

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA

MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL



**ALMACENAMIENTO DEL CARBONO ORGÁNICO EN SEIS SISTEMAS DE USO
DE LA TIERRA EN TINGO MARÍA - PERÚ**

Tesis

Para optar el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS AGROECOLÓGICAS,
MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL**

PRESENTADO POR:

PEDRO HUERTO VICTORIO

ASESORES:

**JOSÉ LÉVANO CRISÓSTOMO
CASIANO AGUIRRE ESCALANTE**

Tingo María - Perú

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
UNIDAD DE POSGRADO
DIRECCIÓN



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS
Nro. 002-2026-UPG-FRNR-UNAS

En la ciudad universitaria, siendo las 04:00 p.m. del martes 27 de enero del 2026, reunidos de manera presencial en el Auditorio de Segundo Nivel de la Escuela de Posgrado, se instaló el Jurado Calificador a fin de proceder a la sustentación de la tesis titulada:

“ALMACENAMIENTO DEL CARBONO ORGÁNICO EN SEIS SISTEMAS DE USO DE LA TIERRA EN TINGO MARÍA - PERÚ”

A cargo del candidato al Grado de Maestro en Ciencias en Agroecología, mención: Gestión Ambiental PEDRO HUERTO VICTORIO.

Luego de la exposición y absueltas las preguntas de rigor, el Jurado Calificador procedió a emitir su fallo declarando APROBADO con el calificativo de MUY BUENO Acto seguido, a horas 05:30 p.m. el presidente dio por culminada la sustentación; procediéndose a la suscripción de la presente acta por parte de los miembros del jurado, quienes dejan constancia de su firma en señal de conformidad.

.....
Dr. JOSE WILFREDO ZAVALA SOLORZANO
Presidente del Jurado

.....
Dr. LADISEAO RUIZ RENGIFO
Miembro del Jurado

.....
ING. M.Sc. WARREN RIOS GARCIA
Miembro del Jurado

.....
DR. JOSE DOLORES LEVANO CRISOSTOMO
Asesor

.....
DR. CASIANO AGUIRRE ESCALANTE
Asesor



"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 102 - 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:

Maestría en Ciencias en Agroecología Mención: Gestión Ambiental

Tipo de documento:

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

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
ALMACENAMIENTO DEL CARBONO ORGÁNICO EN SEIS SISTEMAS DE USO DE LA TIERRA EN TINGO MARÍA - PERÚ	PEDRO HUERTO VICTORIO	06 % Seis	Menor a 20 %

Tingo María, 26 de marzo de 2026.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo

DEDICATORIA

A Dios por permitirme llegar al término de la maestría anhelada.

A mis queridos padres Pedro Huerto Guzmán y Marilú Victorio Aquino que, con su apoyo moral, dedicación invaluable y sacrificio, hicieron posible la culminación de mi formación profesional.

A mis queridas hermanas Katherine Huerto Victorio, Pili Huerto Victorio y Mili Huerto Victorio, con el cariño y gratitud de siempre.

A mi esposa Clara Inés Illanes Pérez y a mi hermoso hijo Pedro Jim Adriano Huerto Illanes, por ser mi inspiración y motivo de seguir adelante en mis grandes proyectos

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por haberme forjado en mi maestría.
- A todos mis profesores de la Escuela de Posgrado de la Maestría en Ciencias en Agroecología y la Facultad de Recursos Naturales Renovables, quienes contribuyeron en mi formación académica.
- A mis asesores, Dr. José Lévano Crisóstomo y Dr. Casiano Aguirre Escalante por sus valiosos aportes científicos y orientaciones en la culminación de mi tesis y formación profesional.
- A los miembros del jurado de tesis Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano, presidente del presente trabajo de investigación, por sus aportes en base a las normas de redacción científica, así mismo al Dr. Ladislao Ruiz Rengifo, Ing. M. Sc. Warren Rios García. por su valiosa colaboración en el desarrollo del presente trabajo de investigación.
- A mis familiares, colegas y aquellas personas que colaboraron y formaron parte de presente trabajo de investigación.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Marco teórico.....	3
2.1.1. Gases de efecto invernadero y cambio climático.....	3
2.1.2. El carbono y dióxido de carbono	4
2.1.3. Diferentes escenarios de captura de carbono	5
2.1.4. El carbono en ecosistemas forestales tropicales	7
2.1.5. Almacenamiento de carbono en aguajal	9
2.1.6. Almacenamiento de carbono en el bambú.....	10
2.1.7. Almacenamiento de carbono en el cacao (CCN51).....	11
2.1.8. Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.....	11
2.1.9. Cambios en los sistemas de uso de la tierra.....	16
2.2. Estado del arte.....	16
III. MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1. Lugar de estudio	21
3.1.1. Ubicación política y localización geográfica.....	21
3.1.2. Zona de vida.....	21
3.1.3. Condiciones climáticas	21
3.1.4. Fisiografía	22
3.1.5. Suelos.....	22
3.1.6. Accesibilidad	22
3.2. Materiales y métodos.....	22
3.2.1. Materiales y equipos	22
3.2.2. Criterios de la investigación	23
3.2.3. Metodología.....	25
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1. Carbono almacenado en hojarasca.....	32
4.2. Carbono almacenado en la raíz.....	34
4.3. Carbono orgánico del suelo en los diferentes sistemas de uso	39

V. CONCLUSIONES	43
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	44
VII. REFERENCIAS.....	45
ANEXOS	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Sistemas evaluados con sus coordenadas UTM (Datum WGS 84, UTM/UPS).	21
2. Operacionalización de variables.....	24
3. Análisis de varianza para el carbono almacenado en hojarasca de los diferentes sistemas de uso.	32
4. Prueba de Duncan para carbono en hojarasca en diferentes sistemas de uso.....	33
5. Análisis de varianza para el carbono en raíz para diferentes sistemas de uso.....	34
6. Biomasa y carbono en raíz para los diferentes sistemas de uso.	36
7. Análisis de varianza para el carbono orgánico del suelo en los diferentes sistemas de uso.	39
8. Datos de densidad aparente distribuidos en sistemas de uso de la tierra y profundidades de muestreo.....	54
9. Datos del carbono orgánico del suelo distribuidos en sistemas de uso de la tierra y profundidades de muestreo.	55
10. Coordenadas de los sistemas de uso de la tierra.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.	Distribución de los cuadrantes para realizar el muestreo.	26
2.	Esquema para el muestreo de las hojarascas (Macdicken, 1997).....	27
3.	Diagrama para los muestreos del carbono almacenado en los suelos y las raíces (Rügnitz et al., 2009).....	28
4.	Comportamiento del carbono en el componente hojarasca.....	34
5.	Comportamiento del carbono de la raíz en los diferentes sistemas de uso.	38
6.	Comportamiento del carbono orgánico del suelo en los diferentes sistemas de uso.....	40
7.	Distribución vertical del carbono orgánico del suelo en los diferentes sistemas de uso de la tierra.	41
8.	Delimitación de la parcela en el sistema agroforestal.	59
9.	Muestreo de hojarasca en el sistema de bosque.	59
10.	Muestreo de hojarasca en el sistema de <i>T. cacao</i> CCN51.....	60
11.	Colecta de hojarasca en el sistema de <i>T. cacao</i> CCN51.	60
12.	Marco de madera y el muestreo de hojarasca en el sistema aguajal.	61
13.	Materiales y herramientas utilizados en el sistema agroforestal.	61
14.	Dimensión del monolito extraído en el sistema bambusal.....	62
15.	Obtención de muestras de suelos del sistema bosque para la densidad aparente.	62
16.	Muestreo de suelos para la densidad aparente en el en el sistema agroforestal.....	63
17.	Pesado de la muestra de suelos dentro el cilindro proveniente del sistema agroforestal.....	63
18.	Registro de pesos de las muestras de suelos en el sistema de <i>T. cacao</i> CCN51.....	64
19.	Lavado de las muestras de raíces provenientes del sistema de <i>T. cacao</i> CCN51.....	64
20.	Muestra de raíces obtenidos del sistema aguajal.....	65
21.	Muestras de hojarasca rotulada del sistema bambusal.....	65
22.	Muestras de las raíces obtenidas del sistema bambusal.....	66

23.	Muestras de raíces provenientes del sistema agroforestal.....	66
24.	Muestra de raíces obtenidos del sistema bosque.....	67
25.	Secado de las muestras del sistema aguajal.....	67
26.	Ubicación de los cinco sistemas de uso de la tierra.....	68
27.	Ubicación del sistema <i>T. cacao</i> CCN51.....	69

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo evaluar el almacenamiento de carbono orgánico, en diferentes sistemas de uso de la tierra en Tingo María. La investigación se llevó a cabo en seis sistemas: Bosque de Colina Baja (PPM1), Bosque de Colina Alta (PPM4) en el BRUNAS, en una colina baja del sistema agroforestal con Cacao en el Banco de Germoplasma, terraza baja del Aguajal, lomadas del Bambusal en el BRUNAS y Cacao (CCN51) en el Sector Bella Baja que pertenecen a la provincia de Leoncio Prado del departamento de Huánuco. Las muestras fueron procesadas en la Facultad de Recursos Naturales Renovables, Escuela profesional de Conservación de Suelos y Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, se realizó siguiendo la metodología del Centro Internacional de Agroforestería. Los resultados indicaron que el sistema Cacao CCN 51 en Bella Baja presentó el mayor almacenamiento de carbono en hojarasca (1,399 tC/ha), seguido por PPM 4 (1,353 tC/ha), mientras que el sistema de Aguajal registró el menor valor (0,899 tC/ha). En el sistema radicular, el contenido de carbono fue similar entre los seis sistemas, con mayor acumulación en los primeros 10 cm del suelo. El almacenamiento de carbono orgánico total en el suelo mostró variaciones, con los valores más altos en Cacao CCN 51 de Bella Baja (130,12 tC/ha) y PPM 4 (129,85 tC/ha), mientras que el SAF Banco de Germoplasma presentó el menor contenido (66,55 tC/ha). Sin embargo, la alta variabilidad en algunos sistemas impidió diferencias significativas. Se concluye que el almacenamiento de carbono varía entre sistemas sin diferencias significativas, destacando mayores valores en Cacao CCN 51 Bella Baja y PPM 4.

Palabras clave: Agroforestería, almacenamiento, carbono, hojarasca, raíz.

ABSTRACT

The study aimed to evaluate organic carbon storage in different land-use systems in Tingo María. The research was conducted in six systems: Low Hill Forest (PPM1), High Hill Forest (PPM4) in the BRUNAS area, a low hill within the agroforestry system with cacao at the Germplasm Bank, the lower terrace of the Aguajal area, the hills of the Bamboo grove, area in the BRUNAS area, and cacao (CCN51) in the Bella Baja Sector, all located in the Leoncio Prado province of the Huánuco department. Samples were processed at the Faculty of Renewable Natural Resources, Professional School of Soil and Water Conservation, of the National Agrarian University of the Jungle, following the methodology of the International Agroforestry Centre. The results indicated that the Cacao CCN 51 system in Bella Baja exhibited the highest carbon storage in leaf litter (1.399 tC/ha), followed by PPM 4 (1.353 tC/ha), while the Aguajal system registered the lowest value (0.899 tC/ha). In the root system, carbon content was similar among the six systems, with greater accumulation in the top 10 cm of soil. Total organic carbon storage in the soil showed variations, with the highest values in Cacao CCN 51 in Bella Baja (130.12 tC/ha) and PPM 4 (129.85 tC/ha), while the Germplasm Bank Agroforestry System (SAF) presented the lowest content (66.55 tC/ha). However, the high variability in some systems prevented statistically significant differences. It is concluded that carbon storage varies among systems without significant differences, with higher values observed in Cacao CCN 51 Bella Baja and PPM 4.

Keywords: Agroforestry, storage, carbon, leaf litter, root.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel internacional se reconoce la importancia crucial de los ecosistemas forestales y agroforestales en la mitigación del cambio de clima, porque actúan como reservorios naturales de carbono y reguladores del ciclo global del mismo. En diversas latitudes del planeta, la deforestación y la degradación de estos sistemas han generado un desequilibrio en la captación de dióxido de carbono, intensificando los efectos del calentamiento global; en este contexto, el almacenamiento del carbono orgánico en la tierra se erige como una estrategia fundamental para contrarrestar el incremento de gases del efecto invernadero.

A nivel regional y nacional, países con alta biodiversidad y vastos territorios forestales, como Perú, han adoptado políticas que se orientan a conservar y manejar sosteniblemente sus recursos naturales; específicamente, en el distrito de Rupa Rupa se observa una diversidad de sistemas de uso de la tierra, entre los que se destacan los bosques secundarios ubicados en colina baja (PPM 1) y colina alta (PPM 4), los sistemas agroforestales con cacao (SAF-Cacao), los sistemas con plantaciones de aguaje (Aguajal), las áreas con plantaciones de bambúes (Bambusal) y distintas plantación de cacao (CCN51). Estos escenarios no solo presentan características biológicas y ecológicas diversas, sino que también son vitales para el sustento de comunidades locales y la conservación de la biodiversidad, constituyendo así un entorno complejo y multifacético que demanda un análisis exhaustivo sobre la capacidad de estos sistemas para el almacenamiento del carbono orgánico.

El problema radica en la necesidad de comprender y cuantificar la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico en los seis sistemas de uso de la tierra presentes en Tingo María, Perú; a pesar de la existencia de estudios que han abordado la captura de carbono en sistemas forestales y agroforestales en diferentes países, existe una brecha en el conocimiento específico de estos sistemas en el contexto del distrito Rupa Rupa, lo cual generan como interrogante ¿Cuáles son las diferencias en el almacenamiento del carbono orgánico en seis sistemas de uso de la tierra en Tingo María - Perú?

La investigación se fundamenta en la imperiosa necesidad de que se cuente con información precisa y actualizada respecto a la dinámica del carbono en sistemas naturales y modificados por el ser humano, en un escenario donde el cambio de clima se convirtió en uno de los mayores desafíos a nivel global; conocer cómo se comporta el carbono orgánico en los sistemas de uso de la tierra en Tingo María permitirá no solo establecer bases sólidas para la gestión ambiental y la implementación de políticas de conservación, sino también

proporcionar herramientas de gestión para distintos actores. Esta información es vital para que se planifiquen estrategias sobre el manejo sostenible que contribuyan a que se reduzca la emisión de gases de efecto invernadero y promover prácticas agrícolas y forestales que fortalezcan la resiliencia ecológica. Además, cuando se identifiquen distintas fortalezas y debilidades en los sistemas, la investigación sirve de insumo vital para diseñar programas de reforestación y restauración ecológica, fomentando una integración armónica entre producción agrícola y conservación ambiental.

Los alcances de este estudio se orientan hacia la generación de un conocimiento detallado y aplicable sobre el carbono orgánico almacenamiento en los sistemas de uso de la tierra, que permitirá establecer comparaciones y evidenciar la capacidad de cada uno para mitigar el cambio climático. En términos prácticos, los resultados de esta investigación beneficiarán directamente a los agricultores, proporcionando datos esenciales para optimizar la gestión de sus tierras y adoptar prácticas de manejo que potencien la captura de carbono; los técnicos y asesores ambientales podrán utilizar esta información para que se desarrollen proyectos y programas impulsores de la sostenibilidad ambiental en la región; para los tesisas y docentes universitarios, el estudio representa una fuente de conocimiento actualizada y específica que puede integrarse en currículos académicos y servir de base para futuras investigaciones.

La hipótesis parte de la premisa de que existen diferencias significativas en el almacenamiento de carbono orgánico entre los distintos sistemas de uso de la tierra presentes en Tingo María, debido a las variaciones en las características fisiográficas, suelo, ecológicas, y en el manejo y la dinámica de sucesión de cada uno de ellos. Además, este trabajo sentará las bases para futuros estudios que exploren la relación del carbono almacenado y otros servicios ecosistémicos; por lo cual se plantea como objetivos los siguientes:

Objetivo general

- Evaluar el almacenamiento de carbono orgánico total en diferentes sistemas de uso de la tierra en Tingo María.

Objetivos específicos

- Estimar el carbono almacenado en la biomasa herbácea y hojarasca en los diferentes sistemas de uso de la tierra.
- Estimar el carbono almacenado en el suelo y las raíces en los diferentes sistemas de uso de la tierra.
- Determinar el almacenamiento del carbono orgánico total en los diferentes sistemas de uso de la tierra.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Gases de efecto invernadero y cambio climático

La contaminación del ambiente representa actualmente una de las mayores inquietudes a escala mundial, ya que sus impactos adversos afectan a la salud de las personas, equilibrio de los ecosistemas y las condiciones climáticas (Organización Panamericana de la Salud, 2024).

El constante aumento de los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos, resultado por distintas acciones de las personas, ha seguido una marcada tendencia al alza en las últimas décadas (Delgado-Vargas y Benavides, 2025). Basados en la información del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2023), entre 1970 y 2000, el crecimiento anual promedio fue del 1,3 %, mientras que en el periodo que abarcan los años 2000 hasta el 2010, este se incrementó al 2,2 %. Este fenómeno representa un desafío de escala mundial que repercute negativamente en distintos ámbitos. En el plano socioeconómico, por ejemplo, se observa un incremento en la aparición de enfermedades y plagas. En el contexto agroambiental, se intensifica la necesidad de emplear productos agroquímicos para mantener la productividad. A nivel ecológico, los impactos se manifiestan en la aceleración del deshielo de los glaciares y la pérdida de cobertura forestal. En cuanto a las dinámicas socioculturales, se producen consecuencias como el abandono de saberes tradicionales y los desplazamientos forzados de poblaciones. Estas transformaciones interrelacionadas generan un panorama preocupante, ya que los efectos del cambio climático no solo alteran el equilibrio ambiental, además suelen poner en riesgo el bienestar y la seguridad de comunidades enteras (Delgado-Vargas y Benavides, 2025). De continuar esta tendencia, Leonel et al. (2023) estiman que la temperatura media global podría incrementarse hasta en 2,5 °C, según proyecciones recientes, lo que agravaría aún más los efectos mencionados.

La actividad agroindustrial representa alrededor del 25,0 % de los GEI emitidos y generados por el ser humano a nivel del mundo, de los cuales el metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y óxido nitroso (N₂O) son los principales gases emitidos en este sector (Tubiello et al., 2021). Estas emisiones tienen su origen en diversas prácticas vinculadas a la producción agrícola y ganadera. Entre las principales fuentes se encuentran el uso intensivo de fertilizantes nitrogenados en los cultivos, la fermentación entérica en el sistema digestivo del ganado, el cambio en el uso de la tierra como las deforestaciones para

expandir áreas agrícolas, y la quema de combustibles fósiles utilizados tanto en maquinaria agrícola como en el transporte de productos (Crippa et al., 2021). Estas actividades contribuyen significativamente al calentamiento global, al liberar grandes cantidades de GEI que intensifican el efecto invernadero. Por ello, resulta fundamental replantear los modelos de producción agroindustrial y promover prácticas más sostenibles que reduzcan su impacto ambiental y favorezcan una mayor resiliencia frente al cambio climático.

2.1.2. El carbono y dióxido de carbono

Según datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2022), en el año 2021 las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) fueron estimados en aproximadamente 36 300 millones de toneladas, lo que representa un aumento del 6 % en comparación con el año anterior, 2020. Este crecimiento refleja la persistente dependencia de actividades emisoras de carbono a nivel mundial. Entre los factores que intensifican el calentamiento global se encuentran la deforestación y los incendios forestales, fenómenos que no solo liberan grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera, sino que también reducen la capacidad de los ecosistemas para capturarlo. La pérdida de cobertura vegetal debilita los sumideros naturales de carbono, dificultando así los esfuerzos globales por mitigar el cambio climático y proteger el equilibrio ambiental.

De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2023), la absorción de carbono realizada por los ecosistemas forestales es fundamental en la lucha contra el cambio climático, ya que los bosques actúan como sumideros naturales capaces de controlar los niveles de CO₂ en la atmósfera. En este contexto, los árboles desempeñan un rol clave dentro del ciclo del carbono, particularmente en zonas tropicales y subtropicales, donde la riqueza biológica y la alta productividad ecológica favorecen una mayor captura de este gas. La presencia de diversas especies arbóreas en estos entornos contribuye significativamente a mantener el equilibrio climático global, lo que refuerza la importancia de conservar y restaurar los bosques como estrategia central para mitigar los efectos del calentamiento global.

2.1.2.1. Carbono en los suelos

El carbono orgánico del suelo (COS) corresponde al carbono que se conserva en el suelo tras la descomposición parcial de restos orgánicos generados por organismos vivos. Este tipo de carbono puede mantenerse en el suelo por largos periodos de tiempo, que van desde décadas hasta siglos o incluso milenios, dependiendo de las condiciones ambientales y del manejo del suelo (Villarreal-Núñez y Ramos-Zachrisson, 2024).

