

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA**  
**MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL**



**RELACIÓN ENTRE EL CARBONO EN BIOMASA AÉREA Y SUELO  
CON LOS INDICADORES FISICOQUÍMICOS PARA EL MANEJO  
SOSTENIBLE DE SISTEMAS AGROFORESTALES EN LUYANDO.**

**TESIS**

**Para optar al grado académico de**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA**

**MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL**

**JOSMELL GRANDEZ SIFUENTES**

**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. 006-2026-UPG-FRNR-UNAS**

En la ciudad universitaria, siendo las 08:30 a.m. del miércoles 13 de mayo 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:

**“RELACIÓN ENTRE EL CARBONO EN BIOMASA AÉREA Y SUELO CON LOS INDICADORES FISICOQUÍMICOS PARA EL MANEJO SOSTENIBLE DE SISTEMAS AGROFORESTALES EN LUYANDO”**

A cargo del candidato al Grado de Maestro en Ciencias en Agroecología, mención: Gestión Ambiental **GRANDEZ SIFUENTES, JOSMELL**.

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 **09:45 a.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. CASIANO AGUIRRE ESCALANTE  
Presidente del Jurado



Dr. JOSE DOLORES LEVANO CRISOSTOMO  
Miembro del Jurado

Ing. M.Sc. EDILBERTO DIAZ QUINTANA  
Miembro del Jurado

DR. DAVID PRUDENCIO QUISPE JANAMPA  
Asesor

Ing. M.Sc. CLEIDE SANTOS FLORES  
Asesor



UNAS

VICERRECTORADO DE  
INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE  
INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE  
CIENTÍFICO  
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

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

## CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 178 - 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
RELACIÓN ENTRE EL CARBONO EN BIOMASA AÉREA Y SUELO CON LOS INDICADORES FÍSICOQUÍMICOS PARA EL MANEJO SOSTENIBLE DE SISTEMAS AGROFORESTALES EN LUYANDO	JOSMELL GRANDEZ SIFUENTES	15 % Quince	Menor a 20 %

Tingo María, 11 de junio de 2026.

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

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN AGROECOLOGÍA MENCIÓN**  
**GESTIÓN AMBIENTAL**



- Título** : Relación entre el carbono en biomasa aérea y suelo con los indicadores fisicoquímicos para el manejo sostenible de sistemas agroforestales en Luyando.
- Área de investigación** : Gestión Ambiental
- Grupo de investigación** : Gestión ambiental
- Línea de Investigación** : Gestión de contaminación
- Autor** : Josmell Grandez Sifuentes
- Asesor** : Dr. David Prudencio Quispe Janampa  
Ing. M. Cs. Cleide Santos Flores
- Lugar de ejecución** : Luyando
- Duración del trabajo** : 06 meses
- Financiamiento** : S/. 4,090.90
- FEDU** : No
- Propio** : Sí
- Otros** : No

**Tingo María – Perú mayo – 2026**



## VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE INVESTIGACIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

“Promoviendo la Calidad de la Investigación”

### REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO, INVESTIGACIÓN DOCENTE Y TESIS TA


#### I. DATOS GENERALES DE POSGRADO

**Universidad** : Universidad Nacional Agraria de la Selva  
**Posgrado** : EPG-UNAS  
**Escuela de posgrado** : Maestría en: Ciencias en Agroecología  
**Mención** : Gestión Ambiental  
**Objetivo de la Tesis** : Evaluar la relación entre el carbono en biomasa aérea y suelo con los indicadores fisicoquímicos para el manejo sostenible de sistemas agroforestales en Luyando.  
**Autor de la tesis** : Ing. Josmell Grandez Sifuentes  
**DNI** : 70247305  
**Correo Electrónico** : Dr. David Prudencio Quispe Janampa  
Ing. M. Sc. Cleide Santos Flores  
**Área de Investigación** : Gestión Ambiental  
**Grupo de Investigación** : Adaptación al cambio climático  
**Línea (s) de Investigación** : Fijación, captura y almacenamiento de carbono  
**Fecha de inicio** : Abril 2025  
**Fecha de termino** : Setiembre 2025  
**Presupuesto** : S/. 4,090.90  
**Financiamiento** : Propio (X) FEDU ( ) Externo ( )

Según: Resolución: N° 461-2023-R-UNAS y Resolución: N° 295-2023-R-UNAS

  
Ing. Josmell Grandez Sifuentes

Tesista

  
Dr. David Prudencio Quispe Janampa

Asesor

  
Ing. M. Sc. Cleide Santos Flores

Asesor

## DEDICATORIA

A nuestro divino creador, por cuidarme y bendecirme todos los días. Dándome fortaleza y sabiduría para ser una mejor persona cada día.

A mis padres Julián Grandez Paredes y Miriam Celmira Sifuentes de Grandez; por confiar y creer en mí. Quienes día a día me dan todo su amor, confianza y comprensión, inculcándome siempre buenos valores. Este triunfo es para ustedes.

A mis hermanos, Wilmer y Erick, por sus consejos y motivación constante, brindándome la fortaleza necesaria para culminar cada objetivo trazado en mi vida.

A mi amada esposa Fabiola; por su amor, paciencia y dedicación. Quien está presente en cada meta y desafío de mi vida, acompañándome con su apoyo constante y motivándome a dar lo mejor de mí.

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mi más sincero agradecimiento:

A Dios; por estar conmigo en todo lugar. Bendiciendo e iluminando mi camino para dirigirme siempre por el sendero correcto.

Agradezco al Dr. David Prudencio Quispe Janampa y al Ing. M. Sc. Cleide Santos Flores, quienes desinteresadamente aceptaron asesorarme en la presente investigación. Gracias por su tiempo, confianza y por los valiosos aportes, ideas y conocimientos que contribuyeron significativamente al desarrollo y mejora continua de este proyecto.

A mis padres; quienes con mucho amor y esmero me brindaron la mejor educación. Gracias a ustedes he llegado a cumplir este anhelado sueño, es un honor ser hijo de los padres más maravillosos del mundo.

A mis hermanos; por respaldar cada decisión que tomo. Siempre deseando lo mejor para mí demostrándome en todo momento su afecto y cariño.

A mis adorables sobrinos, por sacarme una sonrisa cada agotador día de trabajo.

A mi esposa; por su ayuda y comprensión, que es fundamental en cada paso que doy. Gracias amor.

A mis familiares más cercanos que de alguna u otra forma me brindaron su apoyo y motivación para salir adelante.

A mis amigos y compañeros de estudios; con quienes compartí vivencias muy gratas, fortaleciendo ese lazo de la amistad que perdurará en el tiempo.

## INDICE

	<b>Página</b>
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo general .....	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1. Marco teórico .....	3
2.1.1. Almacenamiento de carbono .....	3
2.1.2. Secuestro de carbono.....	4
2.1.3. Cambio climático .....	4
2.1.4. Carbono orgánico en el suelo de plantaciones .....	5
2.1.6. Biomasa.....	7
2.1.7. Propiedades físicas del suelo.....	10
2.1.8. Propiedades químicas .....	11
2.1.9. Sistema agroforestal .....	15
2.1.10. Clasificación de los sistemas agroforestales .....	15
2.1.11. Ventajas del SAF.....	16
2.1.12. Servicios ecosistémicos de plantaciones forestales.....	17
2.2. Estado del arte .....	18
2.2.1. Nivel internacional .....	18
2.2.2. Nivel nacional .....	23
2.2.3. Nivel regional.....	27
III. Materiales y metodos.....	30
3.1. Lugar de ejecución .....	30
3.1.1. Ubicación política .....	30
3.1.2. Ubicación geográfica .....	30
3.2. Materiales, herramientas y equipos .....	31
3.3. Metodología .....	31
3.3.1. Tipo de investigación .....	31
3.3.2. Nivel de investigación.....	32
3.3.3. Diseño de investigación .....	32
3.3.4. Población y muestra .....	33

3.3.5. Estimación del carbono en la biomasa vegetal de sistemas agroforestales	33
3.3.6. Estimación del carbono orgánico del suelo en sistemas agroforestales	38
3.3.7. Indicadores fisicoquímicos de suelos de sistemas agroforestales	40
3.3.8. Correlación del carbono almacenado con los indicadores fisicoquímicos	42
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1. Carbono almacenado en la biomasa aérea en sistemas agroforestales	44
4.2. Carbono orgánico almacenado en el suelo en sistemas agroforestales	48
4.3. Indicadores fisicoquímicos del suelo en sistemas agroforestales	52
4.4. Relación entre el carbono almacenado en la biomasa aérea con los indicadores fisicoquímicos del suelo en sistemas agroforestales	61
4.5. Relación entre el carbono orgánico del suelo con los indicadores fisicoquímicos del suelo en sistemas agroforestales	64
V. CONCLUSIÓN	69
VI. PROPUESTAS A FUTURO	70
VII. REFERENCIAS	71
ANEXO	81

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>página</b>
1. Propiedades químicas del suelo .....	41
2. Biomasa y carbono en la biomasa aérea .....	44
3. Prueba t de Student para muestras independientes entre los SAFs para el carbono en la biomasa arbórea .....	46
4. Carbono orgánico del suelo en dos sistemas agroforestales .....	49
5. Prueba de T de student para el carbono orgánico del suelo en dos sistemas agroforestales	50
6. Densidad aparente del suelo (g/cm <sup>3</sup> ) a tres profundidades. ....	53
7. Prueba t de Student para la densidad aparente del suelo (g/cm <sup>3</sup> ) en dos sistemas agroforestales .....	54
8. Textura del suelo en dos sistemas agroforestales .....	56
9. Propiedades químicas del suelo de dos sistemas agroforestales.....	59
10. Correlación de Pearson del carbono almacenado en la biomasa vegetal con las propiedades fisicoquímicas del suelo .....	62
11. Correlación de Pearson del carbono orgánico del suelo con las propiedades fisicoquímicas del suelo .....	66
12. Registro de variables dasométricas y biomasa de <i>G. crinita</i> en el SAF 1 .....	82
13. Biomasa de <i>T. cacao</i> en el SAF 1 .....	83
14. Biomasa de hojarasca y herbácea en SAF 1 .....	85
15. Densidad aparente y carbono orgánico del suelo en el SAF 1 .....	86
16. Registro de variables dasométricas y biomasa de <i>S. amazonicum</i> en el SAF 2.....	87
17. Biomasa de <i>T. cacao</i> en el SAF 2 .....	88
18. Biomasa de hojarasca y herbácea en SAF 2 .....	90
19. Densidad aparente y carbono orgánico del suelo en el SAF 2 .....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>página</b>
1. Triangulo textural (USDA, 1999).....	10
2. Temperatura y precipitación en el distrito de Luyando.....	31
3. Esquema de subparcelas para la evaluación del crecimiento y carbono orgánico del suelo.	34
4. Cuadrante de 1 x 1 m para biomasa herbácea .....	36
5. Cuadrante de 0.5 m x 0.5 m para biomasa de hojarasca.....	37
6. Diagrama de toma de muestras para análisis químico.....	41
7. Biomasa y carbono en la biomasa vegetal.....	45
8. Comparación del carbono alanceando en la biomasa arbórea (t/ha) en dos SAFs .....	46
9. Carbono orgánico del suelo a diferentes profundidades.....	49
10. Carbono orgánico en el suelo en dos sistemas agroforestales .....	50
11. Densidad aparente del suelo en dos sistemas agroforestales.....	53
12. Densidad aparente del suelo (g/cm <sup>3</sup> ) en dos sistemas agroforestales.....	54
13. Porcentaje de arena, arcilla y limo en dos sistemas agroforestales .....	57
14. Propiedades químicas del suelo en dos sistemas agroforestales.....	60
15. Corplot de correlación del carbono de biomasa vegetal con las propiedades fisicoquímicas del suelo.....	63
16. Corplot de correlación del carbono de biomasa vegetal con las propiedades fisicoquímicas del suelo.....	66
17. Delimitación de las parcelas experimentales.....	91
18. Medición de altura del árbol con telémetro digital Forestry Pro II. ....	91
19. Medición del diámetro a la altura del pecho.....	92
20. Recolección de biomasa herbácea .....	92
21. Determinación del peso fresco de la hojarasca.....	93
22. Recolección de biomasa de hojarasca .....	93
23. Recolección de suelo en tres niveles de profundidad. ....	94
24. Muestras de suelo previamente rotuladas y almacenadas para análisis.....	94
25. Recolección de suelo con cilindro muestreador para densidad aparente.....	95
26. Medición de la profundidad del suelo .....	95
27. Secado de muestras de suelo en estufa .....	96
28. Secado de biomasa herbácea y hojarasca .....	96
29. Peso seco de herbácea y hojarasca .....	97

30. Determinación del peso seco de las muestras de suelo .....	97
31. Análisis de suelo del sistema agroforestal con <i>S. amazonicum</i> .....	98
32. Análisis de suelo del sistema agroforestal con <i>G. crinita</i> .....	99
33. Análisis de suelo para fracción de carbono a tres profundidades.....	101

## RESUMEN

El estudio se desarrolló en dos sistemas agroforestales del distrito de Luyando, Huánuco: cacao + pino chuncho (*Schizolobium amazonicum*) y cacao + bolaina blanca (*Guazuma crinita*), con el objetivo de evaluar la relación entre el carbono almacenado en la biomasa vegetal y en el suelo con los indicadores fisicoquímicos del suelo. Se establecieron subparcelas para medir variables dasométricas y estimar la biomasa mediante ecuaciones alométricas. Asimismo, se recolectaron muestras de suelo a tres profundidades: 0–10, 10–20 y 20–30 cm, para determinar carbono orgánico del suelo, densidad aparente, textura, materia orgánica, pH, nitrógeno, fósforo y potasio. Los resultados mostraron que el carbono en la biomasa vegetal fue mayor en cacao + pino chuncho, mientras que el carbono orgánico del suelo fue superior en cacao + bolaina blanca, con 102.09 t C/ha, frente a 66.87 t C/ha en cacao + pino chuncho. La densidad aparente aumentó con la profundidad en ambos sistemas, con promedios de 1.542 y 1.621 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, sin diferencias estadísticas significativas. Las correlaciones entre el carbono de biomasa vegetal y las propiedades fisicoquímicas no fueron significativas. En cambio, el carbono orgánico del suelo se correlacionó positiva y significativamente con la materia orgánica en ambos sistemas, y la densidad aparente mostró relación negativa significativa solo en cacao + bolaina blanca. Se concluye que ambos sistemas contribuyen al almacenamiento de carbono, condicionado por el componente vegetal, la profundidad y la materia orgánica del suelo.

Palabras claves: *Theobroma cacao*, *Schizolobium amazonicum*, *Guazuma crinita*, densidad aparente, materia orgánica.

