Dado que el sistema de purma baja mostró mayor almacenamiento total de carbono, se sugiere incorporar esta tipología de uso del suelo dentro de planes de mitigación al cambio climático, políticas locales de conservación y esquemas de pago por servicios ambientales, así como evaluar el potencial de otros sistemas agroforestales que integren árboles nativos y cultivos para replicar esta funcionalidad en zonas agrícolas.
4. Estas recomendaciones deben ser integradas en un enfoque participativo y articulado entre agricultores, autoridades locales, instituciones de investigación y tomadores de decisiones, asegurando la conservación de los servicios ecosistémicos y el fortalecimiento de la resiliencia climática local.

VII. REFERENCIAS

- Agencia Europea del Medio Ambiente. (2015). *El suelo: un recurso no renovable*.
<https://www.eea.europa.eu/es>
- Burbano, H. (2018). El suelo como sumidero de carbono: una estrategia para mitigar el cambio climático. *Revista Colombiana de Ciencias Ambientales*, 49(2), 112–121.
- Burbano-Orjuela, H. (2018). *El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático*. *Rev. Cienc. Agr.* 35(1): 82-96. doi:
<http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183501.85>.
- Caviglia, O., Díaz-Zorita, M., & Studdert, G. (2016). Dinámica del carbono orgánico en suelos agrícolas: impacto del manejo. *Agro-Ciencia*, 52(1), 77–85.
- Cotler, H., Martínez, M. & Etchevers, J. D. (2016). *Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: investigación y políticas públicas*. Terra Latinoamericana. 34: 125-138.
- Docampo, D. (2010). *Materia orgánica del suelo y su impacto en la fertilidad edáfica*.
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Don, A., Schumacher, J., & Freibauer, A. (2011). Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 17(4), 1658–1670. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>
- Duche, V. B., & Llugsa, M. E. (2020). *Estimación de carbono orgánico total en el suelo y biomasa del páramo andino de Yasipan y Atillo*. [Tesis de grado]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba – Ecuador. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13956>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017). *Soil organic carbon: The hidden potential*. FAO.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). *Global soil organic carbon sequestration potential (GSOCseq)*. FAO.
- Holdridge, L. R. (1987). *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896>

- Lal, R. (2010). Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *Bioscience*, 60(9), 708–721. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.8>
- MacDicken, K. G. (1997). *A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects*. Winrock International.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2016). *Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. MINAM.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2019). *Reporte nacional de bosques y cambio climático: avances y desafíos*. MINAM.
- Montagnini, F., & Nair, P. K. R. (2004). Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 61–62, 281–295. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029005.92691.79>
- Pardé, M., Sánchez, W., & Ramírez, J. (2018). Sistemas agroforestales como alternativa para la adaptación al cambio climático en cafetales y cacaoales del Perú. *Revista Agroforestería en las Américas*, 52, 17–25.
- Rügnitz, M., Chacón, M., & Porro, R. (2009). *Guía de campo para la evaluación de carbono en sistemas forestales y agroforestales de América Latina*. ICRAF/CATIE.
- Segura, M., & Kanninen, M. (2002). *Mitigación del cambio climático y captura de carbono en sistemas forestales y agroforestales*. Serie Técnica–Informe Técnico. CATIE.
- Snowdon, P., Raison, J., Keith, H., & Ritson, P. (2001). *Protocol for sampling tree and stand biomass*. National Carbon Accounting System Technical Report No. 31. Australian Greenhouse Office.
- Supo, F. & Caverro, H. (2014). *Fundamentos teóricos y procedimentales de la investigación científica en ciencias sociales. Como diseñar y formular tesis de Maestría y Doctorado*. Universidad Nacional del Altiplano – Puno y Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez – Juliaca. Lima – Perú. <https://www.felipesupo.com/wp-content/uploads/2020/02/Fundamentos-de-la-Investigaci%C3%B3n-Cient%C3%ADfica.pdf>.
- Vela, G., López, J. & Rodríguez, M. de L. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas*. N° 77: pp 18-30. <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n77/n77a3.pdf>

Verhulst, N., François, I. & Govaerts, B. (2015). *Agricultura de conservación y captura de carbono en el suelo: Entre el mito y la realidad del agricultor*. México: CIMMYT. 16p.

Watts N, Adger WN, Agnolucci P, Blackstock J, Byass P, Cai W. (2015). *Health and climate change: policy responses to protect public health*. *Lancet*. 386 (10006): 1861-914.

Walkley, A., & Black, I. A. (1938). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38.

ANEXO

Anexo 1. Evaluación de datos**Tabla 13.** 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 14. Colecta de datos biomasa soto bosque (purma baja)

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 15. 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 16. 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 17. Colecta de datos biomasa raíz de soto bosque (purma baja)

Raíz - purma		
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 7. Toma de coordenadas del sistema de uso plátano



Figura 8. Recolección de biomasa del sistema de uso plátano



Figura 9. Toma de coordenadas del sistema de uso cacao



Figura 10. Sistema de uso cacao



Figura 11. Recolección de biomasa hojarasca del sistema cacao



Figura 12. Muestras de suelos de los tres sistemas de uso a diferentes profundidades



Figura 13. Sistema de uso purma para biomasa



Figura 14. Cuadrado muestreador sistema de uso purma para biomasa



Figura 15. Peso de muestras de biomasa hojarasca en laboratorio



Figura 16. Secado de muestras de biomasa en estufa del laboratorio