Los suelos representan una de las principales reservas de carbono orgánico en los ecosistemas terrestres. Sin embargo, el uso intensivo de estos recursos debido a actividades humanas ha provocado una disminución significativa en los niveles de carbono almacenado, lo cual contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero (Hurtado et al., 2023). A pesar de esta problemática, existen especies vegetales que favorecen la capacidad del suelo para retener dióxido de carbono (CO₂), siendo especialmente relevantes algunas especies arbustivas, como el cacao. Esta planta es capaz de capturar entre 3,2 y 10 toneladas de carbono por hectárea. Uno de los mecanismos principales por los que se logra esta captura es a través de la descomposición del material vegetal que cae al suelo, como hojas, ramas y mazorcas. Este proceso de descomposición es el resultado de la interacción entre diversos factores tanto bióticos como abióticos, incluyendo la acción de microorganismos, así como condiciones ambientales como la humedad y la temperatura (Ledesma y Abreu, 2023).

La acumulación de carbono orgánico en el suelo (COS) está influenciada por diversos factores, entre los que destacan el uso del terreno, el tipo de suelo, el clima y la altitud (Huamán et al., 2021). La manera en que se maneja el sistema vegetal también desempeña un papel crucial, ya que prácticas agrícolas adecuadas pueden intensificar la dinámica del carbono en el suelo, promoviendo una mayor retención de este elemento. Por el contrario, el uso de fertilizantes sintéticos, la quema de residuos agrícolas y las prácticas de labranza intensiva generan una degradación tanto física como química y biológica del suelo. Estas acciones afectan negativamente la estabilidad del COS, reduciendo su capacidad de almacenamiento y afectando el equilibrio del ecosistema (Amores-Meza, 2020). En cambio, la adopción de prácticas agrícolas conservacionistas, como la labranza mínima, el manejo eficiente de la biomasa residual, el empleo de cultivos de cobertura y la rotación de cultivos, ha demostrado ser beneficiosa para mejorar la calidad del suelo y aumentar su contenido de materia orgánica (Guo y Gifford, 2020).

2.1.3. Diferentes escenarios de captura de carbono

Para Llanos (2024), el almacenamiento de carbono en el suelo implica una compleja interacción entre diversos elementos y los factores que influyen en la evolución de las propiedades del suelo a lo largo del tiempo. Aunque el contenido de carbono está determinado en gran parte por condiciones inherentes al proceso de formación del suelo, este puede variar significativamente en función del uso que se le dé y de las prácticas de manejo aplicadas. Los factores edafoclimáticos, como el tipo de suelo y el clima, son determinantes clave en la retención de carbono a largo plazo. No obstante, modificaciones en la cobertura

vegetal y en el uso del terreno tienen un efecto más inmediato, generando variaciones en el almacenamiento de carbono en períodos más cortos. En consecuencia, la gestión adecuada del suelo y de los ecosistemas que lo rodean es fundamental para promover el secuestro de carbono, conservar la calidad del suelo y contribuir a la mitigación del cambio climático.

En América Latina, los estudios han ofrecido valiosos aportes sobre distintos sistemas de saberes, técnicas y prácticas que pueden desempeñar un papel relevante en las acciones de mitigación y adaptación frente al cambio climático. Dentro de este marco, se han destacado los sumideros de carbono como la vegetación, los suelos y los océanos, por su capacidad para absorber y almacenar dióxido de carbono, lo que los convierte en elementos clave en las estrategias ambientales (Leonel et al., 2023). Entre las alternativas promovidas, la agroforestería ha ganado protagonismo debido a su capacidad para integrar una amplia variedad de especies vegetales, particularmente árboles, en esquemas de producción agrícola sostenibles. Este sistema favorece la biodiversidad al combinar distintos niveles de vegetación y se adapta con flexibilidad a diversos contextos territoriales. Además, la agroforestería proporciona importantes servicios ecosistémicos, entre los cuales destaca la capacidad de capturar y almacenar carbono orgánico en el suelo (COS), una función esencial para reducir la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (Somarriba et al., 2024). De esta manera, las prácticas agroforestales no solo promueven la sostenibilidad productiva y ecológica, sino que también representan una alternativa viable para enfrentar los efectos del cambio climático en la región latinoamericana.

Según Tan y Kuebbing (2023), la implementación de nuevas prácticas agrícolas contribuye a disminuir los efectos del cambio climático en aproximadamente un 0,4 % anual, gracias al incremento de las reservas de carbono orgánico en el suelo. Este enfoque, conocido como la iniciativa "4 por mil", busca promover estrategias que aumenten el almacenamiento de carbono sin comprometer otros servicios ecosistémicos esenciales. En este contexto, resulta fundamental aplicar técnicas agrícolas sostenibles que favorezcan la captura de carbono y, al mismo tiempo, mantengan la productividad, la biodiversidad y la salud del suelo (Kumara et al., 2023). A partir de esta perspectiva, se reconoce un amplio potencial en el ámbito del secuestro de carbono a través de modificaciones en las prácticas agrícolas convencionales. Estas transformaciones pueden generar un impacto significativo en la reducción de las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, lo que convierte al manejo del carbono en suelos agrícolas en una herramienta clave para la mitigación del cambio climático (Rodríguez et al., 2023).

En diversas partes de la región selva del Perú, la deforestación es una práctica habitual entre los pequeños agricultores, quienes talan y queman áreas boscosas con alto potencial forestal. Este proceso implica la eliminación de vegetación natural, afectando zonas que podrían gestionarse sosteniblemente para madera o conservación (Decuyper et al., 2022).

2.1.4. El carbono en ecosistemas forestales tropicales

2.1.4.1. Aspectos generales

Secuestro de carbono. La deforestación y la transformación del uso de la tierra representan la segunda fuente más significativa de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) de origen humano. El proceso mediante el cual se captura y almacena este gas se denomina secuestro de carbono, y puede ocurrir tanto de manera natural como mediante métodos artificiales. En los ecosistemas naturales, este fenómeno se lleva a cabo principalmente a través de la fotosíntesis. Los bosques terrestres, los sistemas agrícolas y los ecosistemas marinos desempeñan un papel fundamental en este proceso, ya que absorben gases de efecto invernadero de forma natural, contribuyendo así a la reducción de su concentración en la atmósfera (Bobalilla, 2024).

Además de los métodos naturales, se han creado técnicas artificiales para capturar gases de efecto invernadero. Estas tecnologías permiten almacenar los gases en formaciones subterráneas o transformarlos en energía mediante el uso de biomasa. Sin embargo, a pesar de su potencial, estas alternativas artificiales aún presentan una disponibilidad restringida debido a los elevados costos asociados y a la necesidad de tecnologías avanzadas para su implementación. La infraestructura requerida y la complejidad de los procesos implican desafíos técnicos y económicos que limitan su aplicación a gran escala. Por esta razón, aunque estas metodologías representan una opción prometedora para la mitigación del cambio climático, su desarrollo y adopción masiva todavía enfrenta importantes barreras (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021).

Carbono almacenado. Es la cantidad de carbono que se encuentra retenida en distintos reservorios naturales como la vegetación, el suelo, los océanos y la biomasa muerta. Este carbono no se encuentra en forma gaseosa en la atmósfera, sino fijado en estructuras orgánicas o inorgánicas, lo que contribuye a reducir la concentración de dióxido de carbono (CO₂) y mitigar el cambio climático. Además, la cantidad de carbono orgánico que se acumula en los bosques está influenciada por factores como el tipo de manejo aplicado, la edad del ecosistema, la distribución del tamaño de los árboles, así como la estructura y composición de la vegetación presente (Galván-Moreno et al., 2024).

Sumideros de carbono. Un sumidero se define como cualquier sistema o proceso capaz de captar uno o varios gases de la atmósfera y retenerlos en algún depósito natural o artificial, evitando así su liberación directa al ambiente (Gutiérrez-Cabanillas y Ordiales, 2024).

El secuestro de carbono es un proceso mediante el cual el dióxido de carbono (CO₂), uno de los principales gases de efecto invernadero (GEI), es extraído de la atmósfera y almacenado en las plantas. Estas estructuras vegetales actúan como sumideros de carbono a través del proceso de fotosíntesis, capturando el CO₂ y fijándolo en su biomasa (Gallardo, 2024). Sin embargo, para que este carbono también se acumule de manera efectiva en el suelo, es fundamental aplicar prácticas de manejo sostenible que favorezcan dicha retención. En este contexto, uno de los grandes desafíos planteados por el Protocolo de Kioto es convertir los suelos agrícolas del mundo en sumideros de carbono confiables. Esto implica no solo fomentar el almacenamiento de carbono, sino también garantizar que dicho proceso pueda ser medido con precisión. La posibilidad de cuantificar el carbono capturado en los suelos es clave para su inclusión en estrategias internacionales de mitigación del cambio climático, lo que resalta la importancia de la investigación, el monitoreo y la adopción de tecnologías agrícolas sostenibles para alcanzar estos objetivos (Harouna, 2021).

2.1.4.2. El carbono en los sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales, definidos como la integración de cultivos agrícolas, arbustos y especies arbóreas en una misma zona, ofrecen múltiples beneficios ambientales. Estos sistemas mejoran las condiciones del suelo al aumentar su fertilidad y estructura, purifican el agua al reducir la escorrentía y la contaminación, fomentan la biodiversidad al proporcionar hábitats diversos y contribuyen al secuestro de carbono, lo que ayuda a mitigar el cambio climático. Así, representan una práctica agrícola sostenible y beneficiosa para el medio ambiente (Siqueira et al., 2020).

El cambio climático afecta procesos esenciales como la fotosíntesis y la respiración, al modificar factores como la radiación solar, la temperatura, la humedad, la disponibilidad de agua y nutrientes, así como la presencia de ozono y otros contaminantes en la atmósfera. Asimismo, las pruebas del cambio climático y el calentamiento global han despertado un mayor interés en evaluar las reservas de carbono almacenadas en la biomasa, tanto en la vegetación como en el suelo (Zaro et al., 2020). En este sentido, los sistemas agroforestales (SAF) están ganando atención, ya que brindan diversas alternativas para contrarrestar el cambio climático, con el potencial de mejorar la productividad agrícola y generar beneficios ambientales adicionales (Adhikari et al., 2020).

2.1.5. Almacenamiento de carbono en aguajal

Kristell et al. (2022) indica que, los bosques de turberas tropicales son importantes reservas mundiales de carbono (C) que son particularmente vulnerables a la intervención humana. En la Amazonía peruana han sido severamente degradadas a través del corte recurrente de palmas *Mauritia flexuosa* (aguaje) para la recolección de frutos, y potencialmente han sido transformadas de un CO₂ hundirse en una fuente significativa. Para estimar las emisiones asociadas con la degradación, combinaron los cambios en las reservas de C en la biomasa aérea con las pérdidas de C de turba a lo largo de un gradiente que comprende pantanos de palma no degradados (intactos), moderadamente degradados (mDeg) y muy degradados (hDeg). Se investigó la dinámica temporal y espacial de los principales componentes del presupuesto de C de la turba (respiración heterótrofa del suelo - Rh y caída de hojarasca - bi) mensualmente durante tres años, mientras que los insumos anuales de C de la raíz específica del sitio y las exportaciones de C orgánico disuelto por defecto se tomaron de la literatura. Las variables medidas a nivel arbóreo o microtopográfico se dimensionaron a escala de sitio considerando los cambios estructurales del bosque por degradación. Caída de hojarasca a escala de sitio (Mg C/ha/año) en el sitio hDeg ($2,3 \pm 0,5$) fue menos de la mitad de la tasa en los sitios Intact y mDeg ($5,2 \pm 0,9$ y $6,0 \pm 1,6$, respectivamente). Por el contrario, el Rh a escala de sitio fue mayor en el sitio hDeg ($9,6 \pm 0,6$) que en los sitios Intact y mDeg ($7,5 \pm 1,1$ y $6,1 \pm 0,5$, respectivamente). El presupuesto de carbono de la turba indicó que la degradación media redujo la capacidad de sumidero del suelo (de $-1,8 \pm 1,8$ en el sitio Intact a $-0,3 \pm 0,7$ en el sitio mDeg), mientras que la alta degradación convirtió al suelo en una fuente alta de C ($6,0 \pm 0,6$ en el sitio hDeg). Las grandes tasas de pérdida total de existencias de C de $23,5 \pm 14,3$ y $57,7 \pm 14,3$ Mg de CO₂/ha/año en los sitios mDeg y hDeg, respectivamente, que se originaron en un 94 y un 77% a partir de cambios en la biomasa aérea, destacan claramente la necesidad de una gestión sostenible de estas turberas.

Las concentraciones de carbono en los sistemas de plantaciones de *M. flexuosa* son variables, Rojas (2017) determinó en un sistema de esta palmera con pastos *Paspalum plicatulum* que almacenaba 2,12 tC/ha en el componente arbóreo, $0,98 \pm 0,06$ tC/ha en la parte herbácea, $6,99 \pm 0,23$ tC/ha en la hojarasca, lo que suma un $10,09 \pm 0,24$ tC/ha del carbono aéreo total; en el caso del carbono en el suelo, se tiene un $37,94 \pm 0,90$ t/ha en las raíces y $44,81 \pm 0,71$ t/ha de COS, acumulando un total de $82,75 \pm 1,42$ t/ha de carbono total bajo el suelo.

Otro reporte de una plantación de *M. flexuosa* ubicada en el distrito de Pueblo Nuevo, Reynaldo (2018) identificó que la cantidad de carbono almacenado en las

raíces varía según la profundidad del suelo. En los primeros 20 centímetros, se registró un promedio de 7,51 toneladas de carbono por hectárea (tC/ha). Esta cifra mostró un aumento en la siguiente capa, entre los 20 y 40 centímetros, alcanzando un promedio de 8,13 tC/ha. Sin embargo, en el estrato más profundo evaluado, de 40 a 60 centímetros, el contenido de carbono disminuyó notablemente, situándose en 2,85 tC/ha. Estos resultados evidencian que la mayor concentración de carbono radicular se encuentra en los niveles intermedios del perfil del suelo, mientras que en las capas más profundas tiende a reducirse. Esta distribución del carbono subterráneo puede estar relacionada con la densidad y profundidad del sistema radicular de las plantas, así como con las condiciones físico-químicas del suelo en cada estrato.

2.1.6. Almacenamiento de carbono en el bambú

Zhang et al. (2020) revisaron tres décadas de investigaciones sobre los sumideros de carbono en bosques de bambú y determinaron que existen cuatro principales líneas de estudio prometedoras: (1) el análisis de las características espacio-temporales de estos sumideros, (2) el monitoreo preciso de su comportamiento, (3) la comprensión de los mecanismos que influyen en su dinámica, y (4) el desarrollo de tecnologías para aumentar o reducir el carbono capturado. Para examinar la distribución espacio-temporal de estos sumideros, se emplean herramientas como datos de teledetección, drones, modelos computacionales y estudios de campo en sitios seleccionados. Comprender dicha distribución permite estimar con mayor precisión la capacidad de los bosques de bambú para capturar carbono. Además, estos análisis contribuyen a identificar los patrones espacio-temporales propios de estos ecosistemas, lo cual es fundamental para prever cómo podrían verse afectados por el cambio climático. En consecuencia, este aporte resulta clave para fortalecer el papel de los bosques de bambú como sumideros de carbono y mejorar las estrategias de mitigación frente al aumento de gases de efecto invernadero.

El abandono de las poblaciones de bambúes aumenta significativamente el almacenamiento del COS, en comparación con la gestión continua de los bosques de bambúes. Llegaron a estas conclusiones después de analizar los reservorios de carbono del suelo a una profundidad de 0 a 40 cm en bosques de bambúes abandonados, pero la duración del abandono no tuvo un efecto significativo en el COS, mientras que el contenido de carbono de la biomasa microbiana aumentó con la duración del abandono (Deng et al., 2020).

En la parcela de *Guadua angustifolia* que se encuentra en el BRUNAS, el contenido de COS respecto a la distancia de la mata es variable, siendo a 2 m un promedio de 26,55 tC/ha, a los 5 m 26,16 tC/ha y a los 10 m registró 18,74 tC/ha, alcanzando en total

una media de 23,8 tC/ha. Además, la hojarasca suele aportar a 2 m un promedio de 62,71 tC/ha, a los 5 m 28,48 tC/ha y a los 10 m registró 2,43 tC/ha, alcanzando en total una media de 31,21 tC/ha. Para el caso de las raíces, se encontró a 2 m un promedio de 9,92 tC/ha, a los 5 m 4,12 tC/ha y a los 10 m registró 2,15 tC/ha, alcanzando en total una media de 5,40 tC/ha principalmente en el Giganto aplu, (Acuña, 2023).

2.1.7. Almacenamiento de carbono en el cacao (CCN51)

Se ha documentado que las plantaciones de *T. cacao* pueden almacenar hasta 13,8 mega gramos de carbono por hectárea (Mg C ha^{-1}), lo que ha generado un creciente interés en los sistemas agroforestales basados en monocultivos de cacao debido a su potencial para capturar carbono en el suelo. Esta capacidad de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de tipo perenne no es uniforme, ya que está influenciada por varios factores. Entre los más relevantes se encuentran la edad de las plantaciones, el tamaño de los árboles y la densidad poblacional de las especies cultivadas. En este sentido, los sistemas más desarrollados y con una mayor cobertura vegetal suelen presentar una mayor acumulación de carbono, al favorecer condiciones que permiten una mejor retención y fijación en el suelo. Por ello, la planificación y el manejo adecuado de estos sistemas es fundamental para maximizar su contribución a la mitigación del cambio climático (Leiva y Ramírez, 2021).

Ramírez (2024) en el distrito de Anda en la provincia de Leoncio Prado, realizó el muestreo de un sistema de uso con *T. cacao* de 12 años de edad, establecido a 3,5 x 3,5 m donde la pendiente fue 2%, se utilizan abonos orgánicos, fertilizantes minerales y entre otros podando tres veces al año. Realizó el muestreo de nueve repeticiones hasta una profundidad de 30 cm, encontrando resultados de $6,40 \pm 1,66$ tC/ha y un CV del 25,96 % en su sistema de raíces, $8,89 \pm 2,29$ tC/ha y un CV de 25,71 % en la hojarasca y el fue COS $49,84 \pm 17,65$ tC/ha con un CV del 35,40 %.

2.1.8. Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva

Gutiérrez (2007) manifiesta diferentes características de unidades fisiográficas de colina baja y colina alta en el BRUNAS, teniendo en cuenta la altitud y la pendiente las cuales son:

Colina baja clase 1. Esta unidad tiene un paisaje de colinas bajas, tiene un nivel de base de 20 – 60 m y con pendientes moderadas de > 5 a < 20 %. La superficie es de 67,52 ha, representa el 22,69 % de la superficie total. Esta unidad constituida por material sedimentario, es de mejores características para el manejo y aprovechamiento forestal por esto nos permite un acceso relativamente fácil de bajo costo y tiene buen volumen por unidad de

área y tiene accesibilidad. En esta también se encuentra la plantación de tornillo (*cedrelinga cateniformis*) y la plantación del grupo de especies de bambú.

La parcela permanente de medición, (PPM-1) del BRUNAS, ubicada en 391084 Este, 8970688 Norte a 780 m.s.n.m., presenta un área basal de 24,26 m²/ha y un volumen comercial maderable de 180,44 m³, indicando un bosque remanente con densidad y productividad forestal moderada (Castañeda, 2021). Corresponde un bosque sucesional y necesita 324,38 años para llegar a ser un bosque clímax, en el año 2023 registró 626 individuos con Dap mayor o igual a 10 cm, 0,48 % de reclutamiento, 0,42 % de mortalidad, el área basal determinado fue 25,064 m² en donde el área basal promedio registrado fue 0,15 cm/año; las especies de mayor valor de importancia fueron *Parkia panurensis*, *Senefeldera inclinata*, *Virola pavonis*, *Casearia ulmifolia*, *Qualea amoena*, *Pourouma minor*, *Helicostylis tomentosa*, *Cecropia sciadophylla*, *Schizocalyx sterculioides*, *Laetia procera*, *Dacryodes nitens*, *Theobroma subincanum*, *Henriettea sylvestris* y *Schefflera morototoni* (Flores, 2024).