## ABSTRACT

The study was conducted in two agroforestry systems in the district of Luyando, Huánuco: cacao + pino chuncho (*Schizolobium amazonicum*) and cacao + bolaina blanca (*Guazuma crinita*), with the objective of evaluating the relationship between carbon stored in plant biomass and soil with soil physicochemical indicators. Subplots were established to measure dasometric variables and estimate biomass using allometric equations. Soil samples were also collected at three depths: 0–10, 10–20 and 20–30 cm, to determine soil organic carbon, bulk density, texture, organic matter, pH, nitrogen, phosphorus and potassium. The results showed that carbon in plant biomass was higher in cacao + pino chuncho, while soil organic carbon was higher in cacao + bolaina blanca, with 102.09 t C/ha, compared to 66.87 t C/ha in cacao + pino chuncho. Bulk density increased with depth in both systems, with average values of 1.542 and 1.621 g/cm<sup>3</sup>, respectively, with no statistically significant differences. Correlations between plant biomass carbon and soil physicochemical properties were not significant. In contrast, soil organic carbon was positively and significantly correlated with organic matter in both systems, while bulk density showed a significant negative relationship only in cacao + bolaina blanca. It is concluded that both systems contribute to carbon storage, conditioned by the plant component, soil depth and soil organic matter.

**Keywords:** *Theobroma cacao*, *Schizolobium amazonicum*, *Guazuma crinita*, bulk density, organic matter.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el cambio climático y la degradación del suelo han generado una creciente preocupación por la sostenibilidad de los sistemas de uso de la tierra, especialmente en regiones tropicales como la Amazonía peruana. En este contexto, los sistemas agroforestales han sido promovidos como alternativas viables para la conservación ambiental, el secuestro de carbono y la mejora de la calidad del suelo. Sin embargo, en muchos distritos como Luyando, en la región Huánuco, aún se carece de información detallada sobre la capacidad de estos sistemas para almacenar carbono y sobre su influencia en los indicadores fisicoquímicos del suelo.

El carbono almacenado, tanto en la biomasa como en el suelo, constituye un indicador clave para evaluar el aporte de los sistemas agroforestales a la mitigación del cambio climático. Por otro lado, los indicadores fisicoquímicos del suelo (como pH, materia orgánica, textura, capacidad de intercambio catiónico, entre otros) permiten determinar la salud y la productividad del suelo a largo plazo. La interacción entre ambos factores es esencial para comprender la dinámica ecológica de estos sistemas y proponer estrategias de manejo sostenible.

En Luyando, pese a la implementación de sistemas agroforestales, se desconoce cómo los indicadores fisicoquímicos del suelo (como pH, materia orgánica, textura y nutrientes) se relacionan con el carbono almacenado. Esta brecha limita el diseño de estrategias de manejo basadas en evidencia científica, lo que podría comprometer tanto la productividad agroforestal como su contribución a la mitigación climática. Por ello, el estudio plantea la siguiente interrogante: ¿Cuál es la relación entre el carbono en biomasa aérea y suelo con los indicadores fisicoquímicos para el manejo sostenible de sistemas agroforestales en Luyando?

El estudio es relevante para generar información que permita valorar el potencial de los sistemas agroforestales como soluciones basadas en la naturaleza, orientadas al manejo sostenible de suelos y la mitigación del cambio climático. Además, contribuye a fortalecer la toma de decisiones en el ámbito local, regional e institucional, aportando evidencias técnicas que respalden prácticas sostenibles en zonas de alta intervención antrópica como Luyando.

El estudio se centrará en sistemas agroforestales representativos de Luyando, analizando parcelas de establecimiento con especies arbóreas y prácticas de manejo. Se evaluarán indicadores fisicoquímicos clave (pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno,

fósforo y textura) y su correlación con el carbono orgánico del suelo (COS) mediante métodos estandarizados. Los resultados se limitarán a las condiciones eco-climáticas y socioeconómicas de Luyando, pero sentarán bases metodológicas replicables en contextos similares.

Desde una perspectiva académica, la investigación aporta a la línea de trabajo en gestión ambiental, integrando componentes ecológicos, agrícolas y edáficos. Y desde un punto de vista social, promueve la sostenibilidad productiva y la mejora de los medios de vida de los agricultores.

### **1.1. Objetivo general**

Evaluar la relación entre el carbono en biomasa aérea y suelo con los indicadores fisicoquímicos para el manejo sostenible de sistemas agroforestales en Luyando.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea en sistemas agroforestales.
- Estimar el carbono orgánico almacenado en el suelo en sistemas agroforestales.
- Determinar los indicadores fisicoquímicos del suelo en sistemas agroforestales.
- Relacionar el carbono almacenado en la biomasa aérea con los indicadores fisicoquímicos del suelo en sistemas agroforestales.
- Relacionar el carbono orgánico del suelo con los indicadores fisicoquímicos del suelo en sistemas agroforestales.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Marco teórico

#### 2.1.1. Almacenamiento de carbono

El almacenamiento de carbono es una estrategia fundamental para disminuir los efectos del cambio climático, ya que permite reducir la cantidad de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente en la atmósfera, un gas de efecto invernadero que influye directamente en el calentamiento global. Este proceso consiste en capturar el CO<sub>2</sub> generado de manera natural o por actividades humanas y mantenerlo en reservorios apropiados para evitar que vuelva a liberarse al ambiente. A continuación, se presentan las principales tecnologías, métodos y aplicaciones asociadas a este procedimiento (García, 2012).

El almacenamiento de carbono en los bosques es un componente esencial del ciclo global del carbono y una herramienta clave en la mitigación del cambio climático. Los bosques actúan como sumideros de carbono al absorber dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de la atmósfera mediante la fotosíntesis. Este carbono se almacena en diversas formas dentro de los ecosistemas forestales, incluyendo la biomasa viva (troncos, hojas, ramas y raíces), la biomasa muerta (hojarasca y madera muerta) y el suelo, donde el carbono orgánico permanece atrapado en forma de materia orgánica a través de procesos de descomposición y acumulación (Lewis et al., 2013).

Con respecto al almacenamiento de carbono en ecosistemas naturales y en plantaciones forestales, el proceso se basa en la fotosíntesis. Durante este proceso el CO<sub>2</sub> se transfiere de la atmósfera al tejido vegetal. Si el tiempo medio de residencia del carbono en tejido vegetal es largo (60 años o más), se habla de un proceso biológico de captura de carbono, el cual contribuye a mitigar los efectos de calentamiento global (Escalona et al., 2007).

El almacenamiento de carbono en los bosques se distribuye entre varios componentes del ecosistema. La biomasa aérea está formada por troncos, ramas y hojas, que constituyen una reserva importante, especialmente en bosques con especies longevas y de gran tamaño. La biomasa subterránea también contribuye significativamente, ya que las raíces almacenan carbono con alta estabilidad. La madera muerta y la hojarasca actúan como depósitos temporales que liberan carbono de manera gradual. Por último, el carbono del suelo representa la mayor reserva forestal, conformado por materia orgánica y compuestos estabilizados capaces de persistir durante largos periodos (Loguercio, 2024).

### **2.1.2. Secuestro de carbono**

El secuestro de carbono en los ecosistemas forestales constituye un mecanismo esencial para mitigar el cambio climático, pues consiste en la captura y almacenamiento del CO<sub>2</sub> atmosférico a través de procesos naturales como la fotosíntesis. Este fenómeno representa un servicio ambiental fundamental, dado que los árboles incorporan y conservan el carbono en su biomasa. Además, su eficiencia puede incrementarse mediante un manejo forestal adecuado, lo que contribuye a evitar que los bosques se transformen en emisores de gases de efecto invernadero (Baccini, 2017).

Este almacenamiento se organiza principalmente en tres componentes: la biomasa aérea, que concentra el carbono presente en las partes externas del árbol; la biomasa subterránea, que comprende el carbono fijado en las raíces; y la materia orgánica del suelo, que incluye humus, microorganismos y compuestos orgánicos estabilizados. De esta manera, los bosques funcionan como sumideros de carbono, reteniendo más del que emiten siempre que se conserven en buen estado y no sean afectados por procesos de degradación o deforestación (Rajeev, 2020).

La cantidad de CO<sub>2</sub> que un árbol captura anualmente se refleja en el incremento anual de biomasa (madera), multiplicado por la cantidad de biomasa que contiene carbono. Sin embargo, este proceso solo genera un secuestro neto de carbono mientras el árbol está en crecimiento hasta alcanzar la madurez. Cuando un árbol muere, libera la misma cantidad de carbono que capturó a lo largo de su vida. Un bosque maduro, en su estado final, eventualmente emite tanto carbono como capturó. Por lo tanto, es crucial evaluar cuánto CO<sub>2</sub> captura un árbol a lo largo de su ciclo de vida (Pardos, 2010).

Los índices de secuestro de carbono varían significativamente según el tipo de árboles, características del suelo, topografía y prácticas de manejo forestal. El punto de saturación ocurre cuando los árboles alcanzan su madurez y máximo desarrollo, momento en el cual ya no incrementan significativamente su captura de carbono. Sin embargo, es esencial continuar con prácticas de captura de carbono incluso después de alcanzar la saturación, para evitar la liberación nuevamente de carbono a la atmósfera (Arévalo, 2015).

### **2.1.3. Cambio climático**

El cambio climático es uno de los desafíos más significativos y complejos que enfrenta la humanidad en la actualidad. Este fenómeno implica alteraciones sostenidas en los patrones climáticos globales a lo largo del tiempo, atribuidas principalmente

a actividades humanas que incrementan las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera. A continuación, se exploran múltiples aspectos clave para una perspectiva más integral (Heshmati, 2021).

Asimismo, el cambio climático afectará negativamente los avances logrados a nivel internacional en la lucha contra la pobreza extrema y en sectores como la salud y la educación. En los próximos años, la humanidad tendrá que afrontar directamente el calentamiento global, impulsado por la rápida acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, lo cual altera las proyecciones climáticas para las futuras generaciones (PNUD, 2007).

Se origina principalmente por el aumento de gases de efecto invernadero procedentes de la quema de combustibles fósiles, la deforestación y actividades agrícolas e industriales que liberan compuestos altamente contaminantes. Este fenómeno genera impactos ambientales como el incremento de la temperatura global, el aumento del nivel del mar y la intensificación de eventos climáticos extremos, afectando también la biodiversidad. En el ámbito social y económico, se compromete la seguridad alimentaria y el acceso al agua, se incrementan riesgos para la salud pública y se agravan las desigualdades, ya que las poblaciones más vulnerables enfrentan mayores dificultades para adaptarse a sus efectos (Mitchell, 2017).

#### **2.1.4. Carbono orgánico en el suelo de plantaciones**

Dentro del ciclo global del carbono, una fracción relativamente pequeña corresponde al carbono orgánico del suelo (COS), el cual se intercambia continuamente entre el suelo, la vegetación, los océanos y la atmósfera. El COS constituye alrededor de dos tercios del carbono almacenado en los ecosistemas terrestres, alcanzando aproximadamente 1 500 PgC en el primer metro del suelo, frente a los 500 PgC contenidos en la vegetación y los 800 PgC presentes en la atmósfera, lo que lo convierte en uno de los mayores reservorios naturales de carbono (FAO, 2017).

El suelo, aunque considerado un recurso inerte y no renovable, participa activamente en los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno y fósforo, y constituye un hábitat complejo para microorganismos ligados a las raíces. En este contexto, el carbono orgánico del suelo (COS) cumple un rol determinante en la fertilidad, conservación y mitigación del cambio climático. Sus niveles dependen del tipo de plantación, su edad, las especies introducidas y las prácticas de manejo (Da Silva, 2025)

Las plantaciones suelen registrar menos COS que los bosques naturales,

sobre todo en la fracción particulada, aunque pueden aproximarse a los valores de bosques secundarios tras varias décadas y con especies nativas. La disminución del COS proviene principalmente de la reducción de materia orgánica particulada, mientras que la fracción mineral se mantiene más estable. Factores como la deforestación, la desertificación y un manejo agrícola deficiente representan amenazas importantes para la estabilidad del suelo y su capacidad de almacenar carbono (Gong et al., 2025).

El carbono orgánico del suelo (COS) en plantaciones está influido por diversos factores, entre ellos la composición y diversidad de especies, ya que los sistemas mixtos y aquellos con especies fijadoras de nitrógeno suelen acumular más COS que los monocultivos. La edad de la plantación también incide en su contenido, pudiendo incrementarse con el tiempo o disminuir por mayor descomposición y demanda nutricional. El manejo es determinante: la retención de residuos, el control del sotobosque y la adición de nitrógeno favorecen la acumulación y estabilidad del COS. Asimismo, las concentraciones más altas se registran en los horizontes superficiales del suelo. Para potenciar el COS, se recomienda el uso de especies nativas, mezclas forestales, la conservación de residuos, prácticas de manejo con mínima perturbación e incorporación de abonos, junto con un monitoreo constante de la fertilidad y la humedad (Rahman, 2020).

La acumulación de carbono orgánico del suelo (COS) constituye un proceso clave en la mitigación del cambio climático, debido a que el suelo funciona tanto como sumidero como reservorio de carbono estabilizado (Hernández, 2012). Este elemento está ampliamente distribuido en la naturaleza: aparece en el agua como compuestos carbonados disueltos y en la atmósfera como dióxido de carbono. Además, representa cerca del 50 % del peso seco de los organismos vivos, lo que evidencia su papel esencial en los sistemas biológicos (Cargua et al., 2013).

#### **2.1.5. Captura de carbono en el suelo**

En el ciclo terrestre del carbono, los suelos constituyen el principal reservorio activo en intercambio con la atmósfera, al almacenar aproximadamente 1500 Pg C en el primer metro de profundidad. Esta reserva supera ampliamente la contenida en la vegetación y la atmósfera. Los flujos entre el carbono del suelo y el aire pueden manifestarse como captura o emisión de CO<sub>2</sub> y varían según el uso del territorio, las condiciones climáticas y las prácticas de manejo. Históricamente, el cambio de uso de la tierra, especialmente la deforestación y la expansión agrícola, ha liberado cantidades significativas de carbono a la atmósfera, mientras que la vegetación y ciertos ecosistemas continúan actuando como

sumideros. Factores como la temperatura, humedad, textura del suelo, aporte de residuos vegetales y fertilización influyen de manera directa en la acumulación y mineralización del carbono orgánico del suelo, cuya estabilización puede tomar varias décadas (Andrade et al., 2025).

La captura de carbono en el suelo es un proceso fundamental para mitigar el cambio climático, pues consiste en almacenar CO<sub>2</sub> atmosférico como carbono orgánico. Este almacenamiento se logra mediante la descomposición de residuos vegetales y compuestos liberados por las raíces, transformados por microorganismos en materia orgánica estable. La estabilidad del carbono depende de la formación de agregados, su unión a minerales y la acción microbiana, mientras que la diversidad vegetal y la estructura del suelo favorecen su acumulación (Almendros, 2025).

El carbono en el suelo se presenta en dos formas distintas: Carbono Orgánico del Suelo (COS) y Carbono Inorgánico del Suelo (CIS). El COS constituye el componente principal de la materia orgánica del suelo (MOS), desempeñando un papel crucial en la fertilidad de los suelos tropicales como reserva de nutrientes. A nivel global, se estima que el COS almacenado en los primeros 100 cm de profundidad oscila entre 1462-1548 Pg de carbono (1 Pg = 1x 10<sup>15</sup>g). Este carbono representa uno de los principales reservorios terrestres, superando tanto al carbono biótico como al atmosférico. El COS no solo indica la calidad del suelo, sino que también permite detectar cambios a lo largo del tiempo (González et al., 2008).