La parcela permanente de medición (PPM-1), ubicada en un bosque remanente, presenta características edáficas que describen las condiciones del suelo entre los 0 y 30 cm de profundidad. El suelo se clasifica como franco arcilloso, con una composición textural de 48,46 % de arena, 24,87 % de arcilla y 26,98 % de limo. Esta textura indica una mayor proporción de arcilla, lo que confiere al suelo una mayor capacidad de retención de agua y nutrientes, aunque también puede limitar la aireación y el drenaje en comparación con suelos más arenosos. La resistencia a la penetración, con un valor de 1,48 kg/cm², se considera restrictiva, lo que sugiere que el suelo puede presentar cierta compactación o densificación, dificultando el crecimiento de las raíces y la infiltración de agua (Huamán, 2024).

La temperatura del suelo es de 25 °C, clasificada como hipertermotérmica, típica de climas cálidos, lo que influye en los procesos biológicos y químicos del suelo. El pH del suelo es de 5,00, considerado fuertemente ácido, lo que puede afectar la disponibilidad de nutrientes esenciales y la actividad microbiana. A pesar de esto, el contenido de materia orgánica es del 2,18 %, clasificado como medio, lo que contribuye a la fertilidad y estructura del suelo. Los niveles de nitrógeno también son medios (0,11 %), mientras que el fósforo (4,56 ppm) y el potasio (91,00 ppm) se encuentran en niveles bajos, lo que podría limitar la productividad vegetal y requerir enmiendas para mejorar la disponibilidad de estos nutrientes (Huamán, 2024).

Por otro lado, la densidad aparente, muestreada entre los 0 y 10 cm de profundidad, es de 0,84 g/cm³, considerada ideal, lo que indica un suelo bien estructurado con

buena porosidad y capacidad de retención de agua (Huamán, 2024). En conjunto, estas características sugieren un suelo con potencial para sostener la vegetación del bosque remanente, aunque su acidez, resistencia a la penetración y bajos niveles de fósforo y potasio podrían representar desafíos para el desarrollo óptimo de la flora y la salud del ecosistema.

La parcela permanente de medición PPM-1 muestra una dinámica forestal activa en sus diferentes estratos, reflejando procesos de crecimiento, mortalidad y reclutamiento que caracterizan la estructura y evolución del bosque remanente. En la categoría de la regeneración natural denominado brinzales, se registraron 39 individuos, con una mortalidad del 1,18 %, un reclutamiento del 7,60 % y un incremento medio anual del 15,16 %. Estos valores indican una alta tasa de renovación y crecimiento en este estrato, lo que sugiere una regeneración activa y un ambiente propicio para el establecimiento de plántulas y juveniles (Gutiérrez et al., 2023).

En el latizal bajo, conformado por 90 individuos, se observó una mortalidad del 1,50 %, un reclutamiento del 1,20 % y un incremento medio anual del 6,16 %. Este estrato presenta una dinámica más estable en comparación con el brinzal, aunque aún muestra un crecimiento significativo, lo que refleja la transición de los individuos hacia etapas más avanzadas de desarrollo.

El latizal alto, con 62 individuos, registró una mortalidad del 0,00 %, un reclutamiento del 1,60 % y un incremento medio anual del 5,69 %. La ausencia de mortalidad en este estrato sugiere condiciones favorables para la supervivencia de los árboles jóvenes que se están consolidando en el bosque, mientras que el reclutamiento y el crecimiento indican una continuidad en su desarrollo hacia el estrato superior (Gutiérrez et al., 2023).

En la categoría de regeneración de los fustales estuvo compuesto por 211 individuos, se reportó una mortalidad del 0,40 %, un reclutamiento del 2,90 % y un incremento medio anual del 4,34 % (Gutiérrez et al., 2023). Este estrato, muestra una baja mortalidad y un reclutamiento moderado, lo que indica una estabilidad en la estructura del bosque y una capacidad de regeneración que asegura la persistencia del ecosistema forestal a largo plazo. En conjunto, estos datos reflejan un bosque en proceso de crecimiento y renovación, con una dinámica saludable en sus diferentes estratos.

Colina baja clase 2. Corresponde a formaciones de colinas de moderada disección, nivel de base 20 a 80 m. aproximadamente, con pendientes de > 20 a < 40 % lo cual permite un buen acceso para el manejo y aprovechamiento. La superficie es de 41.85 ha que representa el 14.07 % de la superficie total.

Colina alta clase 1. Estrato de colina alta su nivel de base es > 80 m a < 200 m, con ligera disección su pendiente es > 40 a < 70 %, bosque considerado como bosque de protección. Se encuentra cercanos a ojo de agua y cursos de agua. La superficie es de 61.58 ha que representa el 20.70 % de la superficie total.

La parcela permanente de medición (PPM-4), del BRUNAS, está ubicada en 391 540 m Este, 8 970 335 m Norte a 860 m s.n.m., registra un área basal de 32,92 m²/ha y un volumen comercial maderable de 274 m³. Estos valores indican un bosque remanente con mayor densidad y productividad forestal en comparación con otras áreas, reflejando un buen estado de conservación (Castañeda, 2021). Corresponde un bosque remanente y necesita 138,06 años para llegar a ser un bosque clímax, en el año 2023 contenía 564 individuos con Dap mayor o igual a 10 cm, 1,37 % de reclutamiento, 0,99 % de mortalidad, el área basal determinado fue 36,081 m² en donde el área basal promedio registrado fue 0,24 cm/año; las especies de mayor valor de importancia fueron *Senefeldera inclinata*, *Pourouma minor*, *Cedrelinga cateniformis*, *Hevea guianensis*, *Dacryodes nitens*, *Cecropia sciadophylla*, *Otoba parvifolia*, *Schizocalyx peruvianus*, *Osteophloeum platyspermum*, *Tapirira guianensis*, *Virola pavonis*, *Batocarpus orinocensis*, *Theobroma subincanum* y *Pseudolmedia laevis* (Flores, 2024).

La parcela permanente de medición (PPM-4), establecida en un bosque remanente, presenta características edáficas que reflejan las condiciones del suelo entre los 0 y 30 cm de profundidad. El suelo se clasifica como franco, con una composición textural de 51,92 % de arena, 19,88 % de arcilla y 29,20 % de limo, lo que indica una estructura equilibrada que favorece la retención de humedad y la aireación. La resistencia a la penetración, con un valor de 1,28 kg/cm², no es restrictiva para el crecimiento de las raíces, lo que sugiere un suelo con buena porosidad y facilidad para el desarrollo vegetal. La temperatura del suelo, registrada en 22 °C, se clasifica como hipertermotérmica, típica de climas cálidos, lo que influye en los procesos biológicos y químicos del suelo (Huamán, 2024).

El pH del suelo es extremadamente ácido, con un valor de 4,37, lo que puede limitar la disponibilidad de nutrientes esenciales y afectar la actividad microbiana. Sin embargo, el contenido de materia orgánica es del 3,14 %, considerado medio, lo que contribuye a la fertilidad y estructura del suelo. Los niveles de nitrógeno también son medios (0,16 %), mientras que el fósforo (2,35 ppm) y el potasio (69,83 ppm) se encuentran en niveles bajos, lo que podría requerir enmiendas para optimizar el crecimiento de la vegetación. Además, la densidad aparente, muestreada entre los 0 y 10 cm de profundidad, es

de $0,78 \text{ g/cm}^3$, considerada ideal, lo que indica un suelo bien estructurado con buena porosidad y capacidad de retención de agua (Huamán, 2024).

En conjunto, estas características sugieren un suelo con potencial para sostener la vegetación del bosque remanente, aunque su acidez y bajos niveles de fósforo y potasio podrían representar desafíos para la productividad y la salud del ecosistema.

La parcela permanente de medición (PPM-4), presenta una dinámica forestal activa y diversa en sus diferentes estratos, evidenciando procesos de crecimiento, mortalidad y reclutamiento que reflejan la estructura y evolución del bosque remanente. En la categoría de la regeneración natural denominada brinzales, se registraron 34 individuos, con una mortalidad del 2,38 %, un reclutamiento del 11,40 % y un incremento medio anual del 43,62 %. Estos valores indican una alta tasa de renovación y crecimiento en este estrato, lo que sugiere una regeneración vigorosa y un ambiente favorable para el establecimiento de plántulas y juveniles, aunque la mortalidad moderada podría estar asociada a competencia o factores ambientales (Gutiérrez et al., 2023).

En el latizal bajo, compuesto por 67 individuos, se observó una mortalidad del 1,20 %, un reclutamiento del 2,90 % y un incremento medio anual del 21,29 %. Este estrato muestra una dinámica equilibrada, con un crecimiento significativo que refleja la transición de los individuos hacia etapas más avanzadas de desarrollo, aunque la mortalidad y el reclutamiento moderados sugieren cierta competencia por recursos.

El latizal alto, con 49 individuos, registró una mortalidad muy baja (0,13 %), un reclutamiento del 1,90 % y un incremento medio anual del 4,44 %. La casi nula mortalidad en este estrato indica condiciones favorables para la supervivencia de los árboles jóvenes que se consolidan, mientras que el reclutamiento y el crecimiento reflejan una continuidad en su desarrollo hacia el estrato superior.

En la categoría de los fustales, conformado por 165 individuos, se reportó una mortalidad del 0,27 %, un reclutamiento del 1,20 % y un incremento medio anual del 3,42 % (Gutiérrez et al., 2023). Este estrato, muestra una baja mortalidad y un reclutamiento moderado, lo que indica una estabilidad en la estructura del bosque y una capacidad de regeneración que asegura la persistencia del ecosistema forestal a largo plazo. En conjunto, estos datos reflejan un bosque en proceso de crecimiento y renovación, con una dinámica saludable en sus diferentes estratos.

Colina alta clase 2. Esta unidad está compuesta por colinas de fuerte disección con un nivel de base $> 80 \text{ m}$ a $< 300 \text{ m}$, con porcentaje de pendiente $> 70 \%$ hasta $<$

80 %. La superficie es 19,10 ha, que representa el 6,42 % del área total, por esto es considerado como bosque de protección.

2.1.9. Cambios en los sistemas de uso de la tierra

El cambio de uso de la tierra genera la mineralización, que es un proceso altamente dinámico que puede provocar la liberación de carbono en forma de dióxido de carbono (CO₂) o metano (CH₄), devolviendo estos gases a la atmósfera. Este fenómeno tiene un papel fundamental dentro del ciclo del carbono, ya que influye directamente en el equilibrio entre la captura y la emisión de gases de efecto invernadero. Además, la mineralización está estrechamente relacionada con la materia orgánica del suelo (MOS), de la cual constituye uno de sus componentes esenciales. Su impacto en la estabilidad y conservación del carbono en los ecosistemas terrestres hace que sea un proceso clave para comprender las dinámicas del suelo y su función en la mitigación del cambio climático (Acevedo et al., 2021).

La disminución del carbono orgánico del suelo (COS) es un reflejo del nivel de degradación que este presenta. En ese sentido, un suelo con un alto contenido de COS indica mejores condiciones de calidad y salud, mientras que un bajo nivel de este componente señala un suelo más deteriorado y con menor capacidad para sostener funciones ecológicas y productivas. Por lo tanto, el contenido de COS se considera un indicador clave para evaluar el estado general del suelo y su capacidad para mantener procesos biológicos esenciales (Loayza et al., 2020).

Cortés et al. (2025) concluyeron que, independientemente del tipo de cobertura vegetal presente ya sea pastos, melina o teca, el contenido de carbono orgánico total en el suelo fue más elevado en la capa superficial (0-30 cm) en comparación con las capas más profundas (30-60 cm y 60-100 cm). Esta tendencia sugiere que la mayor concentración de materia orgánica se encuentra en los primeros centímetros del perfil del suelo, lo cual puede atribuirse a la acumulación de residuos vegetales, raíces finas y la actividad biológica más intensa en esta zona. Estos resultados refuerzan la importancia de conservar y manejar adecuadamente la capa superficial del suelo, dado su papel esencial en el almacenamiento de carbono y la fertilidad del ecosistema, independientemente del tipo de vegetación que lo cubra.

2.2. Estado del arte

Quiñones (2022) investigó la capacidad de almacenar carbono orgánico los suelos (COS) en sistemas de producción de café (*Coffea arabica*) bajo sombra de plantas y plantación de maíz (*Zea mays*) en la Sierra Madre de Chiapas. Los muestreos de COS fueron

estimados a una profundidad de entre 0 hasta 30 cm. Los ecosistemas con vegetación secundaria arbórea registraron superior reserva de COS con una media de 103,22 Mg/ha, mientras que, los bosques de pino con encino registraron el valor más bajo con una media de 26,86 Mg/ha; el sistema de *Z. mayz* alcanzó 31,25 Mg/ha. El sistema de *C. arábica* rústico fue superior con 113,23 Mg/ha e inferior en monocultivo de *C. arábica* con 71,159 Mg/ha. Fue propuesto un modelo basado en el contenido de carbono llegando a explicar el nivel de COS en un 23,59 % de su variabilidad para estos sitios. Entre las variables que más influyen se tiene el carbono almacenado en las hojarascas y la gradiente altitudinal. Hubo mayor COS reservado en los sitios meno perturbados por los pobladores, el ecosistema forestal presentó hasta tres veces más COS al compararlas a cada uso de los suelos como producto de actividades antropogénicas como la agricultura, plantaciones forestales y de árboles frutales; el bosque de conífera resultó tener la mayor cantidad de COS almacenado al compararla a cada ecosistema agrícola.

Los sistemas de uso de la tierra evidencian diferentes cantidades de COS almacenado, siendo el caso de Nariño-Colombia, al muestrear suelos desde la superficie hasta 30 cm de profundidad se encontró para un sistema de café con una mezcla diversa de musáceas, árboles multipropósito, árboles maderables y frutales registró 80,43 tC/ha, en el caso del asocio entre café y banano fue 71,57 tC/ha, el café al asociar a árboles multipropósito registró 68,56 tC/ha y en menor medida cuando se tiene café a pleno sol con solo 58,32 tC/ha, además tener elevada diversidad y la abundancia de especies dentro del sistema agroforestal multiestrato se correlaciona con una mayor acumulación de COS en comparación con el monocultivo de *C. arábica* (Delgado-Vargas y Benavides, 2025).

Carvajal-Agudelo y Andrade (2020) realizaron un estudio en el Municipio de Yopal en el corregimiento Tacarimena, compuesta por ocho veredas, que se caracteriza por presentar un clima cálido-húmedo donde la media anual de lluvias es 2 270 mm; siendo el periodo de estiaje que abarca desde diciembre hasta marzo y el periodo de lluvias es desde abril hasta noviembre, con gradiente altitudinal inferior a los 380 m. Se estimó la biomasa en el suelo y sobre el suelo para los sistemas de uso de tierra: Plátano con sombrío (SAF+ plátano), Sistema silvopastoril bajo (SSPB), Cacao con sombrío (Ca+S), Sistema silvopastoril alto (SSPA), Cítricos (C), Mata de monte (MM) y Bosques de galería (BG). Utilizaron el diseño completo al azar abarcando cinco repeticiones, siendo establecido para el muestreo parcelas temporales, recolectaron datos de 832 árboles distribuidas en 66 especies botánicas. La biomasa sobre el suelo fue estimada con modelo alométrico que contenían variables como altura total y diámetro a la altura del pecho, mientras que la biomasa de los suelos como es el

caso de las raíces fue estimada mediante un modelo general específico para bosque tropical. Cada uso de los suelos estudiados posee el servicio de capturar carbono, sobresaliendo en carbono BG y MM, pero el más bajo carbono almacenado se registró para SAF+plátano. Potenciales cambios de sistemas productivos a BG y MM implica que ganen carbono (adicional), pero cambios contrarios como deforestar representa emitir CO₂.

En el Perú, Vallejos-Torres et al. (2024) midieron el COS a distinta profundidad desde la superficie del suelo en el bosque seco tropical del departamento de San Martín. Hicieron la delimitación de 24 cuadrantes con 100 m² del bosque primario (aproximadamente 200 años), intervenido (aproximadamente 50 años de intervenido) y deforestado (hace 10 años), siendo extraído 120 muestras de suelos distribuidos de cinco profundidades. Fueron calculados la textura, densidad aparente, COS, densidad de COS y erosionabilidad de los suelos. Como resultado principal, el COS entre los 0 a 20 cm del bosque primario alcanzó 79,5±21,3 t/ha, el bosque intervenido obtuvo 58,5±11,8 t/ha y el bosque deforestado registró 41,8±10,0 t/ha. La erosionabilidad del suelo K fue 0,065 en el bosque primario, 0,076 en bosque intervenido y 0,093 en el bosque deforestado. La densidad del COS registró la media para el bosque primario de 7,6±5,1 t/ha, bosque intervenido de 6,2±3,6 t/ha y bosque deforestado con 4,7±2,7. Se concluye que, el bosque primario tuvo superior cantidad y densidad del COS, luego el bosque intervenido y deforestado, pero se encontró un patrón opuesto para la erosionabilidad de los suelos. Dichos patrones son marcados entre la superficie hasta los 40 cm de profundidades de los suelos.

En el Perú, Vallejos-Torres et al. (2023) estimaron el COS en parcelas con distintas coberturas vegetales en asocio a *C. arábica* y bosque secundario en distintos distritos del departamento de San Martín. Calcularon el umbral crítico, punto de saturación y déficit orgánico de C en dichos suelos de la Amazonía. El asocio de la geografía, las propiedades físicas de los suelos, propiedades químicas de los suelos y el COS se estimó por medio del análisis de componentes principales. En todos los lugares muestreados, las existencias de COS tuvieron una media del 69,19 t/ha, con 48,95 t/ha constituyendo C inorgánico. El stock más alto de COS (225,28 t ha⁻¹) se observó bajo bosque secundario en el distrito de Jepelacio. Las existencias de COS se correlacionaron positivamente con la altitud y el contenido de CaCO₃ solo en los bosques secundarios. La cantidad actual medida de C orgánico dentro de 15 cm de profundidad del suelo fue de 28,5 g C kg⁻¹, que es muy baja y cercana al umbral crítico (20,6 g C kg⁻¹), estimado en base a sus contenidos de arcilla y limo. Las mediciones del COS indican un estado preocupante, porque se encuentran cercanos al umbral crítico, exponiendo a estas zonas a una degradación más fuerte y mayor.

Sahu et al. (2023) estudiaron el fraccionamiento de carbono de suelos tropicales en cuanto a su acumulación a partir de la oxidación química diferencial que involucra dicromato de potasio y ácido sulfúrico. El trabajo se llevó a cabo en un bosque tropical y pastizales (ubicados a una distancia media de 60 m entre sí) en la India. El carbono fácilmente oxidable (reserva de carbono activo) dominó los dos usos de la tierra estudiados (bosques y pastos) más que la fracción menos oxidable (reserva de carbono pasiva). El índice de reserva de carbono y el índice de gestión de carbono calculado a partir de los resultados de las dos reservas de carbono favorecieron a las tierras forestales para el secuestro de carbono a largo plazo y se correlacionaron significativamente con la reserva de carbono activo ($p < 0,05$). Los resultados mostraron además una variación significativa del stock acumulado del COS en el suelo del bosque (248,92 t/ha) y de las tierras de pastoreo (184,21 t/ha) ($p < 0,05$). La profundidad del suelo no mostró ningún impacto en la distribución de la fracción de carbono. Por lo tanto, se puede concluir que un cambio del uso de la tierra altera la estabilidad así como su labilidad del carbono orgánico y su almacenamiento en suelos tropicales. Por lo tanto, la evaluación periódica de los reservorios de carbono y la posterior gestión del carbono pueden mejorar las perspectivas de permanencia a largo plazo del carbono en el suelo.

Surco-Huacachi y Garate-Quispe (2022) cuantificaron el carbono en SAF combinadas con *T. cacao* en cuatro distritos de Madre de Dios. Se escogió cuatro SAF con *T. cacao* con edades de 8, 10, 12 y 15 años de establecido, a la cual fue medido el carbono de los suelos, las hojarascas y la vegetación prosiguiendo la mediante metodología del ICRAF. La acumulación de carbono en las hojarascas fue de 7,29 tC/ha a los 8 años, 22,23 tC/ha a los 10 años, 24,57 tC/ha a los 12 años y 29,70 tC/ha a los 15 años; en el caso del COS realizado entre 0 a 30 cm de los suelos, obtuvieron en promedio 23,58 tC/ha a los 8 años, 14,33 tC/ha a los 10 años, 32,31 tC/ha a los 12 años y 27,06 tC/ha a los 15 años. Concluyen que las diferentes edades del SAF presentan diferentes cantidades de carbono total almacenado.

En el distrito de Soritor que se ubica en la provincia de Moyobamba de la región San Martín, Guzman (2024) realizó el muestreo de 10 parcelas agroforestales con *T. cacao* que se caracterizaban por presentar una edad entre los 4 a 8 años de establecido donde empleaban como sombra a *Inga edulis* (guaba), como resultados, encontró carbono en promedio para la necromasa de 2,90 t/ha, las hojarascas con 2,94 t/ha, las raíces finas con 6,41 t/ha y el COS muestreado hasta una profundidad de 20 cm registró 42,50 tC/ha.

Morales-Inocente et al. (2020), investigaron en la región forestal de El Salto, México, observaron que en bosques dominados por la especie *Pinus durangensis*, el COS almacenado hasta los 30 cm alcanzó un total de 187,06 toneladas por hectárea. Esta cantidad

se distribuye de manera desigual en los distintos estratos del suelo. Para la capa del suelo superficial entre 0 a 10 cm, se registraron $69,15 \pm 13,59$ tC/ha, una cantidad significativamente mayor en comparación con los niveles encontrados entre 10 y 20 cm, donde se almacenaron $61,19 \pm 14,42$ tC/ha, y en el estrato de 20 a 30 cm, con $56,72 \pm 15,61$ tC/ha. Este resultado destaca mayor concentración de COS en la capa superior de los suelos.

Montesdeoca et al. (2024) cuantificaron el potencial de concentración del COS en predios no cultivadas y con cultivos de *T. cacao*. Abarcaron tres clones de *T. cacao*: EET-116, EET-103, EET-95 plantados bajo el método cuadrado a una distancia de 4 x 4 m. La variación de la densidad aparente en el perfil del suelo con el horizonte A (0-20 cm) de textura franco y $1,2 \text{ g/cm}^3$, el horizonte B (20 a 45 cm) de textura franco y $1,11 \text{ g/cm}^3$, el horizonte A2 (45 a 61 cm) de textura franco arenoso y $1,15 \text{ g/cm}^3$, el horizonte CS (61 a 70 cm) de textura franco arenoso y $1,13 \text{ g/cm}^3$, el horizonte A3 (70 a 80 cm) de textura franco arenoso y $1,03 \text{ g/cm}^3$, el horizonte CS2 (80 a 130 cm) de textura arena franca y $1,19 \text{ g/cm}^3$ y el horizonte A4 (130 a 150 cm) de textura arena franca y $1,19 \text{ g/cm}^3$. La mayor cantidad de COS fue $68,63 \text{ kg/m}^2$ presentado en el clon EET-95 acompañado de sombra y muestreado entre 0 a 5 cm, mientras que, a la profundidad de 5 a 10 cm, así como 10 a 20 cm los mayores promedios se reflejaron en el cultivo sin sombra con $12,87$ y $8,52 \text{ kg/m}^2$.

En Honduras, Mach (2024) realizó el muestreo de suelos hasta una profundidad de 20 cm, en donde encontró para el ecosistema bosque con especies de la fase 2 y 3 de la sucesión ecológica con una densidad aparente de $1,35 \text{ g/cm}^3$ y COS $122,35 \text{ t/ha}$, el ecosistema vegetación secundaria que contiene especies de la fase 1 de la sucesión ecológica con una densidad aparente de $1,33 \text{ g/cm}^3$ y COS $91,87 \text{ t/ha}$, el ecosistema potrero en transición que está pasando de un potrero intensivo a una vegetación secundaria con regeneración natural donde posee una densidad aparente de $1,90 \text{ g/cm}^3$ y COS $112,46 \text{ t/ha}$, y también el potrero intensivo que se encuentra en actividad ganadera con una densidad aparente de $1,59 \text{ g/cm}^3$ y COS $101,07 \text{ t/ha}$.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de estudio

3.1.1. Ubicación política y localización geográfica

El trabajo de investigación fue realizado dentro de seis sistemas de uso de la tierra: Bosque de Colina Baja (PPM1), Bosque de Colina Alta (PPM4) ubicada en el BRUNAS, Sistema agroforestal con *T. cacao* del Banco de Germoplasma, Sistema aguajal perteneciente a la Facultad de Recursos Naturales Renovables, Sistema bambusal del BRUNAS y un Sistema de Cacao (CCN51) ubicado en el Sector Bella Baja (Tabla 1) y la etapa vinculada al laboratorio se ejecutó en la Escuela Profesional de Conservación de Suelos y Agua de la UNAS, que se ubica por la margen derecha considerando el río Huallaga en el distrito Rupa Rupa de la provincia de Leoncio Prado en el departamento Huánuco.

Tabla 1. Sistemas evaluados con sus coordenadas UTM (Datum WGS 84, UTM/UPS).

Sistemas	Coordenadas		Altitud (m s.n.m.)
	Este (m)	Norte (m)	
PPM 1(Cb)	390 760	8 970 880	780
PPM 4(Ca)	391 560	8 970 320	815
SAF (Cacao)	390 970	8 969 865	745
Aguajal(Ta)	390 166	8 970 831	670
Bambusal(Cb)	390 564	8 970 527	679
Cacao (CCN51)	386 762	8 968 988	679

Cb= Colina baja Ca = Colina alta Ta= terraza alta.

3.1.2. Zona de vida

Basada en las zonas de vida clasificadas y el esquema bioclimático elaborado por Holdridge (Sabino et al., 2019) el distrito Rupa Rupa se ubica dentro de la formación boscosa muy húmedo Premontano Tropical (bmh - PT), mientras que, en base a las regiones naturales, está localizado en Rupa Rupa o Selva Alta (Pulgar, 2014).

3.1.3. Condiciones climáticas

El clima que predomina en el área de estudio suele presentar elevada pluviosidad con la precipitación anual promedio de 3 428,8 mm. Las mayores precipitaciones se producen en los meses de octubre a abril y alcanza un máximo extremo en el mes de enero con un promedio mensual de 483,6 mm. Asimismo la época seca que es julio a setiembre con

un stress hídrico, Durante el año, sobresale la temperatura máxima de 29,4 °C, mínima de 24,6 °C y en promedio es 24,3 °C, para el caso de la humedad relativa es 85,0 % (Estación José Abelardo Quiñones, 2015; citado por Soto, 2016).

3.1.4. Fisiografía

Debido a que la mayoría de las parcelas de cada sistema de uso de la tierra se encontraban en el Bosque Reservado de la UNAS, se utilizó lo determinado por Puerta (2017) al juntar la gradiente altitudinal con el porcentaje de la pendiente para elaborar el mapa fisiográfico distribuidos en: Colinas bajas ligeramente disectada (CbD1), colinas bajas moderadamente disectada (CbD2), Colinas altas ligeramente disectada (CaD1), colinas altas moderadamente disectada (CaD2), colinas altas fuertemente disectada (CaD3), lomadas (Lo), taludes (Td) y montañas bajas (Mb).

3.1.5. Suelos

Según Condor (2019), al muestrear los suelos del BRUNAS hasta una profundidad de 30 cm, se obtuvieron los siguientes resultados: en la unidad fisiográfica montaña se registró un contenido de materia orgánica del $3,99 \pm 0,32$ %, su densidad aparente fue $1,48 \pm 0,03$ g/cm³ y un carbono orgánico del suelo (COS) de $101,28 \pm 6,63$ t/ha. En la unidad de colina alta clase 2, se obtuvo un $3,74 \pm 0,29$ % de materia orgánica, la densidad aparente fue $1,48 \pm 0,07$ g/cm³ y un COS de $95,64 \pm 10,18$ t/ha. La unidad colina alta clase 1 presentó un $3,36 \pm 0,16$ % de materia orgánica, $1,57 \pm 0,13$ g/cm³ de densidad aparente y un COS de $91,04 \pm 11,17$ t/ha. Por su parte, en la unidad colina baja clase 2 se encontró un $3,39 \pm 0,31$ % de materia orgánica, su densidad aparente fue $1,55 \pm 0,10$ g/cm³ con un COS de $90,88 \pm 13,32$ t/ha. Finalmente, en la unidad colina baja clase 1 se reportó un $3,34 \pm 0,17$ % de materia orgánica, la densidad aparente fue $1,50 \pm 0,07$ g/cm³, un COS de $85,75 \pm 0,84$ t/ha.

3.1.6. Accesibilidad

El acceso al BRUNAS es por la Carretera Central km 1,21 teniendo en consideración la ciudad capital distrito (Tingo María). El acceso desde la ciudad de Huánuco es aproximadamente 121 km que se realiza en tres horas de viaje, desde la capital Lima - Canta - Huallay - Huánuco es 358 Km que se recorre en 7 horas y 45 minutos, mientras que de Lima - La Oroya - Huánuco que es 421 Km lo realizan en 9 horas y 47 minutos.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Materiales y equipos

Entre los materiales se consideró la wincha de 50 m, machetes, jalones o estacas, rafia, libreta de campo, lapiceros, plumones indelebles, marco de madera de 1 m x 1 m, y de 0,5 m x 0,5 m, bolsas de papel, bolsas de plástico de polipropileno de 1 kg, hojas de

periódico, cilindros de Uhland. Como parte de los equipos de campo se utilizó un receptor GPS y una cámara fotográfica.

Entre los materiales de laboratorio estuvo considerado los vasos de precipitación con capacidad de 50 mL y 100 mL, pipetas graduadas de 10 mL, matraces Erlenmeyer de 150 mL y picetas. Como parte de los equipos de laboratorio se utilizó la estufa eléctrica, titulador electrónica y balanza digital. Además, los reactivos e insumos de laboratorio se hizo uso del bicromato de potasio 2N, agua destilada, sulfato ferroso amoniacal, di fenilamina sulfúrica, ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 96,0 % de concentración y sal de Mohr concentrado a 0,2N.

3.2.2. Criterios de la investigación

3.2.2.1. Nivel de investigación

La investigación fue de nivel descriptiva debido a que se buscó analizar detalladamente las características del almacenamiento de carbono orgánico en cada sistema de uso de la tierra. Su objetivo fue identificar patrones, la relación de variables, así como ofrecer la comprensión detallada sobre el objeto de estudio (Révalo et al., 2023).

3.2.2.2. Tipo de investigación

La investigación se caracterizó por ser de tipo aplicada y halométrico, debido a que buscó la aplicación de distintas informaciones teóricas y fundamental para que solucione el problema práctico o tecnológico en un determinado contexto; la investigación se enfocó a generar solución práctica para un problema real (Révalo et al., 2023) como es el conocer las diferencias en el almacenamiento de carbono orgánico para los seis sistemas de uso de la tierra enmarcados en el distrito Rupa Rupa.

3.2.2.3. Método de la investigación

La investigación presentó el método inductivo, ya que para López-Roldán y Fachelli (2015), el principio de inducción se garantiza al reiterarse cada evidencia, ya que, una suficiente cantidad de informaciones o casos que se observaron, tienen una determinada propiedad, por lo tanto se llegaría a la formulación de una ley general respecto a dicha propiedad, en este caso el registro de las repeticiones sobre el carbono almacenado permitirá llegar a conclusiones para cada sistema de uso de la tierra.

3.2.2.4. Variable de la investigación

- Variable de caracterización (X):
Sistemas de uso de la tierra
- Variable de interés (Y):
Almacenamiento del carbono orgánico

3.2.2.5. Operacionalización de variables

Tabla 2. Operacionalización de variables.

Variabes	Dimensión	Indicadores
Sistema de uso de la tierra	Uso de la tierra	PPM 1
		PPM 4
		SAF (Cacao)
		Aguajal
		Bambusal
		Cacao (CCN51)
Almacenamiento de carbono orgánico	Carbono orgánico en los suelos	Carbono en las hojarascas
		Carbono en las raíces
		Carbono orgánico en los suelos

3.2.2.6. Diseño de la investigación

La investigación prosiguió el diseño no experimental, porque no se realizó manipulaciones para la variable sistema de uso de la tierra y un menor nivel de control sobre las variables debido a que no se uniformizó las edades, el tipo de suelos y el manejo asignado a los sistemas de uso de la tierra. Las investigaciones no experimentales se centran en la observación y realizan una descripción de las diferencias o relaciones entre variables producidas de manera natural (Révolo et al., 2023).

3.2.2.7. Población y muestra

Para los autores Arias y Covinos (2021), una población es el conjunto global de los sujetos, elementos o eventos cuyos rasgos son similares y están siendo objeto a estudiar, en el caso del presente estudio corresponde a las áreas que abarca los seis sistemas de uso de la tierra evaluadas. Mientras que la muestra viene definida como el subconjunto que se seleccionó de los sujetos, entidades o eventos que se extraen del universo o población, cuya finalidad es estudiarla y luego se hiciera inferencia hacia la población, en este caso se estudió parcelas de 500 m² en donde el ancho fue de 10 m y el largo 50 m (Macdicken, 1997) para cada uno de los seis sistemas de uso de la tierra evaluado.

3.2.2.8. Análisis estadístico

Para comparar los resultados obtenidos de los sistemas de uso de la tierra, se asumió el diseño completamente al azar (DCA) donde los sistemas de uso de la

tierra constituyeron los grupos a comparar; en el caso de encontrar significación estadística se procedió a la agrupación de los sistemas mediante la prueba de Duncan (p -valor $\leq 5,0$ %).

3.2.3. Metodología

3.2.3.1. Estimación del carbono almacenado en hojarascas en los diferentes sistemas de uso de la tierra

Se eligieron cada sistema de uso de la tierra, localizados dentro de la provincia Leoncio Prado, en las cuales se delimitaron cada parcela basada en lo descrito por Rüginitz et al. (2009), previamente georreferenciado. Los sistemas elegidos fueron: Suelo con bosque de colina alta (PPM4), Bosque de colina baja (PPM1), suelo con sistema agroforestal con diferentes clones de cacao, suelo con sistema aguajal, suelo con sistema bambusal y el sistema con cacao (CCN51); cada sistema consta de una hectárea aproximadamente.

a. Sistema de uso cacao CCN51

El sistema presenta un suelo franco arenoso con pendiente menor de 5 %, tiene un manejo tradicional donde el agricultor no realiza el abonamiento ni fertilización, pero realiza labores culturales como poda oportuna, aplicación de insecticida y fungicida practica el deshierbo en forma mecánica, la plantación está instalado bajo un sistema de tres bolillos, la plantación se estima una edad de 10 a 12 años, donde presenta poca producción por causa de las altas cantidades de plagas y enfermedades.

b. Sistema agroforestal (SAF) - UNAS

El sistema presenta un suelo arcilloso ubicado en una colina alta. Este sistema agroforestal tiene un manejo tradicional donde se realizan labores de técnicas de abonamientos y podas sincronizadas (TAPS) con respecto al cultivo de cacao y con las plantas forestales se encuentran alrededor y dentro de la plantación del cacao.

c. Sistema de bosque de colina baja (PPM-1)

Está ubicado en una colina baja (Cb) en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado del departamento Huánuco, dicha unidad se constituye por materiales sedimentarios, siendo una de las superiores características donde se manejan y aprovechan los árboles maderables, además cuenta con la plantación de *Cedrelinga cateniformis* (tornillo) así como el ecosistema de plantación de los bambúes. El área que abarca esta parcela es de 10 000 m² donde los lados son 100 m x 100 m.

d. Sistema de bosque de colina baja (PPM-4)

Se encuentra establecido en una colina alta (Ca) que se considera en bosque de protección, la unidad se constituye por materiales sedimentarios,

siendo de superior característica para manejar y aprovechar árboles maderables, además posee una plantación de *C. cateniformis* así como la plantación de bambúes.

e. Sistema de uso con bambú

Está ubicado en una colina baja (Cb) considerado como bosque de protección, dicha unidad se constituye de material sedimentario, siendo una de las mejores características donde se maneja y aprovecha especies forestales.

f. Sistema de uso en aguajal

Se instaló en el aguajal al costado del módulo de la Facultad de Recursos Naturales y Renovables en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado del departamento Huánuco con las coordenadas, 0390161 m E, 8970839 m N a 670 m s. n. m., está ubicado en una terraza media presenta un suelo húmedo tiene un distanciamiento de 5x5 m distribuidos bajo el método en tres bolillos, el aguajal tiene un tiempo de vida aproximadamente 23 años de edad, no tiene un manejo agronómico.

De las unidades de estudio

La etapa de campo consistió en establecer aleatoriamente en cada sistema de uso dos subparcelas con 500 m² de área, en dichas áreas se delimitó un cuadrante de 5 x 50 m (Macdicken, 1997) donde fue muestreado las hojarasca que estuvo distribuido equitativamente en 20 cuadrantes (Figura 1).

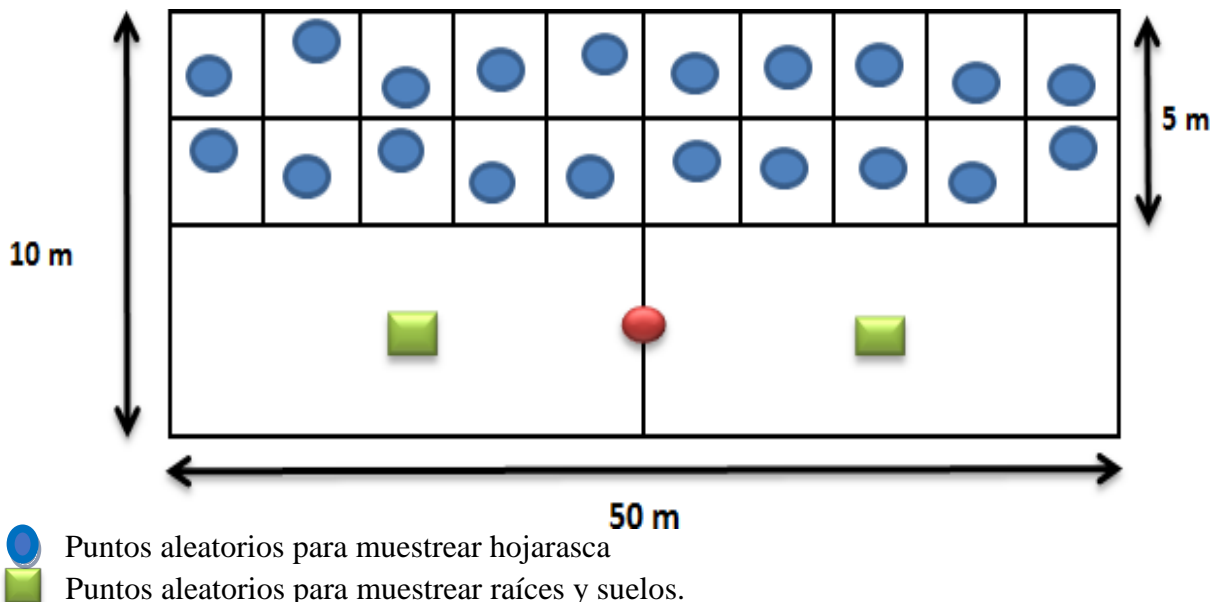


Figura 1. Distribución de los cuadrantes para realizar el muestreo.

Análisis para la obtención de la muestra de hojarasca

La cuantificación de la hojarasca se realizó considerando todos los componentes vegetales, como hojas, flores, frutos, semillas, fragmentos de estos, ramitas y

materiales leñosos con un diámetro menor a los 2,0 cm. Para ello, se juntaron todas las hojarasca presentes en los cuadrantes de 0,50 x 0,50 m (0,25 m²) que se establecieron aleatoriamente dentro de las subparcelas temporales con 50 x 10 m, siguiendo la metodología propuesta por Macdicken (1997). Estas subparcelas se dividieron a parcelas más pequeñas de 5 x 5 m, y dentro de ellas fue colocado un cuadrante de madera para obtener las muestras (Figura 2). Una vez recolectada las hojarasca, se registraron los pesos frescos totales por cuadrantes de 0,25 m². Posteriormente, las muestras fueron colocadas a la estufa con 75 °C de temperatura por 72 horas que alcanzó peso constante, eliminando la humedad y obteniendo el peso seco. Este proceso permitió calcular la biomasa de la hojarasca mediante diferencias entre los pesos frescos y pesos secos, siguiendo el protocolo de Rüginitz et al. (2009).

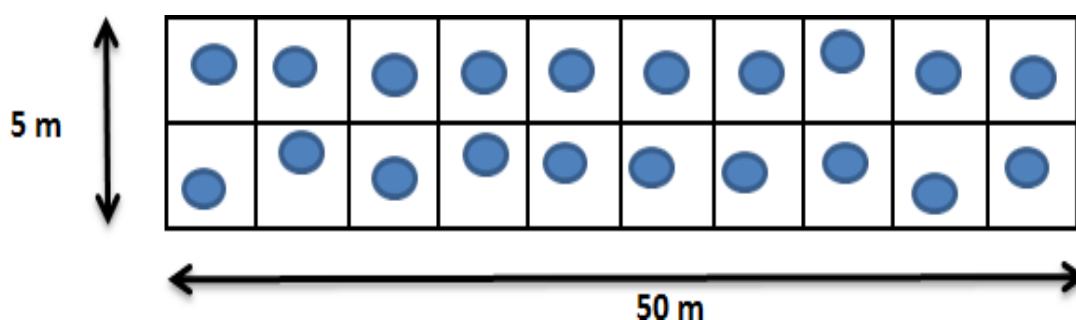


Figura 2. Esquema para el muestreo de las hojarasca (Macdicken, 1997).