La captura de carbono en el suelo dentro de los sistemas agroforestales (SAFs) se sustenta en el aporte constante de biomasa aérea y subterránea proveniente de los árboles, cuyo sistema radicular profundo favorece el ingreso y la estabilización del carbono orgánico edáfico. Estos sistemas almacenan cantidades significativas de carbono tanto en la fracción aérea como en el suelo, con valores que varían según la composición arbórea, edad del sistema y condiciones ecológicas. En el Perú, los SAFs han mostrado altos niveles de carbono acumulado en el suelo, especialmente en zonas tropicales, donde la presencia de especies maderables y frutales incrementa la incorporación de materia orgánica y mejora la función del suelo como sumidero de carbono. No obstante, la comparación entre estudios es limitada debido a diferencias metodológicas y a la falta de estandarización en la evaluación de biomasa y carbono edáfico (Clemente, 2021).

#### **2.1.6. Biomasa**

De acuerdo con el IPCC (2013), la biomasa es la masa total de

organismos vivos dentro de un área o volumen específico, considerando también la biomasa muerta. La vegetación arbórea constituye un indicador esencial del estado de los recursos forestales, debido a que acumula carbono en sus diferentes componentes estructurales. La estimación del CO<sub>2</sub> capturado a partir de la biomasa permite reconocer a los bosques como sistemas fundamentales para enfrentar los impactos del cambio climático

Pardé (1980) citado por Churampi (2017), señala que la biomasa de la vegetación leñosa corresponde a la masa total de materia orgánica viva situada sobre el suelo, incluyendo hojas, ramas, varas, fuste y corteza, expresada como peso anhidro por unidad de área. Su correcta estimación es esencial, ya que permite cuantificar el carbono y otros elementos almacenados en los distintos componentes del árbol, así como la cantidad de CO<sub>2</sub> que puede ser capturada mediante procesos de reforestación.

La biomasa aérea incluye toda la vegetación viva situada sobre el suelo, como fustes, ramas, corteza, hojas y semillas. Su acumulación refleja la productividad del ecosistema y su capacidad para almacenar carbono. La densidad de la madera, variable entre especies y condiciones del sitio, junto con la composición y estructura de la vegetación, influyen en el carbono retenido. Tanto la biomasa aérea como la radical aumentan con la clase diamétrica, representando aquella entre el 83.4% y 85.4% de la biomasa total. El carbono almacenado se relaciona estrechamente con el crecimiento en diámetro y altura (Juep, 2024).

La biomasa del suelo también constituye un reservorio importante, ya que los suelos forestales minerales pueden acumular entre 20 y más de 300 t C/ha en el primer metro de profundidad, según el tipo de bosque y las condiciones climáticas. El contenido de COS está determinado por factores de formación del suelo, pero puede modificarse significativamente por el manejo y los cambios de uso de la tierra. En los ecosistemas terrestres, cerca del 50% del carbono total se concentra en los suelos y la biomasa forestal, mientras que praderas y sistemas agrícolas almacenan el 33% y 17%, respectivamente. Además, la descomposición y estabilización de detritos regulan procesos clave como el ciclo de la MOS, el secuestro de carbono y la mineralización de nutrientes. La fijación de carbono responde a variables como uso de suelo, densidad de plantación, edad y morfología de la vegetación, textura y calidad del suelo, clima y manejo silvicultural. En general, el balance del COS depende del uso del territorio, altitud, vegetación y grado de perturbación, observándose mayores concentraciones en capas minerales profundas (50–100 cm) (Romero, 2015).

Además, la necromasa superficial comprende los combustibles muertos presentes sobre el suelo, originados por la caída de material leñoso y por la capa orgánica

formada por los horizontes de hojarasca y fermentación. Aunque estos residuos representan parte del ciclo de descomposición, constituyen un depósito menor de carbono en los ecosistemas forestales. La hojarasca incluye hojas, ramas, frutos, semillas y otros órganos vegetales que se acumulan y descomponen en la superficie del suelo, variando su composición según el ecosistema. Su degradación transforma la materia orgánica en compuestos minerales ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y nutrientes) y genera sustancias recalcitrantes o carbono orgánico disuelto que se transfiere al suelo mineral. El espesor y la descomposición de esta capa dependen de la estacionalidad, el clima, la fertilidad, la composición de especies, la altitud y la latitud (Taipe, 2019).

El cálculo de la biomasa permite estimar de manera aproximada el carbono almacenado, debido a la estrecha relación que existe entre ambos. Es fundamental diferenciar entre Carbono (C) y Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ): una molécula de  $\text{CO}_2$  está compuesta por un átomo de carbono con peso atómico 12 y dos átomos de oxígeno con peso atómico total 32 ( $2 \times 16$ ), resultando en un peso molecular de 44. De este total, solo 12 corresponden al carbono, por lo que 1 tonelada de carbono equivale a 3.667 toneladas de  $\text{CO}_2$  (Cabudivo, 2017).

#### **2.1.6.1. Metodología para estimar biomasa.**

A nivel mundial, se han desarrollado diversas estrategias para mitigar el cambio climático, incluyendo los convenios sobre créditos de carbono. Para implementar estos proyectos, es fundamental cuantificar y monitorear la biomasa aérea de los bosques, ya que esta permite estimar la cantidad de carbono almacenado. Diferentes ecuaciones alométricas de biomasa se aplican en la mayoría de los estudios de secuestro de carbono forestal (Hurtado et al., 2017). La biomasa forestal puede estimarse mediante métodos directos e indirectos. El método directo, de tipo destructivo, consiste en talar el árbol, separar sus componentes (raíces, fuste, ramas y hojas) y determinar su biomasa mediante pesaje y análisis de laboratorio. El método indirecto utiliza variables dasométricas como diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total y densidad de la madera para estimar la biomasa mediante ecuaciones alométricas, desarrolladas a partir de regresiones entre mediciones de campo e inventarios forestales (Churampi, 2017).

Las especies arbóreas concentran la mayor proporción de biomasa en un ecosistema, por lo que su cuantificación es esencial. Para ello existen dos enfoques: el destructivo, que permite generar ecuaciones alométricas y factores de expansión a partir del peso fresco y seco de los componentes del árbol; y el no destructivo, que estima la

biomasa de manera indirecta usando variables de campo de fácil medición, como DAP y altura, aplicadas en ecuaciones alométricas previamente desarrolladas (MINAM, 2007).

### 2.1.7. Propiedades físicas del suelo

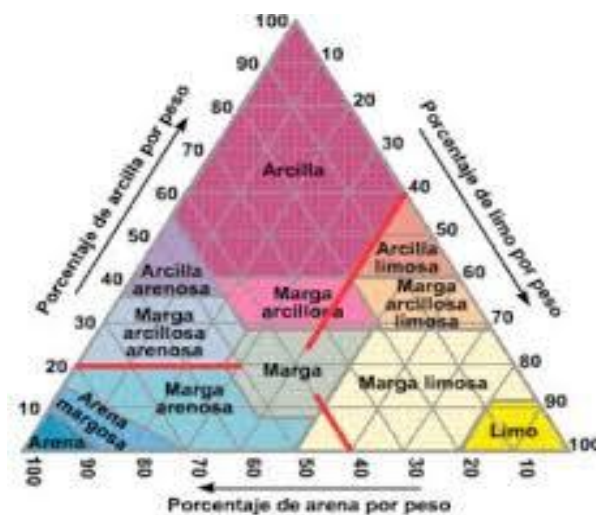
De acuerdo con Castillo (2005), citado por Rivera et al. (2022), las propiedades físicas del suelo son esenciales para el movimiento de aire, agua, calor y solutos. Sin embargo, prácticas como la labranza pueden afectar negativamente estas propiedades, haciendo que el suelo sea menos permeable y más propenso a la escorrentía y erosión. Se distinguen las propiedades, que le confieren personalidad al suelo (superficie, estructura, color, mineralogía, claridad y espesor), y los atributos, que reflejan cómo se comporta el suelo en función de esas propiedades, como la porosidad, permeabilidad y conservación de la humedad.

#### 2.1.7.1. Textura

Rodríguez (2024) define la textura del suelo como la distribución de fracciones de arena, limo y arcilla contenidas en el suelo; excluye a partículas minerales más grandes que la arena (2 mm de diámetro), las cuales son consideradas como modificadores texturales recibiendo las siguientes denominaciones: grava (0.2 – 2 cm), gravilla (2 – 5 cm), guijarros (15 – 25 cm), rodador (25 – 50 cm) y los bloques (+ 50 cm); son considerados dentro de este grupo a los agregados estables por defecto de materia orgánica.

#### 2.1.7.2. Clase textural

Zavaleta (1992) indica que las clases texturales se basan en las diferentes combinaciones de arena, limo y arcilla, por consiguiente, estas combinaciones son casi infinitas. No obstante, se ha fijado solo doce clases texturales básicas; que se enumeran en orden de incremento de la fracción fina; y en relación con el suelo se denominan:



**Figura 1.** Triángulo textural (USDA, 1999)

Los suelos con mayor proporción de arcilla poseen una elevada capacidad de retención de agua, aunque presentan una aireación limitada. No obstante, la presencia de materia orgánica contribuye a mejorar la regulación del agua en estos suelos arcillosos. En contraste, los suelos arenosos mantienen menores concentraciones de agua debido a su mayor proporción de aire, aunque la materia orgánica ayuda a formar agregados que unen las partículas de arcilla. Asimismo, los suelos pesados y arcillosos, aunque son ricos en nutrientes, dificultan la penetración y el desarrollo radicular, limitando la absorción de agua y nutrientes necesarios para el crecimiento y regeneración de los árboles (Andrade et al., 2025).

### **2.1.7.3. Densidad del suelo**

La densidad del suelo, definida como la masa de suelo seco por unidad de volumen incluyendo poros, afecta la salud del suelo, productividad, retención de agua, infiltración, crecimiento radicular y almacenamiento de carbono. Se mide por métodos directos (cilindro, clod, excavación) o indirectos (radiación gamma, espectroscopía, fotogrametría, sensores). Los métodos directos son precisos pero laboriosos; los indirectos permiten mediciones rápidas a gran escala y tecnologías recientes como LIBS y fotogrametría ofrecen eficiencia y precisión. La densidad depende de textura, materia orgánica, profundidad, uso del suelo y manejo. Suelos compactados muestran mayor densidad, limitando raíces e infiltración, mientras que suelos ricos en materia orgánica o con cobertura forestal presentan menor densidad (Casanova, 2016).

### **2.1.7.4. Porosidad del suelo**

La porosidad del suelo es la proporción de espacios vacíos respecto al volumen total, determinando la retención y movimiento de agua, aire y nutrientes, e impactando el crecimiento vegetal y la actividad microbiana. Está influida por la materia orgánica y el uso del suelo, la textura y compactación de partículas, y la estructura y agregación del suelo. La materia orgánica y los agregados aumentan la microporosidad y estabilidad, mientras que la compactación reduce la macroporosidad, afectando infiltración y aireación. Se mide mediante densidad aparente y de partículas, el método de saturación con agua/etanol. Técnicas avanzadas incluyen ultrasonido, tomografía computarizada, espectroscopía y fotogrametría, que permiten evaluaciones rápidas, precisas y no destructivas (Bradley, 2024).

### **2.1.8. Propiedades químicas**

Las propiedades químicas del suelo, como pH, materia orgánica, nutrientes y capacidad de intercambio catiónico (CIC), determinan su fertilidad y la aptitud para

el crecimiento de las plantas. Están influenciadas por el uso y manejo del suelo, el material parental, el clima y la profundidad, ya que la materia orgánica y los nutrientes tienden a disminuir con la profundidad, mientras que el pH puede aumentar. Su evaluación es esencial para planificar la fertilización, seleccionar cultivos y establecer prácticas sostenibles, garantizando productividad agrícola y salud del ecosistema (Mebrate et al., 2022).

#### **2.1.8.1. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)**

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es una medida de cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo (arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas) y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener. La unidad de medición de CIC es en meq/100g de suelo”. Además, es una de las propiedades más importante de los suelos ya que es un indicador importante de la fertilidad del suelo debido a que de él depende la disponibilidad de nutrientes para las plantas y la solubilidad de los mismos (Ramírez, 1997).

#### **2.1.8.2. Potencial de hidrógeno (pH)**

El pH del suelo es una propiedad química esencial que regula la acidez o alcalinidad del sistema edáfico y actúa como variable maestra al controlar la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y la movilidad de elementos tóxicos. La mayoría de los cultivos se desarrollan adecuadamente en un rango de pH entre 5.5 y 7.5. Valores ácidos pueden generar toxicidad por Al y Mn y deficiencias de Ca, Mg y P, mientras que valores alcalinos reducen la disponibilidad de micronutrientes como Fe, Zn y Cu. El pH es influenciado por la mineralogía del material parental, el clima, la materia orgánica, el uso del suelo y prácticas como fertilización o encalado. Su medición varía según el método utilizado (agua,  $\text{CaCl}_2$  o KCl), lo que puede modificar la interpretación de los resultados (Oshunsanya, 2019).

#### **2.1.8.3. Salinidad del suelo**

La salinidad del suelo es un proceso de acumulación excesiva de sales solubles que reduce la fertilidad, deteriora la estructura y limita la productividad agrícola, especialmente en zonas áridas y semiáridas. Su origen puede ser natural, por el tipo de material parental, clima seco y elevada evaporación, o inducido por prácticas agrícolas como el riego con agua de mala calidad, el escaso drenaje y el uso intensivo de fertilizantes. La salinidad se evalúa mediante la conductividad eléctrica del extracto de saturación, siendo considerado salino un suelo que supera los 4 dS/m. Sus efectos incluyen disminución del rendimiento de los cultivos, estrés osmótico, toxicidad iónica, alteraciones en la actividad microbiana y pérdida de

materia orgánica, lo que contribuye a la degradación y desertificación. Para mitigar este problema se aplican estrategias como mejorar el drenaje, emplear enmiendas, optimizar el riego, usar cultivos tolerantes y recurrir a tecnologías emergentes como bioinoculantes y herramientas de monitoreo (Machado et al., 2017).

#### **2.1.8.4. Nitrógeno (N)**

Las comunidades de organismos y microorganismos que habitan en el suelo, son los responsables de la transformación del nitrógeno (N) en formas disponibles para los cultivos que crecen en él, controlando el proceso de mineralización del nitrógeno, los ciclos biogeoquímicos como el nitrógeno, son de gran importancia para la agricultura, porque permite el crecimiento adecuado de las plantas, ya que generan un impacto económico y ecológico en el suelo, lo que conlleva a la adecuada disponibilidad de los nutrientes por los organismos que viven en el suelo y mantienen las buenas producciones agrícolas (Varela *et al.*, 2019).

Las bacterias que se encargan de fijar el nitrógeno en el suelo producen enzimas que les permiten captar este componente de la atmósfera en forma gaseosa y al mezclarlo con los azúcares de las plantas o cultivos de esa manera se fija dentro de la biomasa bacteriana; dicho proceso es importante para el suelo ya que permite que se aumente la fertilidad de este (Peña, 2018).

#### **2.1.8.5. Fósforo (P)**

El fósforo es un nutriente esencial cuya disponibilidad en el suelo suele ser baja, ya que la mayor parte se encuentra en formas fijadas u ocluidas, mientras que solo una fracción mínima es accesible para las plantas. Esta dinámica depende del pH, la textura, la materia orgánica y el manejo agrícola. Su relación con la captura de carbono es estrecha porque la materia orgánica, principal reservorio de carbono, también almacena y libera fósforo orgánico. Cuando aumenta el contenido de carbono orgánico, mejora la fracción lábil de P y se incrementa su disponibilidad. Además, la eficiencia de captura de carbono está condicionada por la disponibilidad de P, dado que los procesos biológicos que forman y estabilizan el carbono orgánico requieren este nutriente. Por ello, prácticas que enriquecen la materia orgánica del suelo, como abonos orgánicos y rotaciones, fortalecen simultáneamente la captura de carbono y el ciclo del fósforo (Silva et al., 2022).

Existe una relación positiva entre los organismos del suelo y el fósforo total disponible que se encuentra presente en el suelo, ya que en gran medida los grupos

funcionales como los detritívoros y depredadores como lombrices (Lumbricidae) y termitas (Termopsidae) regulan los nutrientes, estos son importantes porque generan estructuras biogénicas como los canales realizados por las lombrices y montículos de termitas en donde los contenidos de fósforo (P) difieren del suelo circundante (Machado et al., 2017).

#### **2.1.8.6. Potasio (K)**

El potasio es un macronutriente esencial cuya disponibilidad influye directamente en el crecimiento vegetal y, por extensión, en la captura de carbono del suelo. Su adecuada presencia favorece un mayor desarrollo de biomasa y un mayor retorno de residuos vegetales, lo que incrementa el carbono orgánico del suelo. Además, el potasio mejora la estructura del suelo y estimula la actividad enzimática y microbiana que regula la descomposición y estabilización del carbono. La interacción del K con la materia orgánica, especialmente cuando se aplican enmiendas como biochar o residuos de cosecha, potencia la eficiencia del secuestro de carbono. No obstante, este efecto varía según el tipo de suelo, su nivel de arcillas, el pH y las condiciones climáticas, siendo más evidente en suelos con deficiencia de potasio y en ambientes húmedos donde los procesos biológicos son más intensos (Ghosh et al., 2018).

#### **2.1.8.7. Calcio (Ca)**

El calcio es un componente esencial de muchos suelos y cumple un papel determinante en la estabilización del carbono orgánico. Su presencia favorece la formación de enlaces entre la materia orgánica y los minerales, creando estructuras que protegen el carbono frente a la oxidación y la descomposición. Asimismo, el calcio mejora la formación y estabilidad de agregados del suelo, dentro de los cuales el carbono queda físicamente protegido. En suelos calizos o alcalinos, el carbonato de calcio también contribuye a fijar carbono y a mejorar la estructura del suelo. Además, el calcio influye en la actividad microbiana y en procesos enzimáticos que regulan la transformación del carbono, promoviendo comunidades y reacciones que facilitan su acumulación y permanencia en el ecosistema (Shabtai et al., 2023).

#### **2.1.8.8. Magnesio (Mg)**

El magnesio es un nutriente clave del suelo y cumple un papel importante en la retención y estabilización del carbono, ya que participa en la formación de agregados y complejos entre arcillas y materia orgánica que protegen el carbono frente a la descomposición. Su presencia, especialmente en forma intercambiable, se asocia con una mayor

estabilidad estructural y con el carbono unido a minerales, favoreciendo su almacenamiento. Además, el uso de enmiendas como biochar enriquecido con magnesio puede incrementar las fracciones estables de carbono y reducir su pérdida por mineralización. Sin embargo, en algunos suelos un exceso de Mg puede generar desagregación y aumentar el carbono disuelto, reduciendo la retención de carbono. En conjunto, el magnesio influye también en la actividad microbiana y la fertilidad, modulando los procesos que determinan la acumulación y persistencia del carbono en el suelo (Zhang et al., 2025).

#### **2.1.8.9. Materia orgánica del suelo**

La materia orgánica, o humus, cumple un papel clave en las propiedades del suelo, aunque no existe un concepto único para definirla. Generalmente, se refiere a sustancias orgánicas de color pardo o negruzco, producto de la descomposición de materiales orgánicos, con aproximadamente 5 % de nitrógeno; por lo tanto, la materia orgánica se puede estimar multiplicando por 20 el valor del nitrógeno total. Los niveles de materia orgánica varían regionalmente: un 2 % en un valle aluvial de la costa peruana se considera alto, mientras que en zonas de la sierra ese mismo valor se clasificaría como bajo. En general, los contenidos se categorizan como bajos, medios, altos y muy alto (Peralta, 2021).

#### **2.1.9. Sistema agroforestal**

Según Becerra (2018), los sistemas agroforestales constituyen una manera de emplear la tierra en la cual plantas leñosas de larga duración interactúan biológicamente en un espacio junto con cultivos y/o animales. El objetivo principal es aumentar la diversidad y eficiencia de la producción, mientras se respeta el principio de la sostenibilidad.

Se plantea que los sistemas agroforestales son formas de uso y manejo de los recursos naturales en las que especies leñosas, como árboles, arbustos y palmas, se integran de manera planificada con cultivos. Estos sistemas productivos sostenibles funcionan con una dinámica similar a la de un bosque natural, donde se combinan cultivos tradicionales, como maíz y frijoles, con especies frutales, forestales y medicinales que pueden ser aprovechadas directamente por las familias agricultoras (Becerra, 2018).

#### **2.1.10. Clasificación de los sistemas agroforestales**

Los sistemas agroforestales pueden ser clasificados según las tres categorías tradicionales, las cuales son las siguientes:

- **Sistemas silvoagrícolas**

El uso de la tierra bajo sistemas agroforestales implica la producción secuencial o simultánea de cultivos agrícolas junto con especies arbóreas. Dentro de estas prácticas se incluyen la combinación de árboles maderables con cultivos, la asociación de frutales con productos agrícolas y el uso de árboles de sombra o mejoradores del suelo en cultivos como el café. También forman parte de estos sistemas el barbecho con especies útiles, las defensas ribereñas que protegen zonas agrícolas, así como la implementación de cercos vivos y cortinas rompevientos que contribuyen tanto a la protección como al mejor desempeño de los cultivos (Traversa, 2013).

- **Sistemas silvopastoriles**

Según Romero (2015), los sistemas agroforestales comprenden formas de manejo de la tierra en las que los bosques se gestionan no solo para producir madera, sino también alimentos, forraje y para la crianza de animales. Dentro de estos sistemas se incluyen prácticas como el pastoreo o la producción de forraje en bosques secundarios, la presencia de árboles comerciales o maderables dentro de los pastizales, así como el uso de árboles y arbustos forrajeros y la implementación de bancos de forraje destinados a complementar la alimentación animal.

- **Sistemas agrosilvopastoriles**

Flores (2013) menciona que los sistemas agroforestales se caracterizan por utilizar la tierra para producir simultáneamente cultivos forestales, agrícolas y ganado doméstico. Dentro de estos sistemas se incluyen diversas combinaciones, como la integración de cultivos y ganadería dentro de plantaciones forestales, la asociación de árboles con cultivos y animales, la apicultura vinculada a especies arbóreas, el uso de cercos vivos que delimitan pastizales o comunidades rurales, así como los huertos caseros que combinan diferentes tipos de plantas y árboles en un mismo espacio.

### **2.1.11. Ventajas del SAF**

Cuando un sistema agroforestal se planifica y ejecuta correctamente, con el paso del tiempo ofrece múltiples ventajas para la producción y la sostenibilidad. Entre los principales beneficios se encuentran el incremento de la productividad total, ya que la combinación de especies de distintos usos aumenta el rendimiento global del área, aunque no necesariamente del cultivo principal. Además, la diversificación hace que el sistema sea más sostenible y reduce los riesgos para el agricultor, porque si un producto falla, otros compensan

la pérdida. También disminuye la demanda de mano de obra al permitir atender varios cultivos en un mismo espacio, logrando un mejor aprovechamiento del tiempo. Estos sistemas generan productos adicionales como madera, leña, frutos o flores y proporcionan ingresos en diferentes plazos. Asimismo, contribuyen al control de malezas, ofrecen protección frente al viento y otros factores ambientales, y permiten acortar el periodo de barbecho cuando se utilizan especies leguminosas que aportan abundante materia orgánica. En conjunto, los sistemas agroforestales brindan recursos, estabilidad y beneficios económicos y ecológicos que fortalecen la producción agrícola (Aparicio, 2009).

#### **2.1.12. Servicios ecosistémicos de plantaciones forestales**

Las plantaciones forestales proporcionan una amplia gama de servicios ecosistémicos que son fundamentales para el bienestar humano y la salud del medio ambiente. Estos servicios incluyen la captura de carbono y la mitigación del cambio climático, la conservación de la biodiversidad, la regulación del ciclo del agua, la protección del suelo contra la erosión, y la provisión de hábitat para la fauna silvestre (Ghosh et al., 2018).

Las plantaciones forestales desempeñan un papel crucial en la conservación del medio ambiente. Contribuyen a la captura de carbono, ayudando así en la mitigación del cambio climático. Además, promueven la conservación de la biodiversidad al proporcionar hábitats para diversas especies de flora y fauna (Jara, 2016).

Para abordar estos desafíos, es fundamental adoptar prácticas de manejo forestal sostenible en las plantaciones. Esto implica la implementación de técnicas que equilibren la producción de recursos con la conservación del medio ambiente y el bienestar social de las comunidades locales (Añazco et al., 2021).

El impacto de las plantaciones forestales en los servicios ecosistémicos puede variar dependiendo de factores como la especie de árboles plantados, la densidad de siembra, las prácticas de manejo forestal y la ubicación geográfica. Por ejemplo, las plantaciones monoculturales pueden tener un impacto negativo en la biodiversidad al reducir la diversidad de especies y el hábitat disponible para la fauna silvestre. Sin embargo, algunas prácticas de manejo, como la plantación de especies nativas y la conservación de áreas de bosque natural, pueden ayudar a mitigar estos impactos negativos y promover la provisión de servicios ecosistémicos diversos y resilientes (Brockhoff et al., 2017).

La gestión sostenible de las plantaciones forestales es fundamental para garantizar la provisión continua de servicios ecosistémicos a lo largo del tiempo (Nasi et al.,

2002). Esto implica adoptar prácticas de manejo que promuevan la conservación de la biodiversidad, la protección del suelo y del agua, y la mitigación del cambio climático, al tiempo que se maximizan los beneficios económicos y sociales derivados de las plantaciones forestales (FAO, 2017).

La integración de los servicios ecosistémicos en la toma de decisiones forestales es fundamental para garantizar un manejo forestal que sea efectivo y sostenible (TEEB, 2010). Esto implica evaluar los impactos de las decisiones forestales en la provisión de servicios ecosistémicos y considerar estos aspectos en el diseño de políticas y estrategias de manejo forestal (Reyers et al., 2018).

## **2.2. Estado del arte**

### **2.2.1. Nivel internacional**

Piponiot et al. (2025) evaluaron el almacenamiento de carbono en cinco sistemas agroforestales tradicionales (SAF) en Timor-Leste: sistemas de cultivo con barbecho, sistemas silvopastoriles, agroforestales jóvenes, huertos familiares y huertos forestales. Se cuantificó el carbono en la biomasa aérea y en el suelo a partir de 30 parcelas distribuidas en dos sitios del municipio de Baucau. Los resultados mostraron un promedio total de 155 Mg C ha<sup>-1</sup>, con valores de 213 Mg C ha<sup>-1</sup> en los huertos familiares, 171 Mg C ha<sup>-1</sup> en los huertos forestales, 158 Mg C ha<sup>-1</sup> en los sistemas silvopastoriles, 134 Mg C ha<sup>-1</sup> en los agroforestales jóvenes y 108 Mg C ha<sup>-1</sup> en los cultivos con barbecho. La variabilidad del carbono del suelo fue menor que la de la biomasa aérea, aunque dependió de las condiciones locales. No se encontró una relación directa entre el carbono aéreo y el del suelo. Los autores concluyeron que los SAF tradicionales poseen un alto potencial de secuestro de carbono, actuando como sumideros naturales que podrían incorporarse a estrategias nacionales de mitigación del cambio climático.

Wang et al. (2022) llevaron a cabo un estudio en el sur de la provincia de Xinjiang, al noroeste de China, donde analizaron los efectos de la conversión de tierras agrícolas en huertos de azufaifo y sistemas agroforestales. Los resultados evidenciaron aumentos significativos ( $p < 0,05$ ) en el carbono orgánico total (COT), de 26,4 a 49,2 Mg C ha<sup>-1</sup>, y en el carbono orgánico lábil (COL), de 5,2 a 11,3 Mg C ha<sup>-1</sup>, concentrados principalmente en los primeros 30 cm del suelo. El estudio demostró que el COL es un indicador más sensible al manejo y que la agroforestería promueve un mayor secuestro de carbono en el suelo, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental. Estos hallazgos se relacionan directamente con la

presente investigación, que busca evaluar la relación entre el carbono en biomasa y suelo para un manejo sostenible de sistemas agroforestales.

Parrales (2022) evaluó la fertilidad de suelos bajo cinco sistemas agroforestales en el sitio Ramo Grande (Jipijapa), caracterizando tanto propiedades físicas como químicas. Los suelos presentaron colores marrones amarillento a rojizo, texturas que variaron de franco a franco-arcillosa, limosa y arenosa, y consistencia de suelta a plástica, asociados a sistemas agrosilvícolas manejados en forma empírica. Químicamente, los perfiles mostraron pH prácticamente neutro a ligeramente ácido (6.4–7.2), con fósforo entre 13 y 29 ppm, contenidos de materia orgánica desde 3.4 hasta 8.8 %, y conductividad eléctrica baja (no salinos), con valores entre 0.25 y 1.73 dS/m. La suma de bases intercambiables (Ca, Mg y K) alcanzó entre 20.75 y 21.65 meq/100 ml, indicando buena saturación de bases y condiciones favorables para el desarrollo de sistemas agroforestales en el área de estudio.

El estudio desarrollado por Añazco et al. (2021) en las provincias de Imbabura y Carchi, en el país de Ecuador, evaluó la fijación de carbono en cinco sistemas agroforestales manejados por pequeños productores. Se estimó el carbono almacenado en biomasa aérea, encontrándose que el sistema silvopastoril con *Eucalyptus globulus* y *Pennisetum clandestinum* alcanzó la mayor captura con 87,13 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>. La densidad de árboles determinó la acumulación: *E. globulus* (1111 árboles/ha) fijó 77,56 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>, *A. nepalensis* con 36,53 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>, *J. neotropica* con 19,99 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> e *Inga insignis* con 8,76 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>. En estas prácticas, las especies forestales aportaron 89 % del carbono, mientras que cultivos y pastos el 11 %. En especies agrícolas, *Zea mays* registró 11,63 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>, superando a *P. clandestinum* (9,57 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>). El estudio concluye que los sistemas agroforestales andinos fijan carbono a tasas superiores a sistemas similares dentro y fuera del país, están condicionados por factores como densidad, edad, altitud y características de la madera.