Biomasa de hojarasca

Se recolectaron y pesaron las hojarasca dentro de cada sub cuadrante de 0,25 m², de la totalidad de hojarasca se separó una submuestra con menor peso que luego se rotuló y colocó dentro de una estufa donde alcanzó su peso constante debido a la pérdida de humedad, luego se pesó y fue obtenido su biomasa mediante la ecuación:

$$Bh \text{ (t/ha)} = ((PSM/PFM) \times PFT) \times 0,04$$

Siendo:

Bh = Materia seca o biomasa de las hojarasca

PSM = Peso seco (g) de cada submuestra

PFM = Peso fresco (g) de cada submuestra

PFT = Total de peso fresco (g) de las hojarasca

0,04 = Valor para convertir a hectárea

3.2.3.2. Estimación del carbono almacenado en las raíces en los diferentes sistemas de uso de la tierra

Con fines de que se obtengan las muestras del carbono orgánico en los suelos y las raíces fueron establecidos dos subparcelas con dimensiones de 5,0 x 25,0 m donde se ubicaron aleatoriamente cuadrantes de 1,0 m² teniendo en consideración el método propuesto por Rüginitz et al. (2009), además, se aperturó calicatas obteniendo muestras de suelos para su análisis físico y químico (Arévalo et al., 2002), siendo la profundidad de muestreo se realizó hasta los 30 cm distribuidos en 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 30 cm.

Análisis para el muestreo y obtención de la muestra de suelo

Se utilizó la metodología que evalúa la biomasa de los suelos, raíces y las hojarascas recomendadas por parte del Centro Internacional de Investigación en Agroforestería. Para cada parcela de 10,0 x 50,0 m se eligieron aleatoriamente dos cuadrantes con 1,0 m² donde se aperturó calicatas con dimensiones de 0,30 x 0,30 x 0,30 m, distribuidos en profundidades de 0,0 a 0,1, 0,1 a 0,2 y 0,2 a 0,3 m (Rüginitz et al., 2009) de donde se obtuvieron las muestras de los suelos (Figura 3). Adicionalmente, en los rangos de profundidad se extrajo empleando un barreno submuestras de suelos hasta que se obtenga un peso aproximado de 500 gr que fue la muestra de suelos (Rüginitz et al., 2009).

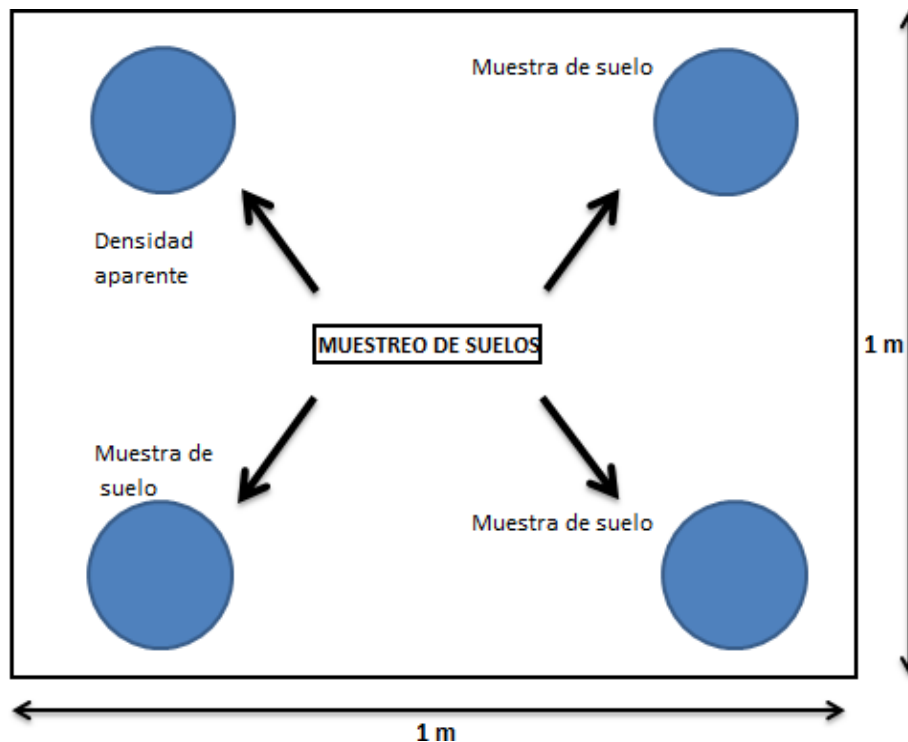


Figura 3. Diagrama para los muestreos del carbono almacenado en los suelos y las raíces (Rüginitz et al., 2009).

Análisis para la obtención de la muestra de raíces

Para la obtención de muestras para el carbono almacenado en las raíces fue tomado en cuenta lo propuesto lo detallado en el Centro Mundial Agroforestal (Rügnitz et al., 2009). En cada calicata cuyas dimensiones fueron 0,30 x 0,30 x 0,30 m de ancho, largo y profundidad se obtuvieron muestras, las cuales se tamizaron acompañada de agua hasta que se separó la totalidad de raíces, se mantuvo en cuenta los tres rangos: 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 30 cm, posteriormente fueron pesados en la balanza de precisión, determinando sus pesos húmedos, luego se introdujo a la estufa graduada su temperatura a 75 °C por un periodo de tiempo de 72 horas donde ya las muestras mantenían el peso constante, luego se pesaron nuevamente las raíces en estado seco con la cual se obtuvo sus biomásas mediante la diferencia sus pesos. Basado en estos datos, fueron calculados los totales en toneladas de la materia seca contenidas en cada hectárea de los sistemas de uso (t MS/ha).

Carbono en el sistema radicular

En la determinación del carbono que se almacenan en las raíces por cada parcela, fue utilizado la siguiente expresión:

$$\text{Carbono por parcela}^{-1}: BR * 0,45$$

Siendo:

$$BR = \text{Materia seca o biomasa de las raíces}$$

3.2.3.3. Determinación del carbono total en los diferentes sistemas de uso de la tierra

Obtención de muestras para el cálculo de densidad aparente

Para las mismas profundidades como son de 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 30 cm, así como en los cuadrantes establecidos donde se muestrearon para conocer el contenido de carbono orgánico de los suelos se introdujeron cilindros cuyo volumen era conocido empleando el martillo, posteriormente se sacaron los cilindros llenos de suelos, siempre teniendo precaución de no dañar las muestras que se encontraban dentro de ellas. Luego se trasladaron al laboratorio donde fueron secados los suelos contenidos en los cilindros durante un periodo de 24 h a 105 °C, se utilizó la fórmula (Macdicken, 1997):

$$DA \text{ (g/cc)} = PSN/VCH$$

Siendo:

$$DA = \text{Densidad aparente de los suelos}$$

$$PSN = \text{Peso seco de los suelos en los cilindros}$$

VCH = Capacidad volumétrica de cada cilindro

Determinación de la materia orgánica

Para la determinar el contenido del carbono que se almacenan en los suelos, se utilizó el método de Walkley y Black modificada por Florida y López (2011), en el cual el valor del % MO (porcentaje de materia orgánica) fue determinado empleando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ M.O.} = (((a-b) \cdot 0,003 \cdot 1,724) / p) \cdot 100$$

Siendo:

- a = Bicromato de potasio en mL
- b = Sal ferrosa o sal de Mohr gastado en mL (gastado de la titulación)
- 0,003 = Factor constante del carbón
- 1,724 = Factor constante de Van Vammelen
- p = Peso de cada muestra de los suelos

Cálculos del carbono porcentual en los suelos distribuidos por horizontes de muestreo

Se determinó mediante la fórmula:

$$\text{C.O. (\%)} = \text{M.O. (\%)} \div 1,724$$

Siendo:

- C.O. (%) = Contenido porcentual de carbono.
- M.O. (%) = Materia orgánica expresada en porcentajes.
- 1,724 = Factor constante de Van Vammelen.

Cálculo de los pesos del volumen para los suelos

La determinación de los pesos del volumen para los suelos distribuidos en los horizontes donde se realizaron los muestreos, fue utilizada la fórmula siguiente:

$$\text{PVs (t/ha)} = \text{Da} \cdot \text{Ps} \cdot 10\,000$$

Siendo:

- PVs = Peso del volumen de los suelos
- Da = Densidad aparente
- Ps = Profundidad o espesor del horizonte de los suelos (m)
- 10 000 = Valor constante

Cálculos del carbono orgánico almacenados en el suelo (COS) en horizontes de muestreos

Teniendo en consideración el valor porcentual del carbono orgánico, así como cada densidad aparente, fue estimado el carbono orgánico almacenado en los suelos (Andrade y Ibrahim, 2003):

$$\text{COS} = \text{CO\%} \times \text{Da} \times \text{Ps}$$

Siendo:

COS = Carbono orgánico en los suelos expresado mediante tC/ha

CO% = Porcentaje de carbono en el suelo

Da = Densidad aparente

Ps = Profundidad o espesor de los muestreos (cm)

Cálculos del carbono total

En la determinación del carbono que se almacenan dentro de los sistemas de uso, fue utilizada la ecuación siguiente:

$$\text{CT (t/ha)} = \text{CBV} + \text{CS}$$

Donde:

CT = Total de carbono en el sistema de uso

CBV (t/ha) = Total del carbono en la biomasa vegetal

CS = Contenido de carbono en los suelos

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Carbono almacenado en hojarasca

Los sistemas de uso de la tierra registraron diferencias estadísticas significativas con la cual se rechaza la hipótesis nula para aceptar la hipótesis alterna concerniente a que el carbono almacenado en hojarasca de al menos dos sistemas de uso es diferente (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis de varianza para el carbono almacenado en hojarasca de los diferentes sistemas de uso.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	GL	Media cuadrática	F	Sig.
Sistemas de uso de la tierra	3,402	5	0,680	2,552	0,031*
Error aleatorio	30,391	114	0,267		
Total	33,793	119			

*Significativo a un 95 % de confiabilidad.

El sistema conformado como Cacao CCN 51 Bella Baja y el PPM 4 se caracterizaron por tener almacenado mayor contenido de carbono en la hojarasca con una media de 1,399 y 1,353 tC/ha respectivamente, mientras que en el caso del sistema Aguajal se reportó el menor promedio con tan solo 0,899 tC/ha para la variable señalada (Tabla 4 y Figura 4), resultado superior lo reporta Ramírez (2024) en una plantación de *T. cacao* donde la media acompañada de la desviación estándar fue $8,89 \pm 2,29$ tC/ha, esta diferencias pudo estar atribuido a la edad de la plantación, la densidad de las plantas establecidas, la pendiente del terreno y también a la labor de manejo como es el caso de la poda que en el antecedente redactado lo realizaban tres veces por año y estas hojas con ramas resultado de la poda es un aporte significativo de la hojarasca sobre el suelo; además, el aporte de la hojarasca en los sistemas de uso es favorable debido a que Quiñones (2022) al elaborar un modelo matemático para el COS encontró que hay una influencia del contenido de hojarasca, horizonte de fermentación, sombra, pendiente y altitud.

En el sistema de uso bambusal, se registró un aporte de carbono de 1,19 tC/ha (Tabla 4), un valor significativamente menor al reportado por Acuña (2023), quien obtuvo una media de 31,21 tC/ha. Esta notable diferencia podría atribuirse a la distancia en la que se realizó el muestreo de las hojarascas, ya que, según la autora, existe una variación considerable en los valores de carbono almacenado dependiendo de la proximidad a la base de las matas de bambú. Por ejemplo, Acuña (2023) encontró que, a 2 metros de la base de las

matas, el carbono almacenado alcanzó un promedio de 62,71 tC/ha, mientras que a 5 metros se redujo a 28,48 tC/ha, y a 10 metros disminuyó drásticamente a 2,43 tC/ha. Esto sugiere que la acumulación de hojarasca y, por ende, el carbono almacenado, está fuertemente influenciado por la cercanía a las matas de bambú, donde la caída de hojas y residuos vegetales es más abundante. Por lo tanto, la ubicación del muestreo es un factor crítico que puede explicar las discrepancias entre los estudios; este hallazgo resalta la importancia de estandarizar los protocolos de muestreo en estudios de carbono, considerando la distribución espacial de la vegetación para obtener resultados más precisos y comparables. Además, subraya la necesidad de evaluar la variabilidad espacial en sistemas como los bambusales, donde la distribución de la biomasa no es uniforme.

Tabla 4. Prueba de Duncan para carbono en hojarasca en diferentes sistemas de uso.

Sistema de uso	N	Media (tC/ha)	Subconjunto
Cacao CCN 51 Bella Baja	20	1,399	a
PPM 4	20	1,353	a
Bambusal	20	1,191	ab
SAF Banco de Germoplasma	20	1,104	ab
PPM 1	20	1,091	ab
Aguajal	20	0,899	b

Letras diferentes demuestran significancia estadística.

El mayor aporte de carbono proveniente de la hojarasca en la PPM 4, con un promedio de 1,353 tC/ha, en comparación con la PPM 1, que registró una media de 1,091 tC/ha (Figura 4), evidencia una diferencia significativa en la dinámica de captura de carbono entre ambos sitios. Esta variación resulta especialmente relevante si se considera que la PPM 4 presenta una menor densidad de regeneración natural, con 150 individuos (Gutiérrez et al., 2023) y 564 árboles con un diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor o igual a 10 cm (Flores, 2024). En contraste, la PPM 1 cuenta con 191 individuos en regeneración natural (Gutiérrez et al., 2023) y 626 árboles con $DAP \geq 10$ cm (Flores, 2024). A pesar de esta aparente ventaja en densidad, la PPM 1 muestra un menor aporte de carbono por hojarasca. Esta diferencia podría deberse a que los árboles de la PPM 4 tienen un mayor diámetro, lo que les permite generar mayor cantidad de hojarasca. Esto sugiere que, más allá de la densidad, el tamaño y la estructura de los árboles desempeñan un papel clave en la capacidad de los ecosistemas para capturar y reciclar carbono. El hallazgo subraya la importancia de considerar

no solo la cantidad, sino también la calidad y el estado de desarrollo del arbolado en los estudios sobre captura de carbono en bosques.

La hojarasca en el sistema aguajal es la que registró menor aporte de carbono almacenado con una media de 0,90 tC/ha (Figura 4) esto es inferior a lo reportado por Rojas (2017) en donde la media fue de 6,99 tC/ha, valor posiblemente influenciado a la caída de las hojas de la palmera ya que se encontraba en asocio al pasto y el ganado favorecía a que cayeran las hojas o en todo caso lo realizaban los cortes de las hojas secas para que ingrese mayor iluminación.

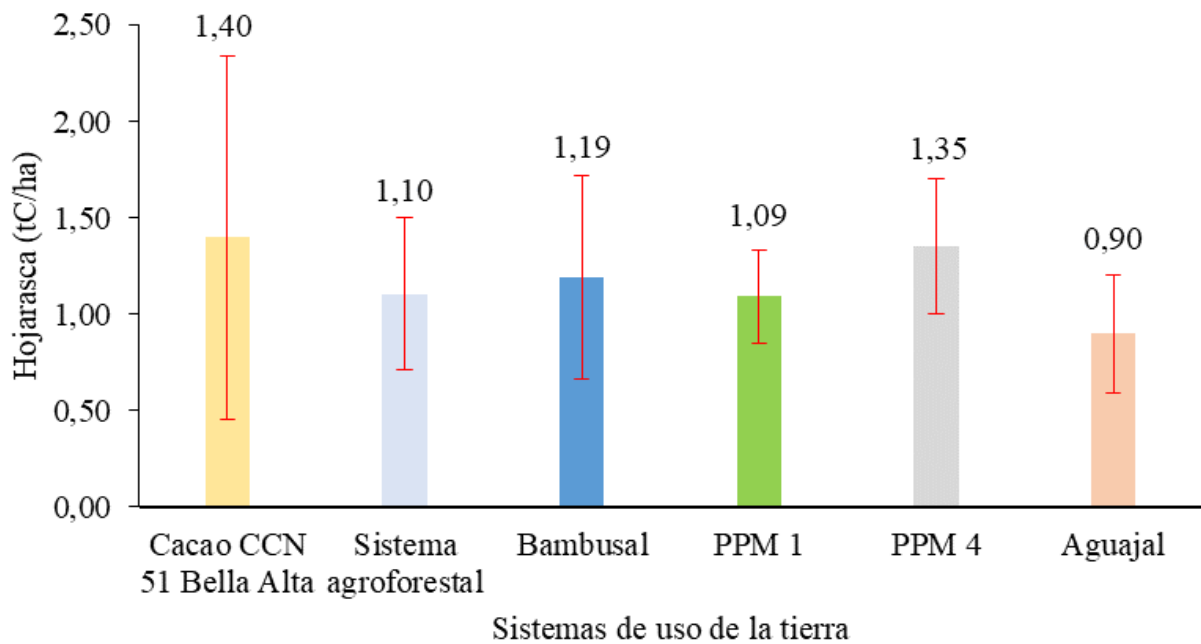


Figura 4. Comportamiento del carbono en el componente hojarasca.

4.2. Carbono almacenado en la raíz

Los sistemas de uso de la tierra no registraron diferencias estadísticas significativas con la cual se acepta la hipótesis nula concerniente a que el carbono almacenado en la raíz de los sistemas de uso es similar (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis de varianza para el carbono en raíz para diferentes sistemas de uso.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Sistemas de uso de la tierra	90,426	5	18,085	2,511	0,147
Error aleatorio	43,218	6	7,203		
Total	133,643	11			

El contenido de carbono almacenado en las raíces en la mayoría de los sistemas de uso de la tierra mostró una tendencia decreciente a medida que se incrementó la profundidad del muestreo (Tabla 6). Este patrón coincide con lo reportado por Vallejos-Torres et al. (2024), quienes observaron un comportamiento similar en bosques primarios, bosques intervenidos y bosques deforestados. Esta disminución del carbono almacenado en profundidad (Cortés et al., 2025) puede explicarse por la distribución natural de las raíces, ya que la mayor parte de la biomasa radicular y la actividad biológica se concentran en los horizontes superficiales del suelo, donde hay mayor disponibilidad de nutrientes, oxígeno y materia orgánica; a medida que se profundiza, la densidad de raíces disminuye, lo que reduce la cantidad de carbono almacenado. Este hallazgo resalta la importancia de los horizontes superficiales del suelo como principales reservorios de carbono en los ecosistemas terrestres y sugiere que las prácticas de manejo y conservación deben enfocarse en proteger estas capas para maximizar la retención de carbono y mantener la salud del suelo, al respecto Delgado-Vargas y Benavides (2025), lo ratifican esta importancia al estudiar diversos sistemas de uso de la tierra en plantaciones agrícolas como el café, destacando el mayor contenido de carbono en el suelo en un sistema multiestrato respecto a un suelo donde se tenía establecido solamente un monocultivo de esta especie agronómica.

El sistema de uso bambusal muestreado aleatoriamente registró una media de 7,03 tC/ha para el carbono aportado por las raíces (Tabla 6), un valor que se encuentra dentro del rango reportado por Acuña (2023), quien obtuvo una media general de 5,40 tC/ha. Sin embargo, al analizar los datos en función de la distancia de muestreo, dicho autor encontró que, a 2 metros de la base de las matas de bambú, el carbono almacenado en las raíces alcanzó un promedio de 9,92 tC/ha, mientras que a 5 metros disminuyó a 4,12 tC/ha, y a 10 metros se redujo a 2,15 tC/ha. Esta variabilidad sugiere que la distribución del carbono en las raíces no es uniforme, sino que está influenciada por la proximidad a las matas de bambúes, donde la densidad de raíces y la acumulación de biomasa son mayores. Estos resultados resaltan la importancia de considerar la ubicación del muestreo en estudios de carbono, ya que la distancia a la base de las plantas puede afectar significativamente los valores obtenidos. Este hallazgo también subraya el papel clave de los sistemas de bambusal en el almacenamiento de carbono (Zhang et al., 2020), tanto en la biomasa aérea como en las raíces (Deng et al., 2020), contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

Hubo variación entre las dos repeticiones concernientes al carbono radicular en cada sistema evaluado (Tabla 6), comportamiento atribuido a la heterogeneidad de los suelos en una parcela y algunos árboles que siempre conservan los agricultores (Ramírez, 2024).