En Meseta, en el país de Colombia, Hernández et al. (2021) evaluaron la biomasa, necromasa y carbono orgánico del suelo (COS) en bosque, SAF (cacao, café y sistemas silvopastoriles) para determinar las reservas de carbono. El bosque registró el mayor almacenamiento con 216,6 t C/ha, superando en 59 % a SAF cacao y en 72 % a SAF café. El carbono forestal representó 89 % del total en bosque, 94 % en SSP, 51 % en SAF café y 48 % en SAF cacao. En los SAF, los árboles de cacao almacenaron 85 % más C que los de café. El COS fue mayor en SAF café (42,8 t C/ha) y bosque (40,8 t C/ha). La necromasa destacó en el bosque con 19,3 t C/ha. Se identificó mayor aporte de Fabaceae, Lauraceae y Primulaceae;

Fabaceae dominó en SAF café (42 %). El bosque es el sistema con mayor capacidad de almacenamiento de carbono; sin embargo, los SAF, especialmente SAF café, muestran altos niveles de COS y representan alternativas viables para proyectos de mitigación climática, siempre que se mantenga una estructura arbórea diversa.

Poveda et al. (2013) estimaron el carbono almacenado en 50 sistemas agroforestales con cacao (SAF-cacao) en Waslala, Nicaragua. Los sistemas agroforestales almacenaron 91,45 ( $\pm 31,44$ ) t C/ha, con una tasa de fijación de carbono total de 5,4 t C/ha/año, y 2 t C/ha/año en biomasa aérea. Los compartimentos que más carbono almacenaron fueron: el suelo con 52,61 % del total, la biomasa aérea (plantas de cacao y árboles de sombra) con 35,86%, raíces gruesas con 7,52 %, raíces finas con 4,15 %, necromasa y hojarasca con 0,32 % cada uno. El 56 % de los SAF de cacao presentó niveles de carbono medio y alto, mientras que el 44 % mostró niveles bajos y muy bajos. A través de un análisis de conglomerados, se identificaron cuatro grupos con diferentes contenidos de carbono, siendo el suelo el mayor aportante. Las variables más influyentes en la diferenciación de los grupos fueron la diversidad arbórea del dosel de sombra (número de especies, densidad, área basal, biomasa). Se estimó que los productores podrían recibir US\$36/t C/ha/año por el secuestro de carbono, un valor correspondiente a la tasa anual de fijación de carbono aéreo.

Espinoza-Domínguez et al. (2012) estimaron el almacén de carbono en sistemas agroforestales (SAF) basados en café en la región de Huatusco, Veracruz, México. Se evaluaron varios sistemas agroforestales, incluidos café-plátano, café-macadamia, café-cedro rosado, café-ganado ovino y café-chalahuite. El sistema agroforestal café-cedro rosado (Ca + Ce) presentó el mayor almacenamiento de carbono aéreo, con 114 Mg C/ha, seguido por café-macadamia (Ca + Ma) con 34 Mg C/ha y café-chalahuite (Ca + Ch) con 29 Mg C/ha. En cuanto al carbono orgánico del suelo, el sistema café-cedro rosado (Ca + Ce) también presentó el mayor contenido de carbono fácilmente oxidable, con 58 Mg C/ha, mientras que el sistema de potrero (P) tuvo el valor más bajo con 50 Mg C/ha. El carbono orgánico total en los SAF fue mayor en el tratamiento Ca + Ce, con 172 Mg C/ha, y el más bajo en el sistema silvopastoril (Sp), con 65 Mg C/ha. En promedio, los SAF almacenaron 102 Mg C/ha, mientras que el potrero almacenó 52 Mg C/ha. El bosque primario fue el sistema con el mayor almacenamiento de carbono total, con 355 Mg C/ha.

Negash et al. (2015), desarrollaron en el Valle del Rift, Etiopía, un estudio con el propósito de evaluar las reservas de carbono en la biomasa y en el carbono orgánico del suelo (COS) de tres sistemas agroforestales autóctonos: Enset (Ensete

ventricosum, Musaceae), Enset-Café y Café-Frutos. El autor recopiló información de seis pequeñas explotaciones por tipo de sistema, estimando la biomasa aérea y subterránea mediante ecuaciones alométricas, mientras que la biomasa de hierbas, hojarasca y raíces finas se determinó a través de muestreo destructivo. Los resultados mostraron que las reservas totales de carbono en la biomasa promediaron 67 Mg C/ha, con los árboles representando entre el 39 % y 93 % del total. El café aportó en promedio el 11 % del carbono de la biomasa. En cuanto al carbono orgánico del suelo, los valores oscilaron entre 109 y 253 Mg C/ha, representando entre el 52 % y 91 % del carbono total. Aunque no se hallaron diferencias significativas entre los sistemas agroforestales, sí se evidenció una correlación con la altitud. El estudio concluye que estos sistemas agroforestales presentan una de las reservas de carbono más altas registradas en bosques tropicales, lo que los convierte en alternativas idóneas para proyectos REDD+, destacando que las prácticas de manejo de los pequeños productores influyen más que el tipo de sistema o las condiciones climáticas.

Patiño et al. (2018) en el Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) de la Universidad del Tolima, Colombia, se evaluó la biomasa total y el almacenamiento de carbono en plantaciones forestales (PF) y sistemas agroforestales (SAF). Las PF, con edades entre 5 y 25 años, almacenaron entre 18,6 y 64,4 Mg C ha<sup>-1</sup>, mientras que los SAF alcanzaron 85,9 Mg C ha<sup>-1</sup>, con tasas de fijación promedio de 1,4 y 4,9 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente. La biomasa subterránea representó el 17 % del total. Entre las especies, *Hevea brasiliensis* presentó 107,6 Mg ha<sup>-1</sup> y *Gmelina arborea* 69 Mg ha<sup>-1</sup> de biomasa aérea, mientras que *Tectona grandis* almacenó 27,2 Mg C ha<sup>-1</sup> a los cinco años. Los resultados evidencian que los SAF superan a las PF en capacidad de secuestro de carbono, destacando su valor para mitigar el cambio climático y mejorar los sistemas productivos rurales.

En la región Terai del Himalaya Garhwal, Singh et al. (2018) evaluaron las propiedades físicas y químicas del suelo bajo nueve sistemas de uso, comparando ocho arreglos agroforestales con un campo agrícola sin árboles, demostrando que los sistemas agroforestales mejoran significativamente la calidad del suelo. Los autores registraron que la densidad aparente fue mayor en el sistema agrícola (1.41–1.45 g/cm<sup>3</sup>) y menor bajo especies arbóreas como *Populus deltoides* (1.25–1.28 g/cm<sup>3</sup>), mientras que la porosidad total alcanzó valores más altos en *Quercus leucotrichophora* (54.60–57.60 %) frente al suelo agrícola (51.20–52.66 %). En el componente químico, *Q. leucotrichophora* mostró los mayores niveles de carbono orgánico del suelo (1.07 %, 0.90 % y 0.84 %), así como mayores concentraciones de nitrógeno disponible (357.26–332.18 kg/ha), fósforo disponible (26.56–17.59 kg/ha) y

potasio disponible (167.56–132.26 kg/ha), superando ampliamente al monocultivo agrícola, lo que evidencia que estos sistemas con árboles incrementan la fertilidad, mejoran la estructura del suelo y favorecen el mantenimiento de nutrientes esenciales.

Calderón-Medina et al. (2018) evaluaron las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo como indicadores de calidad en tres sistemas de uso —bosque, sistema agroforestal (SAF) y pradera— establecidos en una terraza alta del Meta, Colombia. El SAF presentó una calidad química moderada, reflejada en pH ácido-moderado (5.30), aluminio intercambiable bajo (1.02 cmol/kg) y menores concentraciones de calcio y magnesio tanto en 0–10 cm (Ca: 1.49 cmol/kg; Mg: 0.49 cmol/kg) como en 10–20 cm (Ca: 0.71 cmol/kg; Mg: 0.21 cmol/kg). No obstante, registró los mayores valores de azufre (13.08 mg/kg) y zinc (0.70 mg/kg) en profundidad. En términos físicos, el SAF mostró baja calidad estructural, con densidades aparentes elevadas —1.34 g/cm<sup>3</sup> (0–10 cm) y 1.46 g/cm<sup>3</sup> (10–20 cm)— que indican compactación. Las variables biológicas no discriminaron marcadamente entre sistemas, aunque el bosque presentó mayor abundancia de actinomicetos y hongos micorrícicos arbusculares, asociados a una mayor capacidad de asimilación de fósforo. En conjunto, el estudio evidencia que los sistemas agroforestales presentan mejoras químicas específicas, pero requieren un mejor manejo para evitar la degradación física del suelo.

Alvarado et al. (2013) evaluaron el almacenamiento de carbono orgánico en suelos en tres sistemas de producción de café (*Coffea arabica L.*) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia: monocultivo, café con nogal cafetero (*Cordia alliodora*) y café con plátano. Se aplicó un diseño completamente al azar con cinco repeticiones por sistema. Los valores de densidad aparente oscilaron entre 0,83 y 0,92 g·cm<sup>3</sup>, siendo menor en el sistema con plátano. La concentración de carbono orgánico del suelo (COS) varió entre 1,2 y 3 %, mientras que el almacenamiento de COS en los primeros 30 cm de suelo se ubicó entre 33,6 y 72,3 t C·ha<sup>-1</sup>. No se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) entre los sistemas, aunque el monocultivo de café registró el mayor valor (53,3 t C·ha<sup>-1</sup>). Los autores concluyen que estos suelos volcánicos poseen alta capacidad de fijación de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático sin afectar las condiciones edáficas óptimas para el cultivo.

Moreno y Navorio (2004) evaluaron las propiedades físicas y químicas de los suelos en sistemas agroforestales de café bajo sombra en la zona del Pacífico de Nicaragua, evidenciando una marcada influencia del tipo de cobertura y del nivel de manejo sobre la fertilidad del suelo. Los autores reportaron que los sistemas con leguminosas presentaron mejores condiciones químicas, mostrando pH entre moderadamente y fuertemente

ácidos (5.71–5.50 en 0–5 cm) y mayores contenidos de materia orgánica (18.46–22.9%) en comparación con sistemas sin leguminosas. Asimismo, el nitrógeno total fue más alto en los sistemas con aporte orgánico (0.37–0.46%), mientras que en los sistemas sin leguminosas los valores fueron considerablemente menores (0.18–0.32%). El fósforo disponible mostró amplia variabilidad, alcanzando valores de hasta 67.67 ppm en sistemas con moderado manejo químico, frente a apenas 13.07 ppm en sistemas sin leguminosas y con manejo orgánico. Además, se observó que los suelos bajo sombra mantuvieron mejores condiciones físicas, con estructuras más estables y horizontes superficiales con mayor acumulación de materia orgánica en comparación con los sistemas a pleno sol. Estos resultados confirman la importancia de las especies acompañantes y del manejo integrado para la conservación de la fertilidad en sistemas cafetaleros.

### 2.2.2. Nivel nacional

En el caserío Cajatambo, Fernández (2024) evaluó las propiedades fisicoquímicas del suelo en tres sistemas de uso: agroforestal, excocal y bosque primario. La textura fue franco arcilloso en el agroforestal (24% arena, 35% limo, 31% arcilla) y bosque primario (31% arena, 36% limo, 34% arcilla), mientras que el excocal presentó textura arcillosa (27% arena, 50% limo, 23% arcilla). La densidad aparente indicó mayor compactación en el excocal (1.57–1.59 g/cm<sup>3</sup>), seguida del agroforestal (1.47–1.52 g/cm<sup>3</sup>) y menor en el bosque primario (1.43–1.48 g/cm<sup>3</sup>). El pH fue más ácido en el excocal (5.00–5.31) y más alto en el bosque primario (5.78–6.06). El nitrógeno disponible fue mayor en bosque primario (0.06–0.08%), intermedio en agroforestal (0.05–0.06%) y menor en excocal (0.04%). La materia orgánica siguió la misma tendencia, destacando el bosque primario (1.18–1.31%) frente al agroforestal (0.80–1.06%) y el excocal (0.73–0.76%). El fósforo disponible fue más alto en el sistema agroforestal (21.87–29.44 ppm), mientras que el potasio mostró valores elevados en el excocal (39.75–53.65 kg K<sub>2</sub>O/ha). La CIC fue similar entre sistemas (6.49–7.62 Cmol (+) /kg), indicando una capacidad media de retención de nutrientes.

La investigación de Santos (2023) cuantificó el carbono almacenado en tres sistemas de uso del suelo en el distrito de Uchiza, San Martín. Se estimó el carbono en el suelo, biomasa radicular, biomasa superficial y carbono total. El sistema agroforestal presentó el mayor almacenamiento de carbono en el suelo (26,09 t/ha), seguido por la pastura (20,11 t/ha) y la macorilla (14,36 t/ha). En biomasa radicular, agroforestal (7,58 t/ha) y macorilla (6,03 t/ha) superaron a pastura (3,38 t/ha). En biomasa herbácea, agroforestal (2,36 t/ha) y macorilla (1,90 t/ha) también fueron superiores a pastura (1,40 t/ha). El almacenamiento de carbono en la

hojarasca fue mayor en agroforestal (3,36 t/ha) y pastura (3,41 t/ha), mientras que macorilla tuvo el menor valor (2,56 t/ha). En conclusión, el sistema agroforestal mostró el mayor almacenamiento de carbono total (39,39 t/ha) en comparación con pastura (29,48 t/ha) y macorilla (24,85 t/ha).

Gómez (2022) evaluó el carbono almacenado en un sistema agroforestal de café-pino de 7 años en Anco, La Mar (Ayacucho), aplicando la metodología ICRAF (2009). Se establecieron cinco parcelas con densidades de 5000 plantas/ha de café y 278 árboles/ha de pino. El carbono total alcanzó 609,12 t C/ha, dominado por el carbono del suelo (438,29 t C/ha), seguido de la biomasa aérea (168,59 t C/ha) y la necromasa (0,76 t C/ha). Por parcelas, la mayor concentración se registró en la parcela 5 (162,44 t C/ha) y la menor en la parcela 4 (106,80 t C/ha). En biomasa aérea, los valores oscilaron entre 31,22 y 35,74 t C/ha, mientras que el suelo varió entre 74,10 y 126,41 t C/ha. Los autores destacan que el suelo es el componente dominante del almacenamiento de carbono en este tipo de SAF, representando más del 70 % del total, lo que confirma su relevancia para mejorar la capacidad de mitigación de estos sistemas.

Molina et al. (2021) evaluaron las propiedades físico-químicas del suelo bajo distintos usos y manejos en la región Altoandina de Pasto, encontrando diferencias marcadas asociadas al tipo de cobertura. La densidad aparente fue menor en el bosque secundario (0.61 g/cm<sup>3</sup>) y mayor en el sistema silvoagrícola con aliso (0.95 g/cm<sup>3</sup>). La textura fluctuó entre franco arenoso (T1 y T6) y franco arcillo arenoso (T5), con porcentajes de arcilla que variaron desde 4.84% (T6) hasta 35.46% (T3). El pH mostró suelos moderadamente ácidos, con valores de 5.21 a 5.99. La materia orgánica fue más alta en el bosque (16.99%) y más baja en sistemas intensivos como el monocultivo de papa (3.16%). El nitrógeno total siguió esta tendencia, destacando el bosque con 0.55% frente a valores de 0.12–0.23% en sistemas agrícolas. El fósforo disponible fue mayor en sistemas con manejo químico (22.2–22.5 mg/kg) y menor en pasturas y bosque ( $\leq$ 5.31 mg/kg), mientras que el potasio intercambiable osciló entre 0.62 y 1.23 cmol/kg. La CIC fue más alta en el bosque (53.43 cmol/kg) y más baja en el monocultivo y sistemas agroforestales (19.9–22.17 cmol/kg), evidenciando un mejor estatus de fertilidad en sistemas menos intervenidos.

Schwartzmann (2019) evaluó cambios en la calidad del suelo comparando un sistema agroforestal de 10 años y un pastizal degradado en Madre de Dios, encontrando mejoras significativas en las propiedades físicas y químicas del suelo bajo el sistema agroforestal. La textura fue franco-arcillosa en ambos sistemas, pero el SAF mostró mayor porosidad (47.8%) respecto al pastizal (41.6%) y menor densidad aparente (1.27 g/cm<sup>3</sup>

frente a 1.43 g/cm<sup>3</sup>), indicando mejor estructura. La humedad gravimétrica alcanzó 28.4% en el SAF y solo 19.7% en el pastizal. Químicamente, el SAF presentó mayor materia orgánica (3.12%) que el pastizal (1.04%), mayor fósforo disponible (9.87 ppm vs. 3.25 ppm) y potasio intercambiable (0.41 cmol(+)/kg frente a 0.18 cmol(+)/kg). Además, el pH fue ligeramente ácido en el SAF (5.8) pero extremadamente ácido en el pastizal (4.3), acompañado de menores contenidos de Ca<sup>2+</sup> (2.64 vs. 0.88 cmol (+) /kg) y Mg<sup>2+</sup> (1.12 vs. 0.37 cmol (+) /kg). Estos resultados evidencian la capacidad de los sistemas agroforestales para mejorar la fertilidad y estructura del suelo respecto a áreas degradadas.

Mondragón (2019) evaluó el carbono total almacenado en una plantación de *Theobroma cacao* L. en un sistema de monocultivo en condiciones de Ceja de Selva en el Centro Poblado de Santa Cruz, Distrito de Bellavista, Jaén. En una hectárea de cacaotal, se determinó que el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea fue de 22,68 t C/ha, en la necromasa fue de 13,6 t C/ha, y en el suelo fue de 17,73 t C/ha, con un total acumulado de 54,02 t C/ha. El flujo de fijación de carbono del sistema monocultivo se estimó en 6,04 t C/ha/año. Los datos fueron obtenidos utilizando diversas metodologías, incluyendo fórmulas alométricas para la biomasa aérea, la metodología ICRAF (2009) para la necromasa, y el método Walkley y Black para determinar el carbono fijado en el suelo.

Silva (2019) se centró en la cuantificación del carbono almacenado en un sistema agroforestal de café (*Coffea arabica* L.), asociado con guaba (*Inga edulis* sp.), en el distrito de Jaén, Cajamarca. Utilizando muestreo probabilístico aleatorio, se cuantificó el carbono almacenado en la biomasa aérea de los árboles de café y guaba mediante ecuaciones alométricas, el carbono en la necromasa (hojarasca) siguiendo la metodología ICRAF 2009, y el carbono fijado en el suelo mediante el método Walkley Black. Los resultados mostraron que el sistema agroforestal almacenó 22,80 t C/ha en la biomasa aérea, 6,34 t C/ha en la hojarasca y 104,13 t C/ha en el suelo. El total de carbono almacenado en el sistema agroforestal fue de 133,27 t C/ha.

Fasanando (2015) evaluó las propiedades físicas y químicas del suelo en cuatro sistemas de uso (agroforestal, bosque secundario, forestal y pastizal) en Cayena, San Martín, encontrando diferencias marcadas según el manejo. La textura fue franco arcilloso en todos los sistemas, con arena entre 33.68–37.68%, arcilla entre 33.04–37.04% y limo entre 27.28–31.28%. La densidad aparente fue menor en el bosque (1.26 g/cm<sup>3</sup>) y agroforestal (1.35 g/cm<sup>3</sup>), mientras el pastizal presentó compactación (2.02 g/cm<sup>3</sup>). En química del suelo, el pH osciló entre 6.25 (forestal) y 7.12 (bosque); la materia orgánica fue mayor en el pastizal (4.96%)

y menor en el agroforestal (2.63%). El N total varió entre 0.12–0.22%, el P disponible entre 9.21–20.15 ppm, y el K<sub>2</sub>O entre 99.97–291.67 kg/ha. La CIC fluctuó entre 15.24 y 17.19 Cmol(+)/kg, con los valores más altos en el pastizal. En general, los sistemas más intervenidos mostraron mayor MO y K<sub>2</sub>O, pero peor condición física, mientras los sistemas forestales conservaron mejores propiedades edáficas.

Larrea (2007) se centró en la determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de combinaciones agroforestales de *Theobroma cacao* L. y en la creación de una ecuación alométrica para estimar la biomasa de cacao en la región de San Martín, Perú. La investigación abarcó 7 sistemas de uso de la tierra en la provincia de Mariscal Cáceres, con cultivos de cacao de 3, 6 y 8 años. Se encontró que los sistemas agroforestales con especies forestales maderables y frutales presentaron la mayor acumulación de carbono en la biomasa aérea arbórea. Los flujos de fijación de carbono fluctuaron entre 0,99 y 8,02 tn C / ha / año. La ecuación alométrica desarrollada fue de Biomasa = 0.4849 Diámetro<sup>1.42</sup>, basada en 30 árboles de diferentes zonas con condiciones ambientales similares. El sistema más rentable fue el de cacao de 8 años con sombra de capirona, bolaina y caoba, con un ingreso anual aproximado de US\$ 150.33 por tn CO<sub>2</sub> / ha / año. La investigación aportó información clave para proyectos de comercialización de créditos de carbono bajo el Protocolo de Kioto.

Díaz (2020), realizó la estimación de la captura de carbono en dos sistemas agroforestales de café, el cual fue ejecutado en la provincia de Rioja, San Martín – Perú. El estudio comparó la captura de carbono (tC/ha) en biomasa aérea, necromasa y suelo de los sistemas agroforestales “pino chuncho + café” y “eucalipto torrellano + café” en Rioja, empleando la metodología del ICRAF (2009) y cinco parcelas por sistema. Para el sistema con eucalipto se registraron 61,642 tC/ha en biomasa aérea, 0,473 tC/ha en necromasa y 728,100 tC/ha en suelo; mientras que el sistema con pino presentó valores de 69,301 tC/ha, 1003 tC/ha y 1060,694 tC/ha, respectivamente. El análisis estadístico indicó diferencias significativas en necromasa y suelo, pero no en biomasa aérea. El sistema “pino chuncho + café” mostró mayor capacidad de captura de carbono, con una diferencia total de 340,78 tC/ha, explicada por su mayor DAP, necromasa acumulada y mayor contenido de materia orgánica en el suelo.

Nieto (2015) evaluó las propiedades químicas y el carbono orgánico del suelo (COS) en tres sistemas de uso de la tierra: café bajo sombra (CBS), café sin sombra (CSS) y un sistema silvopastoril (SSP), encontrando diferencias marcadas en la fertilidad edáfica. El sistema CBS presentó un pH moderadamente ácido (5.51), MO media (3.20%), N medio (0.15%), P disponible de 12.27 ppm y K<sub>2</sub>O alto (400.31 kg/ha). En CSS se registró pH

fuertemente ácido (5.33), MO de 2.66%, N de 0.12%, P de 12.65 ppm y K<sub>2</sub>O de 362.65 kg/ha. El SSP mostró la condición más degradada, con pH de 4.75, MO baja (1.57%), N bajo (0.09%), P medio (8.51 ppm) y K<sub>2</sub>O alto (297.03 kg/ha). El carbono orgánico almacenado fue mayor en CBS (81.30 t C/ha) y CSS (71.53 t C/ha), diferenciándose significativamente del SSP (40.42 t C/ha). Además, el COS presentó alta correlación con la MO y el N en CBS (0.96 y 0.95) y en CSS (0.99 en ambos casos), mientras que en SSP la MO mantuvo correlación alta (0.82) y el K<sub>2</sub>O mostró asociación moderada (0.55).

### **2.2.3. Nivel regional**

Clemente (2021) analizó la captura de carbono en sistemas agroforestales en el Perú, destacando su expansión en la Amazonía peruana, especialmente en cultivos de café y cacao. Los sistemas agroforestales se consideran una técnica beneficiosa tanto económica como ecológicamente, contribuyendo a la conservación del suelo, agua y biodiversidad. En cuanto al almacenamiento de carbono, se destacan los resultados de los estudios realizados en la región de Huánuco, donde un sistema agroforestal de cacao y otras especies forestales de más de 16 años mostró un stock de carbono de 344,24 Mg/ha, y en Loreto, un sistema agroforestal de castaña y otras especies presentó 288,98 Mg/ha. La investigación subraya la importancia de estandarizar las metodologías de estimación de carbono sobre y debajo del suelo para realizar comparaciones a gran escala. La autora concluye que los sistemas agroforestales representan una opción prometedora para el secuestro de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y evitando los efectos de la deforestación y el calentamiento global.

En el sector Cora Cora (Luyando), Huamán (2021) evaluó la calidad del suelo en tres sistemas de uso (agroforestal, coca y bosque) y encontró que la textura fue franco arcilloso en el sistema agroforestal y el bosque, y franco arcillo-limoso en el cultivo de coca; la densidad aparente se mantuvo en rangos adecuados para el crecimiento radicular, con valores cercanos a 1.14 g/cm<sup>3</sup> en el sistema agroforestal y coca, y alrededor de 1.00 g/cm<sup>3</sup> en el bosque. En cuanto a los indicadores químicos, el pH varió de fuertemente ácido a neutro, con valores aproximados de 6.97 en el sistema agroforestal, 4.60 en coca y 4.01 en bosque; la materia orgánica fue baja en los tres sistemas (1.68, 1.23 y 1.39 % respectivamente) y el nitrógeno total también se mantuvo en niveles bajos (0.08 % en el sistema agroforestal, 0.06 % en coca y 0.07 % en bosque). El fósforo disponible presentó valores reducidos, del orden de 6.56 ppm en el sistema agroforestal, 2.95 ppm en coca y 3.20 ppm en bosque, mientras que el potasio intercambiable se situó alrededor de 83.71 ppm en el sistema agroforestal, 68.82 ppm en coca

y 62.07 ppm en bosque, evidenciando en conjunto una fertilidad química limitada en los tres usos del suelo.

Zavala et al. (2018) determinaron la cantidad de biomasa y su contenido de carbono almacenado en un sistema agroforestal de café (*Coffea arabica*) en el cafetal de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Se estimaron la captura de carbono en diferentes componentes del sistema de uso de la tierra y el almacenamiento de carbono en un suelo *Inceptisols*. El trabajo se dividió en dos fases: campo y laboratorio. En el cafetal de 5 hectáreas, se evaluó la biomasa aérea de los árboles vivos (148,10 t/ha), la biomasa del café (51,39 t/ha), la biomasa de hojarasca (12,49 t/ha), y la biomasa arbustiva (7,45 t/ha), sumando un total de 219,43 t/ha de biomasa en el sistema agroforestal (SAF) con café. En cuanto al carbono almacenado, la biomasa del café almacenó 8,42 t C/ha, los arbustos 0,95 t C/ha, la hojarasca 1,90 t C/ha, el componente arbóreo 25,17 t C/ha, y el suelo 148,24 t C/ha, con un total de 184,68 t C/ha de carbono almacenado en el SAF con café. El componente de mayor captura de carbono fue el suelo, con 148,24 t C/ha, y el de menor captura fue el componente arbustivo, con 0,95 t C/ha. Los resultados sugieren que la edad del cultivo de café influye en el secuestro y almacenamiento de carbono.

En un estudio realizado por Rengifo (2017) en la estación experimental Tulumayo de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, se evaluaron los sistemas agroforestales y forestales para estimar el volumen de carbono almacenado en el suelo y en la hojarasca. Los resultados mostraron que los sistemas agroforestales almacenaron el mayor volumen de carbono en hojarasca, con un valor de 317,51 t/ha, mientras que los sistemas forestales acumularon 167,19 t/ha. En cuanto al carbono en el suelo, los sistemas forestales mostraron un mayor almacenamiento, con 67,29 t/ha, en comparación con los sistemas agroforestales, que acumularon 51,09 t/ha. Esto indica que, aunque los sistemas agroforestales tienen un mayor almacenamiento en hojarasca, los sistemas forestales son más efectivos en la acumulación de carbono en el suelo.

Pocomucha et al. (2016) realizaron un estudio sobre los sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao L.*) en el distrito de José Crespo y Castillo, Huánuco, Perú. Los resultados mostraron que el contenido total de carbono acumulado en los cacaotales fue de 131,18 t C/ha, distribuido entre 65,61 t C/ha en biomasa aérea y 65,57 t C/ha en el componente suelo. Estos sistemas de cacao tienen un dosel de sombra simple con un promedio de cuatro especies y 69 árboles/ha. A pesar de su potencial para el almacenamiento de carbono, el manejo de las parcelas es mayormente de subsistencia, con bajos rendimientos de cacao de

489 kg/ha. Desde una perspectiva social, los productores mostraron actitudes positivas hacia el sistema agroforestal con una alta intención de continuidad (72%), aunque no reciben beneficios directos por servicios ambientales, solo obtienen frutos, semillas, madera y leña.

Jara (2016) estudió el almacenamiento de carbono en el suelo en dos tipos de sistemas agroforestales (SAF) en Hermilio Valdizán, Huánuco, Perú. El sistema agroforestal de cacao, compuesto por cacao (*Theobroma cacao L.*) y guaba (*Inga sp.*), almacenó 75,899 t C/ha en total, mientras que el sistema agroforestal de café, compuesto por café (*Coffea arabica L.*), guaba (*Inga sp.*) y moena amarilla (*Aniba amazónica Meiz*), almacenó 6,189 t C/ha. La investigación utilizó la metodología recomendada por el Centro Mundial de Agroforestería (ICRAF, 2009) para evaluar la biomasa del suelo, las raíces y la hojarasca. Los resultados sugieren que la mayor cantidad de carbono almacenado en el sistema agroforestal de cacao se debe a las características del suelo y las especies presentes en el sistema, aunque estos valores pueden ser modificados por cambios en el uso y manejo del suelo.