Tabla 6. Biomasa y carbono en raíz para los diferentes sistemas de uso.

Sistema de uso	Prof. (cm)	muestra	peso seco (gr/0,09m ²)	Biomasa (t/ha)	Carbono (tC/ha)	C parcial (tC/ha)	C total (tC/ha)
Cacao CCN 51 Bella Baja	0-10	A ₁	53,70	5,97	2,98	4,58	4,32
	10-20	A ₂	18,21	2,02	1,01		
	20-30	A ₃	10,50	1,17	0,58		
	0-10	B ₁	48,00	5,33	2,67	4,06	
	10-20	B ₂	13,40	1,49	0,74		
	20-30	B ₃	11,60	1,29	0,64		
Sistema agroforestal	0-10	A ₁	25,10	2,79	1,39	2,33	1,68
	10-20	A ₂	11,80	1,31	0,66		
	20-30	A ₃	5,00	0,56	0,28		
	0-10	B ₁	18,40	2,04	1,02	1,02	
	10-20	B ₂	0,00	0,00	0,00		
	20-30	B ₃	0,00	0,00	0,00		
Bambusal	0-10	A ₁	19,20	2,13	1,07	3,05	7,03
	10-20	A ₂	17,30	1,92	0,96		
	20-30	A ₃	18,40	2,04	1,02		
	0-10	B ₁	92,60	10,29	5,14	11,01	
	10-20	B ₂	68,00	7,56	3,78		
	20-30	B ₃	37,50	4,17	2,08		
PPM 1	0-10	A ₁	92,80	10,31	5,16	12,53	10,48
	10-20	A ₂	103,00	11,44	5,72		
	20-30	A ₃	29,70	3,30	1,65		
	0-10	B ₁	95,50	10,61	5,31	8,43	
	10-20	B ₂	21,10	2,34	1,17		
	20-30	B ₃	35,20	3,91	1,96		
PPM 4	0-10	A ₁	56,20	6,24	3,12	3,53	4,08
	10-20	A ₂	5,20	0,58	0,29		
	20-30	A ₃	2,10	0,23	0,12		
	0-10	B ₁	30,00	3,33	1,67	4,63	
	10-20	B ₂	40,60	4,51	2,26		
	20-30	B ₃	12,80	1,42	0,71		
Aguajal	0-10	A ₁	32,90	3,66	1,83	6,59	5,70
	10-20	A ₂	39,40	4,38	2,19		
	20-30	A ₃	46,40	5,16	2,58		
	0-10	B ₁	30,20	3,36	1,68	4,81	
	10-20	B ₂	33,50	3,72	1,86		
	20-30	B ₃	22,90	2,54	1,27		

En el sistema de uso aguajal, las raíces presentaron una mayor cantidad de carbono a partir de los 10 cm de profundidad (Tabla 6), un comportamiento que también fue reportado por Reynaldo (2018), quien determinó que, en los primeros 20 cm de profundidad, el carbono almacenado en las raíces promedió 7,51 tC/ha, incrementándose a 8,13 tC/ha entre los 20 y 40 cm, y luego descendiendo a 2,85 tC/ha entre los 40 y 60 cm. Esta distribución vertical del carbono en las raíces se debe a que las raíces de mayor grosor, que almacenan más biomasa, se concentran principalmente entre los 20 y 40 cm de profundidad; en las capas más superficiales (primeros 20 cm), la presencia de raíces finas, como los neumatóforos, es más abundante durante la época de mayor precipitación, ya que estas estructuras ayudan a las palmeras a evitar el anegamiento. Sin embargo, en temporadas de escasez de lluvias, estas raíces superficiales tienden a pudrirse, lo que reduce su contribución al carbono almacenado. Esta dinámica estacional explica la variabilidad en los datos y resalta la importancia de considerar la época del año en que se realiza el muestreo, ya que puede influir significativamente en los resultados. Este hallazgo subraya la complejidad de los sistemas de aguajal y su adaptación a condiciones fluctuantes de humedad, lo que tiene implicaciones para la gestión y conservación de estos ecosistemas únicos y su capacidad para almacenar carbono.

En el estudio se encontró que la PPM 1 registró una mayor biomasa en las raíces en comparación con la PPM 4 (Figura 5), lo que podría estar relacionado con la densidad poblacional de la regeneración natural. La PPM 1 presentó 191 individuos de regeneración natural, distribuidos entre brinzales, latizales bajos y latizales altos, mientras que la PPM 4 registró 150 individuos en las mismas categorías (Gutiérrez et al., 2023). Esta diferencia en la densidad de regeneración natural sugiere que la mayor cantidad de individuos en la PPM 1 podría estar contribuyendo a un mayor desarrollo de biomasa radicular, ya que una mayor cantidad de plantas en crecimiento implica una mayor demanda de recursos y, por ende, un sistema radicular más extenso y desarrollado para absorber agua y nutrientes del suelo. Además, la presencia de un mayor número de individuos en etapas tempranas de crecimiento, como brinzales y latizales, podría estar favoreciendo una mayor competencia por recursos, lo que estimula el crecimiento de las raíces como estrategia para asegurar su supervivencia. Este hallazgo resalta la importancia de la regeneración natural en la dinámica de los ecosistemas forestales, no solo en términos de la biomasa aérea, sino también en la subterránea, que desempeña un papel crucial en el almacenamiento de carbono y la estabilidad del suelo. Asimismo, sugiere que la gestión forestal debería considerar no solo la cantidad de árboles maduros, sino también la densidad y el estado de la regeneración natural, ya que estos factores

influyen significativamente en la capacidad de los bosques para almacenar carbono y mantener su funcionalidad ecológica.

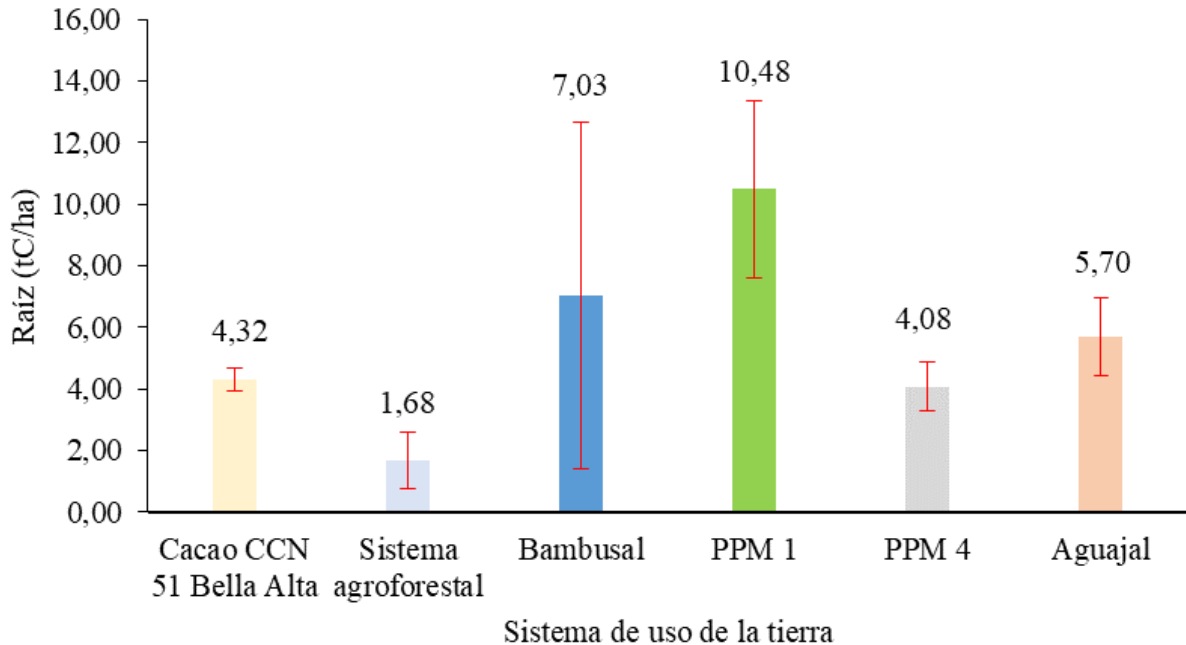


Figura 5. Comportamiento del carbono de la raíz en los diferentes sistemas de uso.

Las barras de error elaboradas con la desviación estándar evidencian una alta heterogeneidad en los datos relacionados con el carbono almacenado en las muestras de raíces, siendo particularmente notoria en los sistemas de uso como el bambusal y la PPM 1 (Figura 5). Esta variabilidad puede atribuirse a la complejidad estructural y a la diversidad de especies en estos sistemas, lo que genera una distribución desigual de las raíces y, por ende, del carbono almacenado en el suelo. Por otro lado, en sistemas como el cacao CCN 51 Bella Baja, el sistema agroforestal PPM 4 y el aguajal, los resultados entre las repeticiones fueron más homogéneos, a pesar de que solo se realizaron dos repeticiones de muestreo. Esta mayor uniformidad podría deberse a una menor diversidad vegetal y a una distribución más equilibrada de las raíces en estos sistemas. Al respecto, Sahu et al. (2023) encontraron que, al realizar nueve muestreos en un suelo de bosque, las variaciones en el carbono almacenado alcanzaron el 32,13 %, mientras que, en pastizales, estas variaciones disminuyeron hasta un 20,02 %. Esto sugiere que la homogeneidad de la vegetación en pastizales reduce la variabilidad de los datos, mientras que, en los bosques, la distribución heterogénea de las plantas incrementa la variabilidad al muestrear los suelos. Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar la heterogeneidad espacial y la diversidad vegetal en los estudios de

almacenamiento de carbono, ya que estos factores influyen significativamente en la precisión y representatividad de los resultados. Además, subrayan la necesidad de realizar un mayor número de repeticiones en sistemas complejos para obtener datos más confiables y representativos.

4.3. Carbono orgánico del suelo en los diferentes sistemas de uso

Los sistemas de uso de la tierra no registraron diferencias estadísticas significativas con la cual se acepta la hipótesis nula concerniente a que el carbono orgánico del suelo de los sistemas de uso es similar (Tabla 7), resultado que discrepan a lo encontrado por Quiñones (2022) que al estudiar diferentes sistemas de uso de la tierra reportó significancia estadística, aunque en algunos sistemas como monocultivo bajo sombra y policultivo comercial bajo sombra presentaron datos atípicos, siendo esto la razón por la cual se debe tener mayor cantidad de parcelas con un determinado sistema de uso de la tierra para poder concluir con la ausencia o presencia de diferencias estadísticas. Además, otro de los factores que no repercutió en la significancia estadística es debido a que el COS se encuentra vinculada a variables como el uso de la tierra, el contenido de arena, limo, arcilla, la densidad del suelo, el contenido de agua del suelo y la erosionabilidad del suelo, que contribuyen de manera diferente mientras más profundo es el muestreo de los suelos (Vallejos-Torres et al., 2024).

Tabla 7. Análisis de varianza para el carbono orgánico del suelo en los diferentes sistemas de uso de la tierra.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Sistemas de uso de la tierra	6712,065	5	1342,413	0,883	0,545
Error aleatorio	9120,951	6	1520,158		
Total	15833,015	11			

La variabilidad en los contenidos de carbono orgánico del suelo (COS) entre las parcelas PPM 1 y PPM 4, ubicadas en un mismo bosque, destaca la influencia de factores como la estructura forestal y la historia de intervención en la capacidad de almacenamiento de carbono. En este estudio, se observó que el PPM 1 registró 84,53 t/ha de COS, mientras que el PPM 4 alcanzó 129,85 t/ha (Figura 6), una diferencia significativa que puede atribuirse a las características específicas de cada parcela. Según Flores (2024), esta superioridad en el COS del PPM 4 podría estar relacionada con su mayor área basal (36,081 m²) a pesar de contar con solo 564 individuos en comparación con el PPM 1 (25,064 m²) que presentaba 626

individuos, lo que sugiere que una menor densidad de individuos por con mayores tamaños diametrales de los árboles favorecieron la acumulación de carbono en el suelo. Esto coincide con lo reportado por Sahu et al. (2023), quienes encontraron que bosques maduros, como el de 80 años que estudiaron, almacenan mayores cantidades de carbono (248,92 t/ha) debido a la presencia de especies arbóreas de gran porte y a la estabilidad del ecosistema.

Además, la historia de intervención del bosque juega un papel crucial en la dinámica del COS. En el caso del PPM 1, la menor cantidad de COS podría reflejar un impacto más severo de actividades anteriores, como la tala selectiva, que redujo la biomasa y, por ende, la contribución de materia orgánica al suelo. En contraste, el PPM 4, con un área basal más alta y una estructura forestal más conservada, muestra una mayor capacidad de almacenamiento de carbono. Este fenómeno también fue observado por Sahu et al. (2023), quienes reportaron una reducción del 26 % en el COS cuando un bosque fue convertido en pastizal, evidenciando cómo el cambio de uso de la tierra afecta negativamente la retención de carbono.

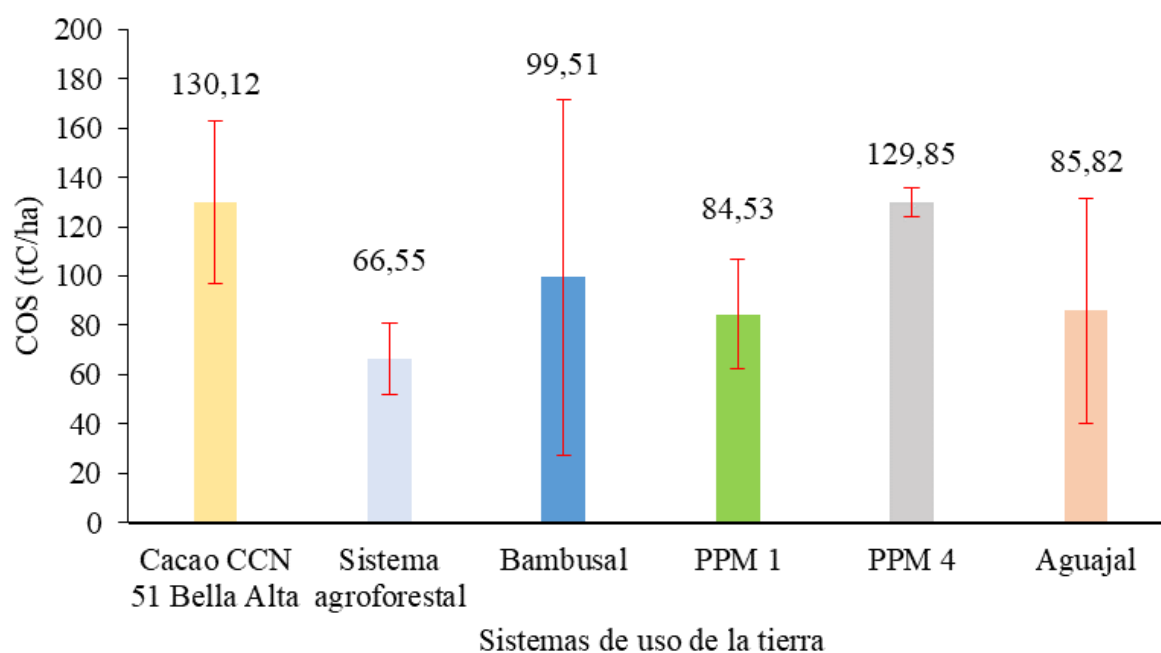


Figura 6. Contenido del carbono orgánico del suelo en los diferentes sistemas de uso.

De manera general, los resultados resaltan la importancia de mantener una estructura forestal robusta y minimizar las intervenciones humanas para maximizar el almacenamiento de COS (Delgado-Vargas y Benavides, 2025; Surco-Huacachi y Garate-Quispe (2022). La conservación de bosques remanentes, como el estudiado, no solo

contribuye a la mitigación del cambio climático, sino que también asegura la sostenibilidad de los servicios ecosistémicos asociados, ya que Carvajal-Agudelo y Andrade (2020) estimaron el impacto potencial de CO₂ emitido al realizar un cambio de uso, siendo el caso más resaltante al pasar de un bosque de galería o cerca de la ribera de un río que contiene 74,2 tC/ha hacia un sistema de cacao con sombrío que contiene 16 tC/ha, llegando a emitir 213,4 t CO₂/ha que equivale a unos 58,2 tC/ha, siendo esto una de las razones de tener una planificación adecuada para no incidir de una manera desmesurada sobre la emisión de dióxido de carbono hacia el ambiente.

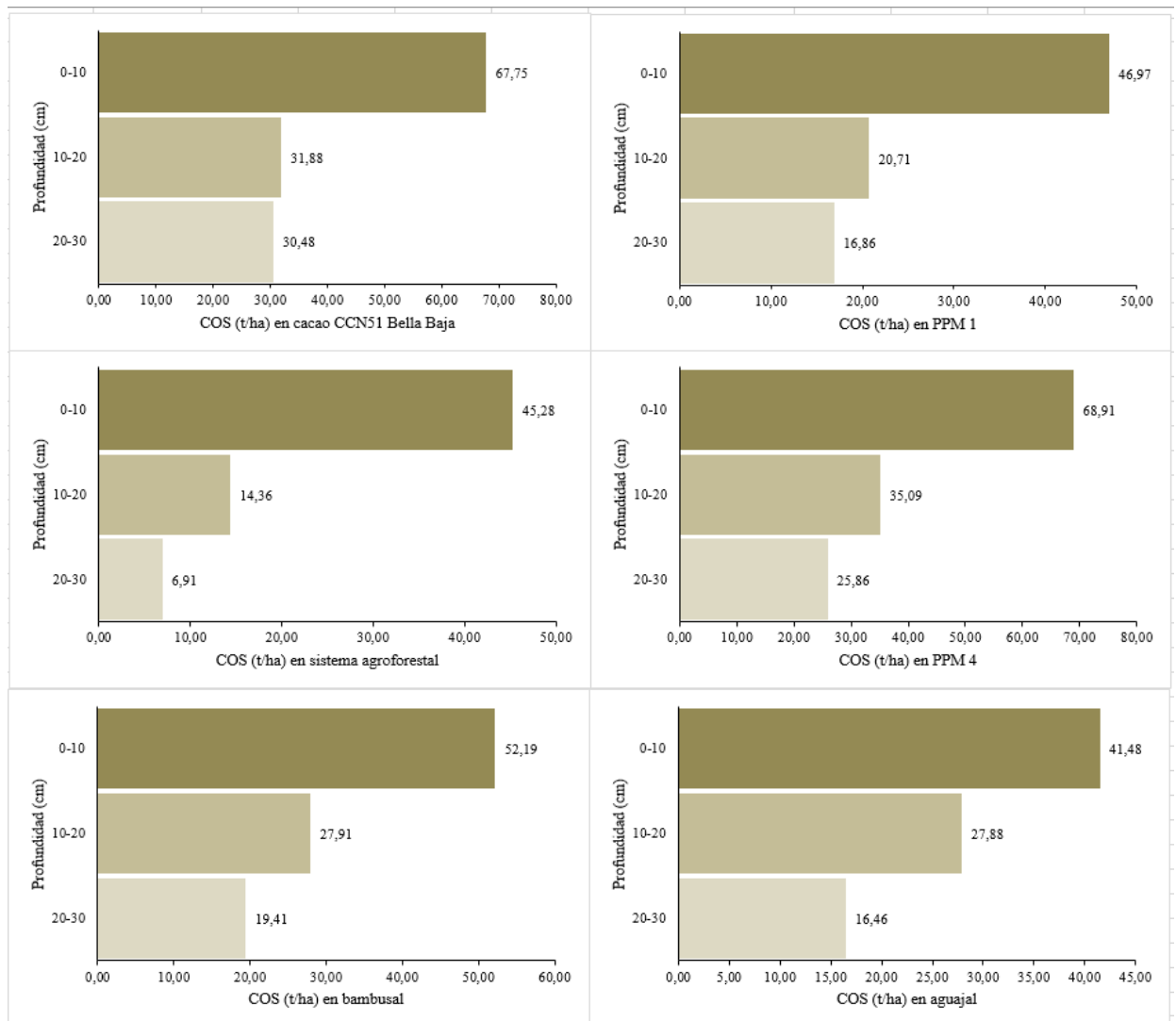


Figura 7. Distribución vertical del carbono orgánico del suelo en los diferentes sistemas de uso de la tierra.

En la distribución vertical del COS en los diferentes sistemas de uso de la tierra, se observó que el mayor contenido se concentra en las capas más superficiales, disminuyendo de manera inversamente proporcional con la profundidad del muestreo (Figura 7). Este patrón fue también registrado por Vallejos-Torres et al. (2024) en el departamento de San Martín, donde los bosques primarios mostraron el mayor contenido de COS en los primeros 20 cm, seguidos por los bosques intervenidos y, finalmente, los bosques deforestados. Este comportamiento se debe a que las capas superficiales del suelo son más ricas en materia orgánica, raíces finas y actividad microbiana, factores que favorecen la acumulación de carbono. A medida que se profundiza, estos componentes disminuyen (Morales-Inocente et al., 2020), lo que explica la reducción del COS. Sin embargo, es interesante destacar que, a una profundidad de 1 metro, los valores de COS tienden a igualarse entre los diferentes sistemas, lo que sugiere que, aunque los bosques primarios almacenan más carbono en las capas superficiales, las diferencias se atenúan en horizontes más profundos. Este hallazgo refuerza la importancia de proteger las capas superficiales del suelo para maximizar el almacenamiento de carbono y mantener la salud de los ecosistemas.

Uno de los componentes más estrechamente vinculados al contenido de carbono en el suelo es la materia orgánica (MO), la cual mostró una tendencia decreciente a medida que se incrementó la profundidad del muestreo (Figura 7). Este comportamiento es consistente con lo reportado por Inga (2018), quien también observó diferencias significativas en el contenido de MO en función de la profundidad. Por ejemplo, en sistemas agroforestales, el autor registró un 1,30 % de MO en los primeros 20 cm de profundidad, mientras que a 60 cm este valor disminuyó a 0,45 %. De manera similar, en el sistema de uso bambusal, se determinó un valor de 1,60 % de MO en los primeros 20 cm, reduciéndose a 1,20 % a 60 cm de profundidad. Esta disminución de la MO con la profundidad se debe a que las capas superficiales del suelo son más ricas en residuos vegetales, raíces finas y actividad microbiana, factores que favorecen la acumulación de materia orgánica. A medida que se profundiza, estos componentes escasean, lo que explica la reducción en el contenido de MO. Este patrón resalta la importancia de las capas superficiales del suelo como principales reservorios de carbono y materia orgánica (Morales-Inocente et al., 2020), lo que tiene implicaciones significativas para la gestión sostenible del suelo y la conservación de los ecosistemas. Además, refuerza la necesidad de considerar la profundidad del muestreo en estudios de carbono y MO para obtener una comprensión más precisa de la dinámica de estos componentes en el suelo.

V. CONCLUSIONES

1. Los sistemas de uso de la tierra que mayor aportan carbono en la hojarasca es el Cacao CCN 51 de Bella Baja con 1,399 tC/ha que es similar al sistema de parcelas permanentes de medición (PPM 4) con una media de 1,353 tC/ha, y a los sistemas bambusal, SAF Banco de Germoplasma y en parcelas permanentes de medición (PPM 1), que obtuvieron valores intermedios, mientras que en el caso del sistema aguajal que registró 0,899 tC/ha fue el que menor carbono almacena en este componente.
2. El contenido de carbono almacenado en el sistema de raíces para el Cacao CCN 51 de Bella Baja fue 4,32 tC/ha, en el Sistema agroforestal fue 1,68 tC/ha, en el bambusal fue 7,03 tC/ha, la parcela permanente de medicación (PPM 1), fue 10,48 tC/ha, la parcela permanente de medición (PPM 4), fue 4,08 tC/ha y el aguajal de 5,70 tC/ha.
3. El contenido de carbono orgánico del suelo en el sistema Cacao CCN 51 Bella Baja registró una media de 130,12 tC/ha, en la parcela permanente de medición (PPM 4), con media de 129,85 tC/ha, Bambusal con media de 99,51 tC/ha, SAF Banco de Germoplasma con media 66,55 tC/ha, la parcela permanente de medición (PPM 1) con media 84,53 tC/ha y Aguajal con media de 85,82 tC/ha.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. En estudios similares, se debe aumentar el número de predios con sistemas de uso de la tierra homogéneos para aumentar la consistencia de los resultados en investigaciones a nivel explicativo.
2. Realizar estudios correlacionales con la cual se permite explorar las interacciones entre el carbono orgánico del suelo y factores clave como fertilidad, calidad, estructura y biodiversidad microbiana. Estos análisis pueden revelar cómo el contenido de carbono influye en la capacidad del suelo para sostener ecosistemas saludables y productivos; al identificar estas relaciones, se pueden proponer estrategias integrales para mejorar la gestión sostenible del suelo, optimizando sus funciones ecológicas y su potencial como sumidero de carbono en diversos sistemas de uso.
3. Se debe efectuar estudios con servicios ecosistémicos en las diferentes parcelas evaluadas.

VII. REFERENCIAS

- Acevedo, I., Sánchez, A., y Mendoza, B. (2021). Evaluación del nivel de degradación del suelo en dos sistemas productivos en la depression de Quibor. I. Análisis multivariado. *Bioagro*, 59, 59-66. <http://www.doi.org/10.51372/bioagro331.7>
- Acuña, M. M. (2023). *Características físicas y químicas de los suelos asociados con el desarrollo de Guadua angustifolia Kunth "bambú" y sus aportes al almacenamiento de carbono* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/9bf9e6aa-f467-4c3e-a11f-42dabb1d129a>
- Adhikari, B., Lodhiyal, N., y Lodhiyal, L. (2020). Assessment of crop yield, productivity and carbon sequestration in agroforestry systems in Central Himalaya, India. *Agroforestry Systems*, 94(1), 281-296. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00388-2>
- Amores-Meza, M. M. (2020). *Efecto de prácticas de manejo del suelo y sus interacciones en la dinámica del carbono orgánico del suelo: Revisión de Literatura* [Tesis de pregrado, Escuela Agrícola Panamericana]. Repositorio institucional ZAMORANO. <https://bdigital.zamorano.edu/items/1a398218-2888-411b-a338-61b8554388fb>
- Andrade, H., e Ibrahim, M. (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas*, 10(39-40), 109-116.
- Arévalo, L., Alegre, J., Rios, E., Callo-Concha, D., y Palm, CH. (2002). Secuestro de carbono con sistemas alternativos en el Perú. *IV Congreso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais*. Brasil. Pp. 1-8.
- Arias, J., y Covinos, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación*. Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica. https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26022w/Arias_S2.pdf
- Bobalilla, D. N. (2024). *Estimación de las reservas de carbono en el suelo en zonas de manglar dentro del Refugio de Vida Silvestre Manglares el Morro* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica Del Litoral]. Repositorio institucional ESPOL. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/63092>
- Carvajal-Agudelo, B. N., y Andrade, H. J. (2020). Captura de carbono en biomasa de sistemas de uso del suelo, municipio de Yopal, Casanare, Colombia. *Orinoquia*, 24(1), 13-22. <http://doi.org/10.22579/20112629.587>
- Castañeda, E. F. (2021). *Análisis dasométrico y morfométrico del bosque reservado de la*

- Universidad Nacional Agraria de la Selva a través de parcelas permanentes de medición, en Tingo María-Huánuco* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/28f87c6b-7a65-4758-8808-45ecd87d4b3a>
- Condor, J. J. (2019). *Carbono orgánico del suelo en diferentes unidades fisiográficas del bosque reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS) Tingo María – Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/6bbd06ba-b91f-40cd-8099-906fe39a677a>
- Cortés, M. L., Murillo, R., Rojas, J. F., Alice, F., Carvajal, D. A., Salazar, A. G., Herrera, F., Pérez, P., Ramírez, F., y Mora, D. (2025). Almacenamiento de carbono orgánico del suelo bajo coberturas de pastos y plantaciones forestales jóvenes de *Tectona grandis* L.f y *Gmelina arborea* Robx. en la Región Huécar Norte, Costa Rica. *Revista Environment & Technology*, 6(1), 1-38. <https://doi.org/10.56205/ret.6-1.1>
- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F. N., & Leip, A. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*, 2(3), 198-209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>
- Decuyper, M., Chávez, R., Lohbeck, M., Lastra, J., Tsendbazar, N., Hackländer, J., Herold, M., & Vågen, T.-G. (2022). Continuous monitoring of forest change dynamics with satellite time series. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112829. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112829>
- Delgado-Vargas, I. A., y Benavides, N. (2025). Soil organic carbon storage in different agroforestry systems associated with coffee in Nariño, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 36(Artículo 59765), 1-14. <https://doi.org/10.15517/am.2024.59765>
- Deng, X., Yin, J., Xu, L., Shi, Y., Zhou, G., Li, Y., Chen, G., Ye, Y., Zhang, F., Zhou, Y., & Xiong, Y. (2020). Effects of abandonment management on soil C and N pools in Moso bamboo forests. *Sci. Total Environ.*, 729, 10.1016/j.scitotenv.2020.138949
- Flores, L. A. (2024). *Dinámica de la vegetación arbórea 2016 a 2023 en colina baja y alta de Tingo María* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/b6029c73-70e7-4317-9a82-08d727088e98>
- Florida, R., y Lopez, C.S. (2011). *Manual del laboratorio de conservación de suelos y agua*. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Gallardo, D. M. (2024). *Actividades antrópicas que afectan la conservación en Áreas*

- Protegidas como sumideros de Carbono, caso específico Parque Nacional Yasuní, en el periodo 1990 – 2020* [Tesina de especialización, Flacso Ecuador]. Repositorio institucional. <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/handle/10469/21880>
- Galván-Moreno, V. S., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Cuellar-Rodríguez, L. G., Quiñonez-Barraza, G., y Rascón-Solano, J. (2024). Estimación del valor de carbono almacenado en función de dos métodos de muestreo en bosques de pino del estado de Chihuahua, México. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 12(3), e854. <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/854>
- Guo, L. B., y Gifford, R. M. (2002). Soil carbon stock and land use change: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 8, 345-360. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>
- Gutiérrez, F. (2007). *Plan de ordenación del bosque reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva – Tingo María* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina].
- Gutiérrez, J. E., Gutiérrez, R. E., Chávez, I. P., Gutiérrez, K. V., y Palomino, E. R. (2023). Análisis de la regeneración natural en cuatro parcelas de medición de un bosque reservado tropical de Tingo María. *Tayacaja*, 6(2), 87–96. <https://doi.org/10.46908/tayacaja.v6i2.217>
- Gutiérrez-Cabanillas, J. I., y Ordiales, E. (2024). Efecto sumidero de carbono del cultivo de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) producido en Extremadura. *ITEA-Información Técnica Económica Agraria*, 120(4), 309-324. <https://doi.org/10.12706/itea.2024.007>
- Guzman, R. (2024). *Stock de carbono orgánico en sistemas agroforestal de café (Coffea arabica L.) y cacao (Theobroma cacao L.) en el distrito de Soritor* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/088a910e-0bec-4201-9a94-3c2fb3ad22d7>
- Harouna, M. (2021). *Captura de carbono por los bosques como estrategia de mitigación del cambio climático global. Su aplicación a casos de países del continente africano* [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio institucional UCM. <https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/1b67d2de-65a2-48b9-9489-2a4f285b78e5/content>
- Huamán, L. M. (2024). *Calidad de suelos en parcelas de medición permanente (PPM) a diferentes altitudes en el bosque reservado de la unas (BRUNAS) Tingo María – Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/11b9a378-5fad-4897-8fb5->

acfe7d211047

- Huamán-Carrión, M. L., Espinoza-Montes, F., Barrial-Lujan, A. I., y Ponce-Atencio, Y. (2021). Influencia de la altitud y características del suelo en la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico de pastos naturales altoandinos. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 83-90.
- Hurtado, M., Alulema, R., y Palacios, T. (2023). Captura de carbono orgánico en zonas con distinto nivel de intervención en páramos de Sayaro. *Investigación y Desarrollo*, 16(2), 79-92.
<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/view/4323/5928>
- Inga, K. (2018). *Variabilidad de microorganismos promotores de crecimiento vegetal en dos sistemas de uso de suelo en Tingo María* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS.
<https://repositorio.unas.edu.pe/items/ab86ec81-571a-43ac-b29c-39533cda4141>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2023). *AR6 synthesis report: Climate Change 2023*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- International Energy Agency [IEA]. (2022). *Global energy review: CO₂ Emissions in 2021 Global emissions rebound sharply to highest ever level*. IEA.
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/c3086240-732b-4f6a-89d7-db01be018f5e/GlobalEnergyReviewCO2Emissionsin2021.pdf>
- Kristell, H., Jeffrey, V. L., Nelda, D., Louis Vincent, V., Jan Willem, V. G., Mariela, L., & Julio, G.-R. (2022). *Major CO₂ losses from degradation of Mauritia flexuosa peat swamp forests in western Amazonia*. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-13155>, 2022.
- Kumara, K., Pal, S., Chand, P., y Kandpal, A. (2023). Carbon sequestration potential of sustainable agricultural practices to mitigate climate change in Indian agriculture: A meta-analysis. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 697-708.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550922003360>
- Ledesma, R., y Abreu, R. (2023). Evaluación de residuos forestales de especies potenciales para la obtención del carbono como energía limpia de la Amazonía ecuatoriana. *Enfoque UTE*, 14(2), 35-51.
http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-65422023000200035

- Leiva, E., y Ramírez, R. (2021). Carbono almacenado en cacao y suelo en sistemas agroforestales. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, Curitiba*, 4(1), 5331-5346. <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/38265/29204>
- Leonel, H. F., Delgado-Vargas, I. A., Molina-Moreno, A. A., y Cadena-Pastrana, Á. M. (2023). Tipificación de fincas cafeteras para la implementación de tecnologías de adaptación al cambio climático, Municipio de Buesaco (Nariño, Colombia). *Información Tecnológica*, 34(3), 31-42. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642023000300031>
- Llanos, G. X. (2024). *Dinámica del stock del carbono orgánico del suelo en los ecosistemas del área de conservación privada Tilacancha, Amazonas, Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio institucional UNALM. <http://45.231.83.156/bitstream/handle/20.500.12996/6469/llanos-sanchez-grecia-ximena.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Loayza, V., Sevilla, V., Olivera, C., Guevara, M., Olmedo, G., Vargas, R., Oyonarte, C., y Jiménez, W. (2020). Mapeo digital de carbono orgánico en suelos de Ecuador. *Ecosistemas*, 29(1), 1852. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1852>
- López-Roldán, P., y Fachelli, S. (2015). *Metodología de la investigación social cuantitativa*. Universidad Autónoma de Barcelona. https://ddd.uab.cat/pub/caplli/2020/232105/metinvsocua_cap1-1a2020.pdf
- Macdicken, K. (1997). *A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects*. Winrock International Institute for Agricultural Development.
- Mach, S. R. (2024). *Evaluación del carbono del suelo y de la biomasa de fincas ganaderas en la Reserva de la Biósfera del Río Plátano, Olancho, Honduras* [Tesis de pregrado, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano]. Repositorio institucional ZAMORANO. <https://bdigital.zamorano.edu/items/b027b05e-0653-4fc9-8f2a-3c881bb011a9>
- Montesdeoca, M. A., Navarrete, D. A., Mendoza, M. M., y León, L. X. (2024). Captura de carbono en suelo de cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.), opción para mitigación del cambio climático. *Polo del Conocimiento*, 9(2), 2731-2747. <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/6887/17237>
- Morales-Inocente, M. Á., Nájera-Luna, J. A., Escobedo-Bretado, M. Á., Cruz-Cobos, F., Hernández, F. J., y Vargas-Larreta, B. (2020). Carbono retenido en biomasa y suelo en bosques de El Salto, Durango, México. *Investigación y Ciencia*, 28(80), 5-13. <https://www.redalyc.org/journal/674/67464474001/html/>

- Organización Paramericana de la Salud [OPS]. (2024). Calidad del aire. <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2023). *Cómo pueden ayudarnos los bosques a limitar los impactos del cambio climático*. PNUD. <https://climatepromise.undp.org/es/news-and-stories/como-pueden-ayudarnos-los-bosques-limitar-los-impactos-del-cambio-climatico#:~:text=Los%20bosques%20sanos%20desempeñan%20un,métricas%20de%20CO2%20al%20año.>
- Puerta, R. H. (2007). *Modelo digital de elevación del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva* [Tesis de posgrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/e319511c-2654-42fd-a6c8-2da96628edb4/content>
- Pulgar, J. (2014). Las ocho regiones naturales del Perú, *Terra Brasilis*, 3, 1-20. DOI: <https://doi.org/10.4000/terrabrasilis.1027>
- Quiñones, E. (2022). *Contenido de carbono orgánico del suelo en ecosistemas forestales y sistemas agroforestales* [Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados]. Repositorio institucional COLPOS. www.cm.colpos.mx/meteoro/tesishid/tesis/2022-10-Quinones_Sanchez_E_MC_Hidrociencias.pdf
- Ramírez, G. M. (2024). *Carbono almacenado del suelo en dos sistemas de uso en la localidad de Mohena – distrito de Anda* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/b72ea4df-6bcb-47cb-86f6-f158a7c3aa0e>
- Révolo, R. H., Quispe, B. J., Carhuamaca, F. D., Jauregui, J. D., López, V., Ribbeck, R. R. (2023). *Metodología de la investigación: Guía para proyectos de tesis forestales y ambientales*. INUDI PERÚ. <https://doi.org/10.35622/inudi.b.114>
- Reynaldo, D. S. (2018). *Relación de las propiedades físico-químicas del suelo con la biomasa de raíces en plantaciones de aguaje (Mauritia flexuosa L.f.) en el CIPTALD* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/e153c2a8-fba3-4c41-aed4-d15fb465ef0e>
- Rodríguez, C., Brito, L., & Nunes, L. (2023). Soil carbon sequestration in the context of climate change mitigation: A review. *Soil Systems*, 7(3), 64. <https://www.mdpi.com/2571-8789/7/3/64>
- Rojas, R. M. (2017). *Efecto de los sistemas silvopastoriles sobre el almacenamiento de*

- carbono orgánico del suelo en el distrito de José Crespo y Castillo* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/485c9489-c4b3-45b1-9932-9ce18473f786>
- Rügnitz, M. T., Chacón, M. L., y Porro R. (2009). *Guía para la Determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). <https://www.cifor-icraf.org/publications/downloads/Publications/PDFS/B16293.pdf>
- Sabino, E., Lavado, W., y Aybar, C. (2019). *Estimación de las zonas de vida de Holdridge en el Perú, formato: Artículo científico*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú –SENAMHI. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/443/Estimación-Zonas-Vida-Holdridge-Perú-formato-artículo-científico.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sahu, C., Mishra, R., & Basti, S. (2023). Land-use change affects carbon storage and lability in tropical soil of India. *Geoderma Regional*, 32, e00621. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00621>.
- Siqueira, C., Chiba, M., Moreira, R., & Abdo, M. (2020). Carbon stocks of a degraded soil recovered with agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 94(3), 1059-1069. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00470-9>
- Soto, Y. (2016). *Inventario demonológico una parcela permanente de medición del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva – Tingo María, Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva].
- Surco-Huacachi, O., y Garate-Quispe, J. S. (2022). Reservas de carbono en cuatro sistemas agroforestales combinadas con *Theobroma cacao* L., Madre de Dios. *Revista Amazónica de Ciencias Básicas y Aplicadas*, 1(1), e147. <https://doi.org/10.55873/racba.v1i1.147>
- Tan, S., & Kuebbing, S. (2023). A synthesis of the effect of regenerative agriculture on soil carbon sequestration in Southeast Asian croplands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 349, 108450. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880923001093>
- Tubiello, F. N., Rosenzweig, C., Conchedda, G., Karl, K., Gütschow, J., Xueyao, L., Griffiths Obli-Laryea, G., Wanner, N., Yue Qiu, S., De Barros, J., Flammini, A., Mencos-Contreras, E., Souza, L., Quadrelli, R., Heiðarsdóttir, H. H., Benoit, P., Hayek, M., & Sandalow, D. (2021). Greenhouse gas emissions from food systems: building the evidence base. *Environmental Research Letters*, 16(6), 065007.