### **III. MATERIALES Y METODOS**

#### **3.1. Lugar de ejecución**

##### **3.1.1. Ubicación política**

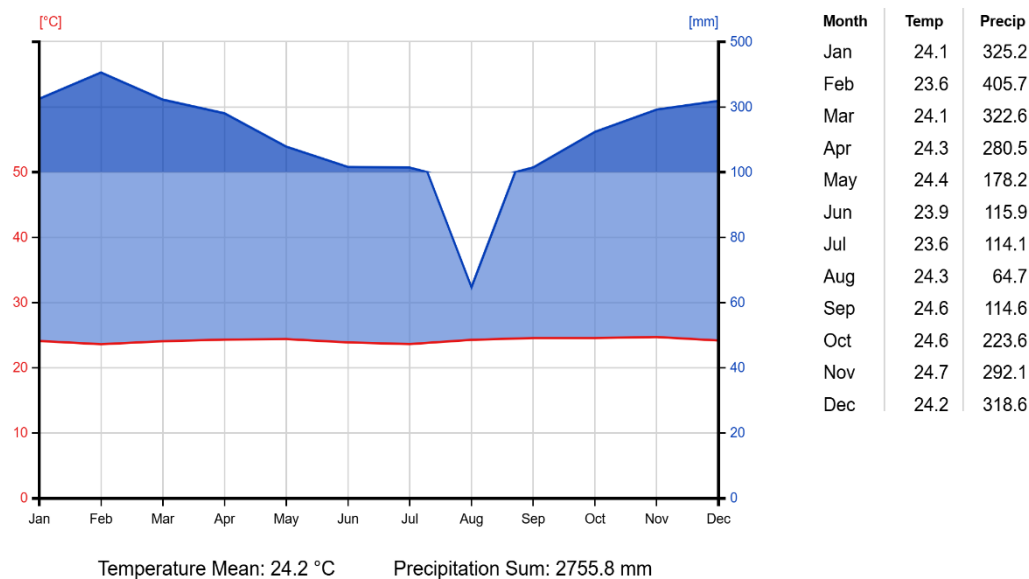
El estudio se desarrolló en dos sistemas agroforestales ubicados en el distrito de Luyando, provincia de Leoncio Prado (Huánuco), representativos de la selva alta peruana: uno asociado con *Guazuma crinita* y otro con *Schizolobium amazonicum*, ambos establecidos bajo condiciones de manejo agroforestal diferenciadas. Las muestras de suelo fueron trasladadas al Laboratorio de Análisis de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS),

##### **3.1.2. Ubicación geográfica**

Las parcelas de investigación fueron georreferenciadas, correspondiendo la primera parcela al sistema agroforestal con bolaina blanca, ubicada en las coordenadas UTM 399156 E / 8975880S (WGS84) y a una altitud de 726 m s. n. m.; mientras que la segunda parcela, correspondiente al sistema agroforestal con pino chuncho, se localizó en las coordenadas UTM 403635 E / 8973576 S (WGS84) y a una altitud de 755 m s. n. m.

##### **3.1.3. Condiciones climáticas**

La zona de estudio presenta un clima cálido muy húmedo, clasificado como Af según el sistema de Köppen modificado. El régimen pluviométrico anual varía entre 2000 y 3500 mm, concentrándose entre el 70 y 80% de las precipitaciones en los meses de noviembre a marzo, lo que genera una marcada estacionalidad en la humedad del suelo. Las temperaturas se mantienen relativamente estables a lo largo del año, con promedios máximos entre 25 y 29 °C y mínimos entre 17 y 21 °C, de acuerdo con los registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2020). Según la clasificación de zonas de vida del SENAMHI (2017), basada en el sistema de Holdridge (1967), el área corresponde a un Bosque Muy Húmedo Premontano Tropical (bmh-PT). Estas condiciones climáticas, caracterizadas por una alta humedad ambiental y estabilidad térmica anual, influyen significativamente en los procesos biogeoquímicos del suelo y, en particular, en la dinámica y conservación del carbono orgánico en sistemas agroforestales.



**Figura 2.** Temperatura y precipitación en el distrito de Luyando

### 3.2. Materiales, herramientas y equipos

Para la medición del carbono en la biomasa aérea se emplearon un telémetro digital Forestry Pro II y una cinta diamétrica para registrar la altura total y el diámetro a la altura del pecho (DAP) de las especies evaluadas. Asimismo, se utilizaron un GPS, una estufa, y una balanza analítica. Para las actividades de medición y delimitación se dispuso de una wincha de 50 m, dos machetes, jalones o estacas, rafia, dos cintas métricas, libreta de campo, lapiceros, plumones indelebles, marcos de madera (1 m × 1 m y 0,5 m × 0,5 m), 100 bolsas plásticas (18 × 26 cm), costales de polietileno de 50 kg, 100 bolsas de polipropileno de 1 kg y sobres mamila.

En las actividades de campo se utilizaron estacas de madera, martillo, machete, pala recta, flexómetro, wincha, cilindros de volumen conocido, bolsas plásticas y de papel, costales, etiquetas, engrapador y marcadores.

### 3.3. Metodología

#### 3.3.1. Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada con enfoque cuantitativo, ya que busca generar conocimientos útiles para la gestión y manejo sostenible de sistemas agroforestales, particularmente en lo relacionado con el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea y el suelo, así como en los indicadores fisicoquímicos que reflejan el estado del recurso edáfico. Según el tiempo de ocurrencia de los hechos, el estudio es de tipo transversal, dado que las mediciones del carbono y las propiedades del suelo se realizarán en un solo

momento, permitiendo establecer relaciones entre las variables en un punto específico en el tiempo.

Sustentado por Hernández et al. (2014) quien manifiesta que la investigación aplicada es la que busca resolver problemas concretos o mejorar prácticas, utiliza teorías existentes para aplicar el conocimiento científico en un contexto real y orientar la toma de decisiones.

### **3.3.2. Nivel de investigación**

El nivel de investigación es descriptivo–correlacional, ya que busca caracterizar el contenido de carbono en la biomasa aérea y en el suelo, así como las propiedades fisicoquímicas del suelo en sistemas agroforestales. Al mismo tiempo, pretende establecer la relación existente entre estas variables, permitiendo comprender cómo el almacenamiento de carbono se vincula con los indicadores de calidad del suelo. Este enfoque contribuye a identificar patrones que puedan ser útiles para el manejo ambiental sostenible en el distrito de Luyando.

Este apartado de sustenta en Hernández et al. (2014) donde manifiesta que los estudios descriptivos son útiles para analizar cómo es y cómo se manifiesta un fenómeno y sus componentes; y los estudios correlacionales pretenden determinar cómo se relacionan o vinculan diversos conceptos, variables o características entre sí o, también, si no se relacionan.

### **3.3.3. Diseño de investigación**

El diseño de la investigación fue no experimental, transversal o transeccional y correlacional-comparativo. Fue no experimental porque no se manipularon deliberadamente las variables de estudio, sino que se observaron y analizaron tal como se presentaron en su contexto natural. Asimismo, fue transversal, debido a que la recolección de datos se realizó en un solo momento del tiempo, evaluando el carbono en biomasa vegetal, el carbono orgánico del suelo y las propiedades fisicoquímicas del suelo en los sistemas agroforestales seleccionados.

De acuerdo con Hernández et al. (2014), los diseños no experimentales se caracterizan por observar los fenómenos sin manipular variables, mientras que los diseños transeccionales o transversales recopilan datos en un momento único, con el propósito de describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento determinado. En ese sentido, el estudio permitió comparar los sistemas agroforestales cacao + pino chuncho y cacao

+ bolaina blanca, así como analizar la relación entre el carbono almacenado y los indicadores fisicoquímicos del suelo.

### **3.3.4. Población y muestra**

#### **3.3.4.1. Descripción de la población**

La población de estudio estuvo conformada por dos sistemas agroforestales establecidos en el distrito de Luyando, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco. La primera parcela correspondió a un sistema agroforestal de 2 hectáreas, mientras que la segunda abarcó 1.5 hectáreas, ambas manejadas bajo prácticas agroforestales locales. Estos sistemas constituyeron las unidades productivas donde se evaluó el carbono almacenado en la biomasa aérea y en el suelo, así como los indicadores fisicoquímicos del suelo, con el propósito de generar información relevante para el manejo sostenible de los sistemas agroforestales de la zona.

#### **3.3.4.2. Muestra y método de muestreo**

La muestra estuvo constituida por 10 subparcelas rectangulares de 4 m × 25 m (100 m<sup>2</sup>) cada una, distribuidas en los dos sistemas agroforestales evaluados. En la parcela de 2 ha se delimitaron 5 subparcelas y en la parcela de 1.5 ha otras 5 subparcelas, las cuales sirvieron como unidades de muestreo para el registro de la biomasa aérea y la toma de muestras de suelo, así como para la evaluación de los indicadores fisicoquímicos. En conjunto, el área muestreada fue de 1 000 m<sup>2</sup> (0.1 ha) entre ambos sistemas agroforestales.

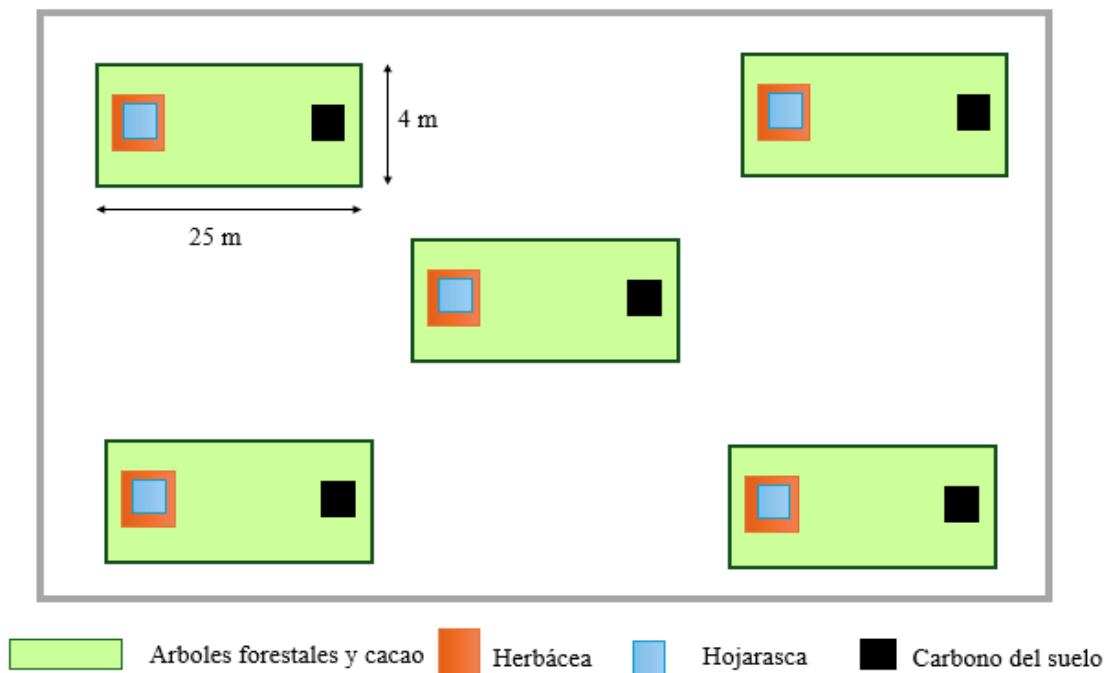
La selección de las parcelas y subparcelas respondió a un muestreo no probabilístico de tipo intencional, dado que se eligieron sistemas agroforestales representativos de las condiciones de manejo predominantes en Luyando y, dentro de ellos, se delimitaron subparcelas en lugares considerados característicos de la estructura y estado del sistema. Este esquema permitió captar la variabilidad interna de cada sistema agroforestal en términos de carbono en biomasa y suelo, así como de las propiedades fisicoquímicas del suelo.

Sustentado en Hernández et al. (2014) quien manifiesta La muestra es, en esencia, un *subgrupo de la población*. Digamos que es un subconjunto de elementos que pertenecen a ese conjunto definido en sus características al que llamamos población

### **3.3.5. Estimación del carbono en la biomasa vegetal de sistemas agroforestales**

El estudio se desarrolló en sistemas agroforestales en los cuales se evaluó

el carbono almacenado en la biomasa aérea, el contenido de carbono orgánico en el suelo y las propiedades químicas del mismo. Para ello, se realizó un reconocimiento preliminar del área de estudio con el fin de identificar y seleccionar las parcelas experimentales. Posteriormente, se establecieron subparcelas rectangulares de 4 m × 25 m (Figura 1), distribuidas estratégicamente para garantizar la representatividad de las condiciones de los sistemas agroforestales evaluados.



**Figura 3.** Esquema de subparcelas para la evaluación del crecimiento y carbono orgánico del suelo.

### 3.3.5.1. Para el cacao

En el cultivo de cacao se registró el diámetro del tallo a 30 cm de altura desde la base del suelo. Para estimar la biomasa, se empleó la ecuación propuesta por Larrea (2007), cuya fórmula es:  $Biomasa = 0.4849 \times \text{Diámetro}^{1.42}$ . Este modelo fue aplicado debido a que el cacao presenta un comportamiento fisiológico distinto al de las especies arbóreas tradicionales, lo que requiere el uso de ecuaciones alométricas específicas para estimar de manera adecuada su biomasa.

### 3.3.5.2. Biomasa arbórea

Para la estimación del carbono en la biomasa vegetal total, se tomaron en cuenta subparcelas seleccionadas de manera intencional dentro de la plantación, procurando representar adecuadamente las condiciones de la población. Para ello, se

establecieron transectos de 4 m × 25 m, siguiendo la metodología propuesta por el Centro Internacional de Investigación en Agroforestería (ICRAF), en los cuales se realizó la cuantificación de la biomasa arbórea (Figura 3).