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac018e>

- Vallejos-Torres, G., Gaona-Jiménez, N., Lozano, A., Paredes, Ch. I., Lozano, C. M., Alva-Arévalo, A., Saavedra-Ramírez, J., Arévalo, L. A., Reategui, K., Mendoza, W., Baselly-Villanueva, J. R., & Marín, C. (2023). Soil organic carbon balance across contrasting plant cover ecosystems in the Peruvian Amazon. *Chilean journal of agricultural research*, 83(5), 553-564. <https://dx.doi.org/10.4067/s0718-58392023000500553>
- Vallejos-Torres, G., Lozano-Chung, A., Ordoñez-Sánchez, L., García-Gonzales, P., Quinteros, A., Gaona-Jiménez, N., Mendoza-Caballero, W., Macedo-Córdova, W., Saavedra-Ramirez, J., Baselly-Villanueva, J. R., & Marín, C. (2024). Forest land-use change affects soil organic carbon in tropical dry forests of the Peruvian Amazon. *Forest Systems*, 33, Issue 3, 20896. <https://doi.org/10.5424/fs/2024333-20896>
- Villarreal-Núñez, J., y Ramos-Zachrisson, I. (2024). Mapa digital del contenido de carbono orgánico en suelos de Panamá. *Ciencia Agropecuaria*, 38(1), 164-175. <http://200.46.165.126/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/632>
- Zaro, G., Caramori, P., Yada, G., Sanquetta, C., Filho, A., Nunes, A., Prete, C., & Voroney, P. (2020). Carbon sequestration in an agroforestry system of coffee with rubber trees compared to open-grown coffee in southern Brazil. *Agroforestry Systems*, 94(3), 799-809. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00450-z>
- Zhang, H., Zhou, Y., Zhang, Y., Xu, X., Li, C., & Xu, L. (2020). Research progress of international bamboo forest carbon sequestration in the last 30 years based on bibliometric analysis. *J. Bamboo Res.* (01), 13-23, 10.19560/j.cnki.issn1000-6567.2020.01.002

ANEXOS

Anexo A. Datos registrados

Tabla 8. Datos de densidad aparente distribuidos en sistemas de uso de la tierra y profundidades de muestreo.

Sistema de uso	Profundidad (cm)	Suelo H° (g)	Suelo seco (g)	Volumen cilindro (cm³)	Da (g/cm³)
Cacao CCN51	0-10	415,0	341,7	196,00	1,74
	10-20	445,0	369,7	193,70	1,91
	20-30	475,0	395,1	193,50	2,04
Bella Baja	0-10	425,0	357,3	191,30	1,87
	10-20	355,0	306,8	170,90	1,80
	20-30	495,0	412,6	193,60	2,13
Sistema agroforestal	0-10	447,9	366,3	196,00	1,87
	10-20	460,6	379,3	193,70	1,96
	20-30	469,1	387,0	193,50	2,00
	0-10	450,8	371,5	191,30	1,94
	10-20	370,0	317,4	170,90	1,86
	20-30	465,9	393,0	193,60	2,03
Bambusal	0-10	365,7	335,0	196,00	1,71
	10-20	388,0	356,3	193,70	1,84
	20-30	428,4	394,0	193,50	2,04
	0-10	381,2	358,1	191,30	1,87
	10-20	337,7	310,1	170,90	1,81
	20-30	484,1	425,4	193,60	2,20
PPM1	0-10	447	372,4	196,00	1,9
	10-20	469	391,3	193,70	2,02
	20-30	478,3	400	193,50	2,07
	0-10	361,3	308,2	191,30	1,61
	10-20	284,9	249,3	170,90	1,46
	20-30	394,2	328,9	193,60	1,70
PPM4	0-10	372,9	320,4	196,00	1,63
	10-20	450,7	369,6	193,70	1,91
	20-30	459,1	377,7	193,50	1,95

Sistema de uso	Profundidad (cm)	Suelo H° (g)	Suelo seco (g)	Volumen cilindro (cm ³)	Da (g/cm ³)
Aguajal	0-10	394,1	329,3	191,30	1,72
	10-20	368,6	305,6	170,90	1,79
	20-30	473,5	385,1	193,60	1,99
	0-10	474,3	391,9	196,00	2,00
	10-20	462,3	385,8	193,70	1,99
	20-30	474,7	401,3	193,50	2,07
Aguajal	0-10	443,5	351,8	191,30	1,84
	10-20	352,7	290	170,90	1,70
	20-30	453,8	368,4	193,60	1,90

Tabla 9. Datos del carbono orgánico del suelo distribuidos en sistemas de uso de la tierra y profundidades de muestreo.

Sistema de uso	Profundidad (cm)	Da (kg/m ³)	%MO	CO (%)	Peso del volumen del suelo (t/ha)	COS (tn/ha)
Cacao CCN51 Bella	0-10	1743,37	7,99	4,63	1743,37	80,80
	10-20	1908,62	3,54	2,05	1908,62	39,19
	20-30	2041,86	2,82	1,64	2041,86	33,40
Baja	0-10	1867,75	5,05	2,93	1867,75	54,71
	10-20	1795,20	2,36	1,37	1795,20	24,57
	20-30	2131,20	2,23	1,29	2131,20	27,57
Sistema Agroforestal	0-10	1868,88	4,00	2,32	1868,88	43,36
	10-20	1958,18	0,66	0,38	1958,18	7,50
	20-30	2000,00	0,46	0,27	2000,00	5,34
Bambusal	0-10	1941,98	4,19	2,43	1941,98	47,20
	10-20	1857,23	1,97	1,14	1857,23	21,22
	20-30	2029,96	0,72	0,42	2029,96	8,48
Bambusal	0-10	1709,18	8,37	4,85	1709,18	82,98
	10-20	1839,44	3,87	2,24	1839,44	41,29
	20-30	2036,18	2,23	1,29	2036,18	26,34
	0-10	1871,93	1,97	1,14	1871,93	21,39

Sistema de uso	Profundidad (cm)	Da (kg/m ³)	%MO	CO (%)	Peso del volumen del suelo (t/ha)	COS (tn/ha)
	10-20	1814,51	1,38	0,80	1814,51	14,52
	20-30	2197,31	0,98	0,57	2197,31	12,49
	0-10	1900,00	3,8	2,20	1900,00	41,88
PPM1	10-20	2020,13	1,31	0,76	2020,13	15,35
	20-30	2067,18	0,98	0,57	2067,18	11,75
	0-10	1611,08	5,57	3,23	1611,08	52,05
	10-20	1458,75	3,08	1,79	1458,75	26,06
	20-30	1698,86	2,23	1,29	1698,86	21,97
	0-10	1634,69	7,08	4,11	1634,69	67,13
	10-20	1908,11	3,21	1,86	1908,11	35,53
PPM4	20-30	1951,94	2,03	1,18	1951,94	22,98
	0-10	1721,38	7,08	4,11	1721,38	70,69
	10-20	1788,18	3,34	1,94	1788,18	34,64
	20-30	1989,15	2,49	1,44	1989,15	28,73
	0-10	1999,49	2,03	1,18	1999,49	23,54
	10-20	1991,74	1,64	0,95	1991,74	18,95
Aguajal	20-30	2073,90	0,92	0,53	2073,90	11,07
	0-10	1839,00	5,57	3,23	1839,00	59,42
	10-20	1696,90	3,74	2,17	1696,90	36,81
	20-30	1902,89	1,98	1,15	1902,89	21,85

Tabla 10. Coordenadas de los sistemas de uso de la tierra.

Sistemas de uso de la tierra	Parcela	X	Y	Altura (msnm)
CCN51	A ₁	0386784	8968983	680
	A ₂	0386733	8968967	674
	A ₃	0386738	8968954	689
	A ₄	0386780	8968976	676
	B ₁	0386803	8968934	694
	B ₂	0386757	8968908	688
	B ₃	0386759	8968916	691

Sistemas de uso de la tierra	Parcela	X	Y	Altura (msnm)
	B ₄	0386809	8968921	694
Punto centro		0386762	8968934	687
	A ₁	0390948	8969872	705
	A ₂	0390946	8969867	712
	A ₃	0390990	8969875	717
Agroforestal	A ₄	0390991	8969882	719
	B ₁	0390973	8969872	705
	B ₂	0390946	8969867	712
	B ₃	0390990	8969875	717
	B ₄	0390991	8969882	719
Punto centro		0390965	8969882	714
	A ₁	0390566	8970536	711
	A ₂	0390579	8970521	703
	A ₃	0390595	8970560	707
Bambusal	A ₄	0390582	8970579	700
	B ₁	0390611	8970475	691
	B ₂	0390622	8970483	710
	B ₃	0390581	8970519	693
	B ₄	0390561	8970505	720
Punto centro		0390573	8970516	680
	A ₁	391505	8970306	
	A ₂	391512	8970304	
	A ₃	391518	8970351	
PPM4	A ₄	391508	8970352	
	B ₁	391505	8970287	
	B ₂	391510	8970288	
	B ₃	391500	8970329	
	B ₄	391510	8970340	
Punto centro		391560	8970320	840
	A ₁	391046	8970701	777
PPM1	A ₂	391050	8970713	771
	A ₃	391065	8970745	780

Sistemas de uso de la tierra	Parcela	X	Y	Altura (msnm)
	A ₄	391050	8970745	777
	B ₁	391119	8970701	807
	B ₂	391129	8970719	791
	B ₃	391075	8970725	796
	B ₄	391073	8970723	796
Punto centro		391054	8970740	790
	A ₁	390158	8970815	670
	A ₂	390149	8970809	671
	A ₃	390129	8970857	672
Aguajal	A ₄	390120	8970855	671
	B ₁	390206	8970860	670
	B ₂	390200	8970866	670
	B ₃	390167	8970835	672
	B ₄	390161	8970839	670
Punto centro				

Anexo B. Imágenes fotográficas



Figura 8. Delimitación de la parcela en el sistema agroforestal.



Figura 9. Muestreo de hojarasca en el sistema de bosque.



Figura 10. Muestreo de hojarasca en el sistema de *T. cacao* CCN51.



Figura 11. Colecta de hojarasca en el sistema de *T. cacao* CCN51.



Figura 12. Marco de madera y el muestreo de hojarasca en el sistema aguajal.



Figura 13. Materiales y herramientas utilizados en el sistema agroforestal.



Figura 14. Dimensión del monolito extraído en el sistema bambusal.



Figura 15. Obtención de muestras de suelos del sistema bosque para la densidad aparente.



Figura 16. Muestreo de suelos para la densidad aparente en el en el sistema agroforestal.

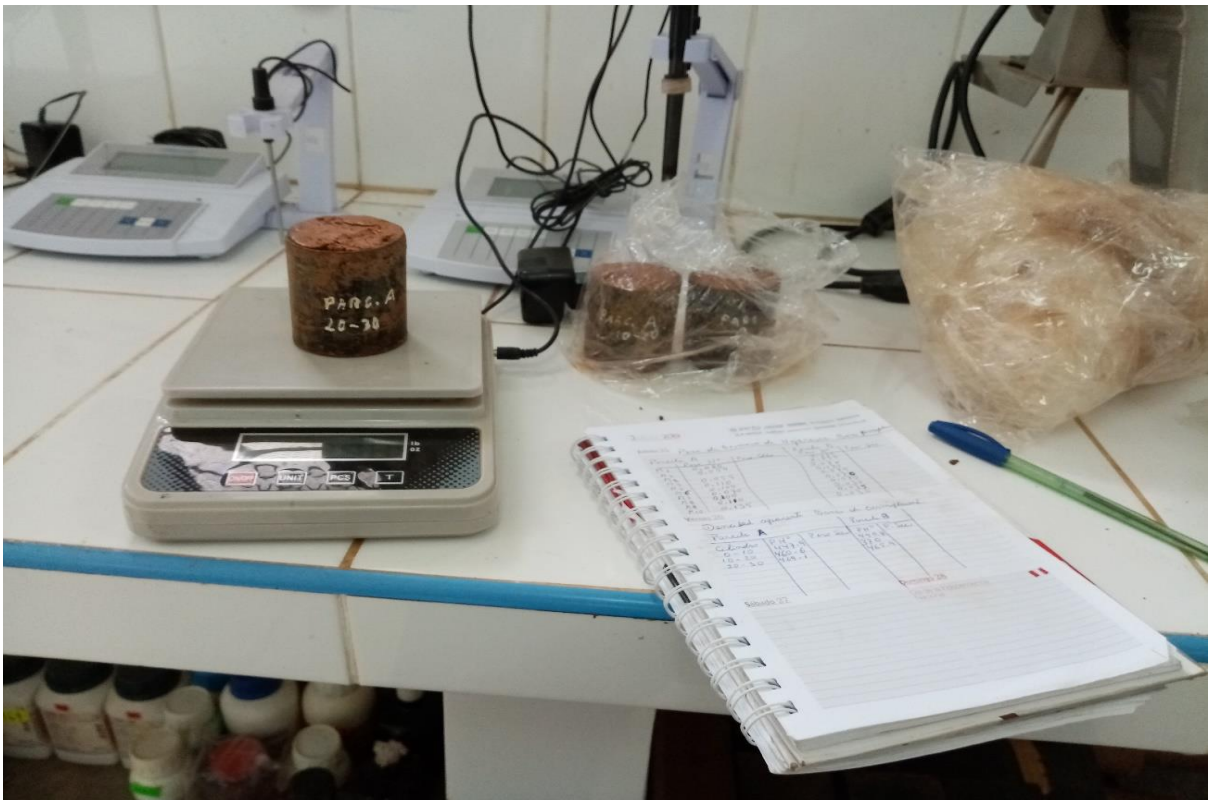


Figura 17. Pesado de la muestra de suelos dentro el cilindro proveniente del sistema agroforestal.



Figura 18. Registro de pesos de las muestras de suelos en el sistema de *T. cacao* CCN51.



Figura 19. Lavado de las muestras de raíces provenientes del sistema de *T. cacao* CCN51.



Figura 20. Muestra de raíces obtenidos del sistema aguajal.



Figura 21. Muestras de hojarasca rotulada del sistema bambusal



Figura 22. Muestras de las raíces obtenidas del sistema bambusal



Figura 23. Muestras de raíces provenientes del sistema agroforestal.



Figura 24. Muestra de raíces obtenidos del sistema bosque.

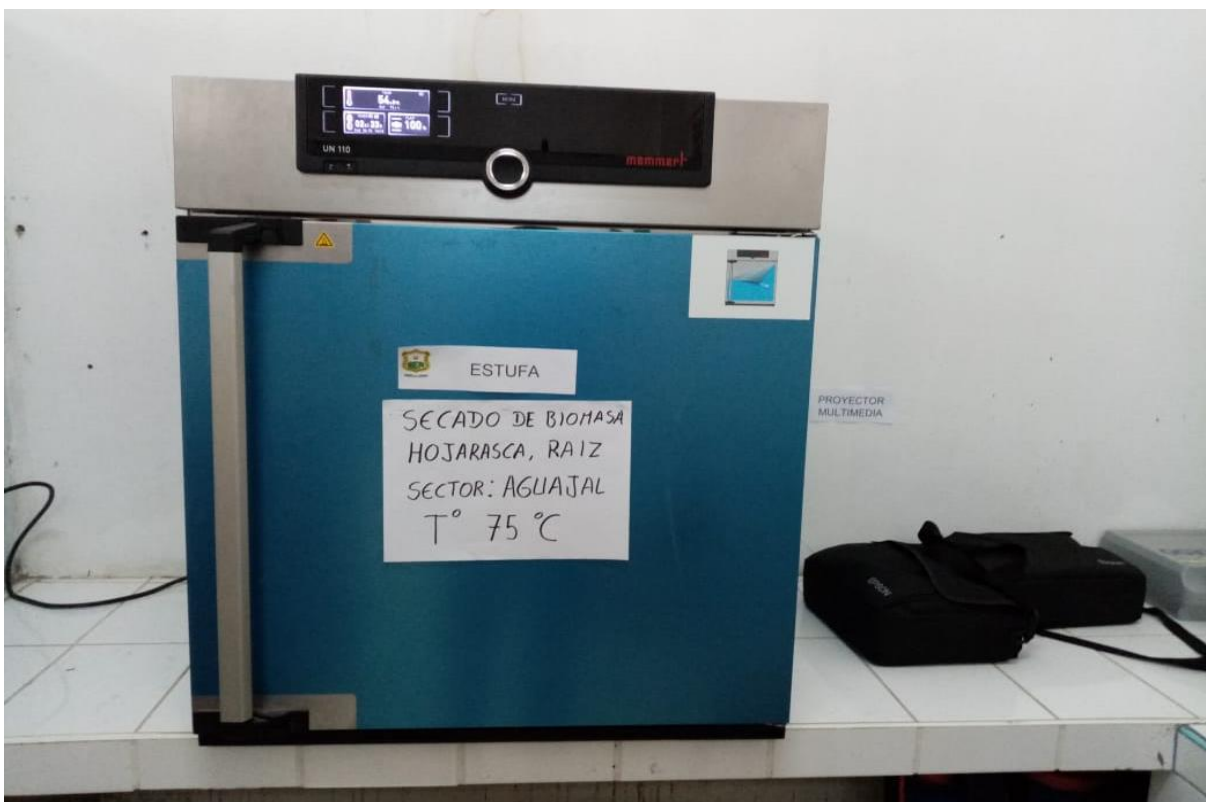


Figura 25. Secado de las muestras del sistema aguajal.



Figura 26. Ubicación de los cinco sistemas de uso de la tierra.

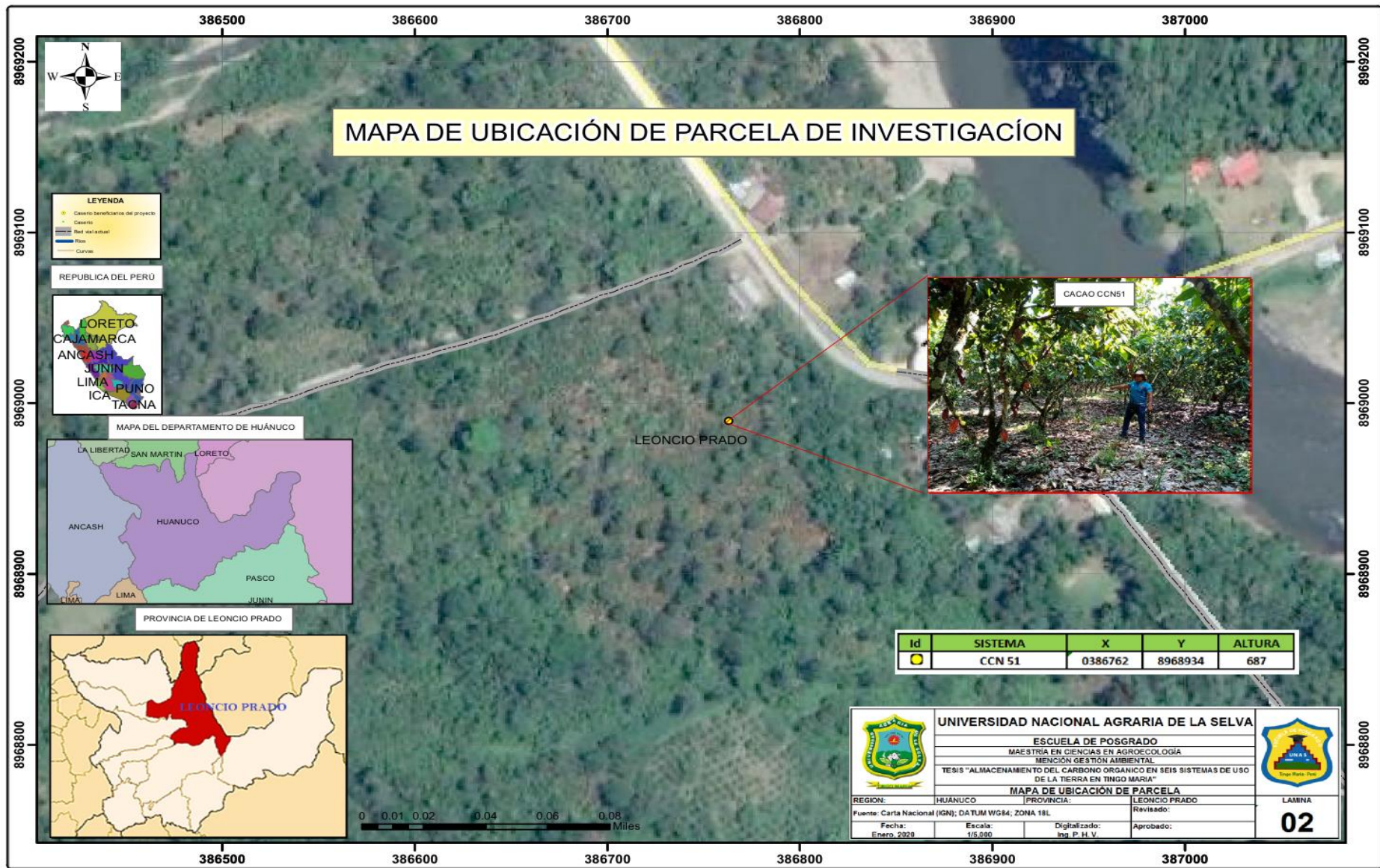


Figura 27. Ubicación del sistema *T. cacao* CCN51.