Para la estimación de la biomasa arbórea de las especies forestales se utilizó el modelo alométrico propuesto por Chave et al. (2015), el cual incorpora la densidad básica de la madera como una variable esencial en el cálculo. La densidad básica fue obtenida a partir de bases de datos especializadas disponibles en línea, debido a que no fue posible extraer muestras directas sin ocasionar daño a los árboles. La medición del diámetro se realizó a 1.30 m desde la base del suelo empleando una cinta diamétrica, mientras que la altura total de los árboles se estimó mediante un telémetro con alcance de 100 m.

$$BA \text{ (kg/árbol)} = 0.0673 \times (\delta \times DAP^2 \times H)^{0.976}$$

Donde:

BA : Biomasa arbórea (kg /árbol)

$\delta$  : Densidad de la madera

DAP : Diámetro altura del pecho

H : Altura del árbol

Para calcular la cantidad de biomasa total en la parcela (BTA), se sumó la biomasa arbórea (BA) estimada para los individuos forestales. El promedio obtenido se empleó posteriormente en la fórmula correspondiente para determinar la biomasa arbórea total por hectárea.

$$BAVT \text{ (kg.)} = BA_1 + BA_2 + \dots + BA_n$$

Dónde:

BAVT = Biomasa de árboles vivos en kg

BA = Biomasa de árboles

Con el fin de inferir la biomasa expresada en toneladas por hectárea (t/ha), se utilizó el siguiente procedimiento:

$$BAVT \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = ((BAVT \text{ (kg)} / 1000 \text{ kg}) * 10000 \text{ m}^2) / 100\text{m}^2$$

$$BAVT \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = BTA \text{V} * 0.1$$

Dónde:

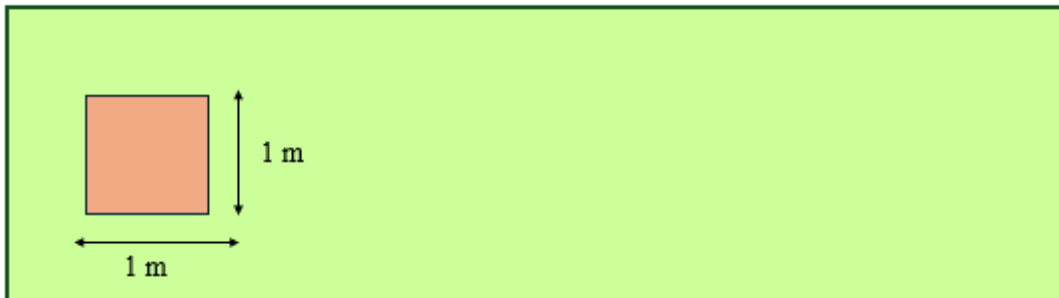
BAVT = Biomasa de árboles vivos en  $t\ ha^{-1}$

BTVA = Biomasa total de la parcela

0.1 = Factor de conversión de la parcela 4 x 25m

### 3.3.5.3. Biomasa herbácea

Para la biomasa herbácea se consideró la biomasa epigea compuesta por arbustos con diámetros menores a 2.5 cm, gramíneas y otras hierbas. Para su evaluación se utilizaron cuadrantes de 1 m × 1 m, distribuidos aleatoriamente dentro de los transectos de 4 m × 25 m. En cada cuadrante se retiró toda la vegetación presente sobre el suelo, la cual fue pesada en fresco y colocada en bolsas de papel. Posteriormente, las muestras fueron llevadas a una estufa de aire caliente a 75 °C durante 24 horas, hasta obtener un peso seco constante.



**Figura 4.** Cuadrante de 1 x 1 m para biomasa herbácea

Para el cálculo de la biomasa herbácea será con la siguiente expresión:

$$BAH (t\ ha^{-1}) = [ (PSM/ PFM) \times PFT ] \times 0.01$$

Dónde:

BAH = Biomasa arbustiva 1 herbácea, materia seca ( $t\ ha^{-1}$ )

PSM = Peso seco de la muestra colectada (g)

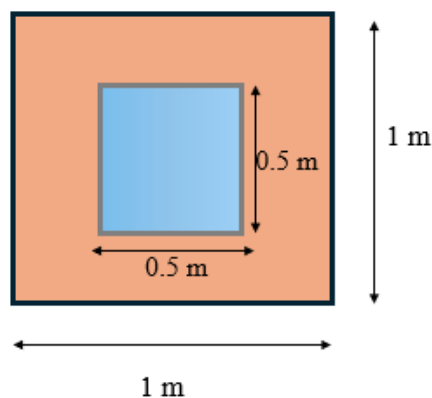
PFM = Peso fresco de la muestra colectada (g)

PFT = Peso total por metro cuadrado (g)

0.01 = Factor de conversión cuando es de 1 m x 1m

### 3.3.5.4. Biomasa de hojarasca

Para determinar la biomasa seca, se utilizaron cuadros de madera de 0.5 m × 0.5 m, los cuales fueron colocados dentro de los transectos, luego se evaluó la fracción superficial compuesta por hojarasca y otros elementos no vivos, como ramillas y pequeños fragmentos de ramas (Figura 5). La hojarasca recolectada se colocó en sobres de papel y se registró su peso fresco correspondiente a 0.25 m<sup>2</sup>. Posteriormente, se tomó una submuestra, se registró su peso fresco y se secó en una estufa de aire caliente a 75 °C, hasta obtener un peso seco constante.



**Figura 5.** Cuadrante de 0.5 m x 0.5 m para biomasa de hojarasca

Para el cálculo de la biomasa de hojarasca, se empleó la siguiente fórmula:

$$\text{BAH (t ha}^{-1}\text{)} = [ (\text{PSM} / \text{PFM}) \times \text{PFT} ] \times 0.01$$

Dónde:

BAH = Biomasa arbustiva 1 herbácea, materia seca (t ha<sup>-1</sup>)

PSM = Peso seco de la muestra colectada (g)

PFM = Peso fresco de la muestra colectada (g)

PFT = Peso total por metro cuadrado (g)

0.01 = Factor de conversión cuando es de 1 m x 1m

### 3.3.5.5. Carbono en la biomasa total

Para obtener la biomasa vegetal total en el sistema agroforestal, se sumó la biomasa arbórea, la biomasa herbácea y la biomasa de hojarasca.

$$\text{BVT (t ha}^{-1}\text{)} = (\text{BAVT} + \text{BAH} + \text{Bh})$$

Dónde:

- BVT = Biomasa vegetal total  
 BA VT = Biomasa total de árboles vivos  
 BAH = Biomasa arbustiva y herbácea  
 Bh = Biomasa de la hojarasca

Para determinar el carbono contenido en la biomasa vegetal total, se multiplicó la biomasa estimada por un factor de conversión, considerando que dicha constante fue establecida por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2000). Para este cálculo, se empleó la siguiente ecuación:

$$CBV \text{ (t/ha)} = BVT \times 0.5$$

Donde:

- CBV = Carbono en la biomasa vegetal  
 BVf = Biomasa vegetal total  
 0.5 = Constante (proporción de carbono, asumido por convención)

### **3.3.6. Estimación del carbono orgánico del suelo en sistemas agroforestales**

En cada parcela del sistema agroforestal se seleccionaron al azar las subparcelas, tal como se muestra en la figura correspondiente. En cada extremo de dichas subparcelas se tomaron muestras de suelo, dividiéndolas en tres niveles: 0–10 cm, 10–20 cm y 20–30 cm. La obtención de las muestras se realizó utilizando un tubo de volumen conocido, cuya inserción en el suelo se facilitó mediante el uso de un martillo y una pequeña tabla de apoyo. En total, se recolectaron tres muestras por subparcela, las cuales fueron mezcladas homogéneamente para conformar una muestra compuesta. Posteriormente, aproximadamente 500 g de esta muestra compuesta se almacenaron en bolsas de papel y fueron trasladados al laboratorio para su respectivo análisis.

Para determinar el contenido de carbono orgánico en el suelo, inicialmente se estimó la densidad aparente en cada una de las profundidades establecidas, aplicando el mismo protocolo de muestreo descrito anteriormente. Posteriormente, las muestras fueron deshidratadas en una estufa a 105 °C hasta alcanzar un peso constante, siguiendo la metodología propuesta por Rognitz et al. (2009). Finalmente, el análisis del carbono orgánico

se efectuó mediante técnicas convencionales, empleándose el método de Walkley-Black o el método de combustión seca, según la disponibilidad de equipos en el laboratorio.

**a) Cálculo de la densidad del suelo, el peso y volumen**

El carbono orgánico del suelo se determinó siguiendo la metodología propuesta por Rognitz et al. (2009), la cual incluyó el cálculo de la densidad aparente, el secado de las muestras a 105 °C hasta alcanzar un peso constante y la aplicación del método de Walkley-Black o de combustión seca, según la disponibilidad de equipamiento en el laboratorio.

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

Donde:

DA : Densidad aparente (g/cc)

PSN : Peso seco del suelo dentro del cilindro

VCH : Volumen del cilindro (constante)

Para estimar la masa del volumen de suelo en cada horizonte de muestreo, se aplicó la ecuación correspondiente.

$$PVs \text{ (t/ha)} = DA \times Ps \times 0.01$$

Donde

PV = Peso del volumen del suelo (t/ha)

DA = Densidad aparente

Ps = Espesor o profundidad del horizonte del suelo

0.01 = Constante

**b) Cantidad de carbono orgánico almacenado en el suelo**

Para determinar el carbono almacenado en el suelo, se empleó el método de Walkley y Black, mediante el cual se obtuvo el porcentaje de materia orgánica (%MO) a partir del análisis de laboratorio. Con estos valores, la cantidad de carbono almacenado en el suelo se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$CS \text{ (t/ha)} = (PVs \times \%C)/100$$

Donde:

CS : Carbono en el suelo (t/ha)

PVs : Peso del volumen del suelo

%C : Factor de conversión

### 3.3.7. Indicadores fisicoquímicos de suelos de sistemas agroforestales

#### a) Propiedades físicas

Esto se realizó de forma aleatoria dentro de las subparcelas establecidas. Se tomaron muestras durante la ejecución en campo y, posteriormente, las evaluaciones se efectuaron en los laboratorios correspondientes.

#### b) Textura

Se tomaron muestras de suelo de forma aleatoria en la parcela instalada con especies forestales y agrícolas. Estas muestras fueron enviadas al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS) para su respectivo análisis físico.

#### c) Densidad aparente

Considerando lo mencionado por Flores y Alcalá (2010), se tomaron muestras de suelo de manera aleatoria con el fin de obtener una muestra significativa y representativa. Para ello, se empleó un cilindro muestreador con el cual se extrajeron muestras en sentido vertical y horizontal, procurando no compactar el suelo durante el proceso. Una vez obtenidas, las muestras fueron colocadas en bolsas herméticas y trasladadas al laboratorio para su respectivo pesaje. Posteriormente, fueron sometidas a una estufa a 110 °C durante un periodo de 24 horas, hasta alcanzar un peso constante. Con estos datos, se determinó la humedad existente y el volumen del suelo muestreado.

$$Vt = \frac{D^2\pi}{4} h \quad Db = \frac{Pss}{Vt}$$

Donde:

Vt : es el volumen de la muestra.

D : es el diámetro del cilindro.

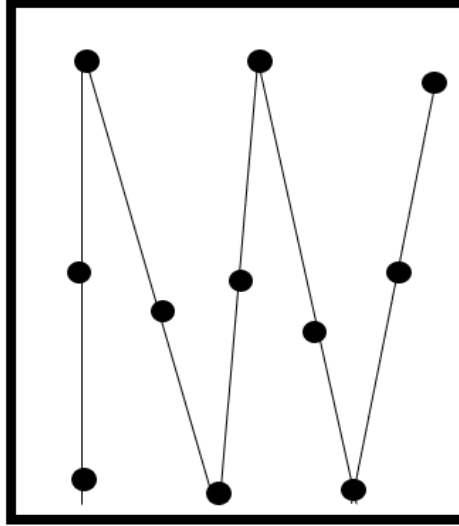
H : es la altura del cilindro.

Pss : es el peso del suelo seco.

Db : es la densidad aparente del suelo.

### 3.3.2.1. Propiedades químicas

La toma de muestras para el análisis químico se realizará siguiendo un patrón de distribución en zigzag, empleando un tubo muestreador para garantizar la representatividad del área de estudio.



**Figura 6.** Diagrama de toma de muestras para análisis químico

Posteriormente, los tubos muestreadores se introdujeron hasta una profundidad de 30 cm. Al finalizar la toma de muestras, el suelo recolectado fue uniformizado u homogenizado, obteniéndose aproximadamente 500 g por subparcela. Estas muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la UNAS para su respectivo análisis químico.

**Tabla 1.** Propiedades químicas del suelo

Indicadores químicos	Método
pH	Método del potenciómetro
Materia orgánica	Método de Walkley y Blakc
Nitrógeno total	Método de Kjeldahl
Fósforo disponible	Método de Olsen Modificado
Potasio disponible	Método del Ácido sulfúrico 6N
Bases cambiables	Método del versenato

### 3.3.8. Correlación del carbono almacenado con los indicadores fisicoquímicos

Para analizar la relación entre el carbono almacenado en la biomasa aérea y en el suelo con los indicadores físicos y químicos del suelo en los sistemas agroforestales de Luyando, se evaluó si existía una correlación significativa entre estas variables, reconociendo que pueden presentarse tendencias asociadas a las características del sistema. Para ello, se calculó la correlación entre las variables involucradas empleando la siguiente fórmula:

$$r_{x,y} = r_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum[(X - \mu_x)(Y - \mu_y)]}{\sigma_x \sigma_y}$$

Donde:

$\sigma_{xy}$  = Covarianza de (X, Y)

$\sigma_x$  = Desviación típica de X

$\sigma_y$  = Desviación típica de Y

El análisis se llevó a cabo mediante una prueba estadística orientada a evaluar la relación entre el carbono almacenado y los indicadores físicos y químicos del suelo, variables que fueron medidas en niveles de intervalo o razón. Se examinó cómo estas variables se relacionaban dentro del sistema agroforestal, con el propósito de identificar posibles asociaciones significativas entre ellas.

Previo a la aplicación de la prueba estadística, se verificó el supuesto de normalidad de los datos mediante el test de Shapiro-Wilk modificado. En caso de que los datos presentaran una distribución normal, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ), cuyo valor puede variar entre  $-1.00$  y  $+1.00$ , donde:

$-1.00$  = correlación negativa perfecta. (“A mayor X, menor Y”, de manera proporcional. Es decir, cada vez que X aumenta una unidad, Y disminuye siempre una cantidad constante). Esto también se aplica “a menor X, mayor Y”.

$-0.90$  = Correlación negativa muy fuerte.

$-0.75$  = Correlación negativa considerable.

$-0.50$  = Correlación negativa media.

$-0.25$  = Correlación negativa débil.

- 0.10 = Correlación negativa muy débil.
- 0.00 = No existe correlación alguna entre las variables.
- +0.10 = Correlación positiva muy débil.
- +0.25 = Correlación positiva débil.
- +0.50 = Correlación positiva media.
- +0.75 = Correlación positiva considerable.
- +0.90 = Correlación positiva muy fuerte.
- +1.00 = Correlación positiva perfecta. (“A mayor X, mayor Y” o “a menor X, menor Y”, de manera proporcional. Cada vez que X aumenta, Y aumenta siempre una cantidad constante).

El signo del coeficiente indicó la dirección de la correlación (positiva o negativa), mientras que el valor numérico reflejó la magnitud de dicha relación. Este análisis se realizó utilizando el programa estadístico InfoStat, mediante el cual se evaluó si el coeficiente obtenido resultaba o no estadísticamente significativo.

$r = 0.7831$  (valor del coeficiente)

P-valor = 0.001 (significancia)

N = 56 (número de casos correlacionados)

En cuanto al  $p$ -valor, si este fue menor a 0.05, el coeficiente se consideró significativo con un nivel de confianza del 95%. Por el contrario, cuando el  $p$ -valor fue inferior a 0.01, el coeficiente se interpretó como significativo al nivel de 0.01, lo que implicó un 99% de confianza en que la correlación era real y únicamente un 1% de probabilidad de error.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Carbono almacenado en la biomasa aérea en sistemas agroforestales

Los resultados obtenidos muestran diferencias claras en la biomasa aérea y en el carbono total almacenado entre los dos sistemas agroforestales evaluados. En el sistema agroforestal cacao + pino chuncho, la biomasa arbórea alcanzó una media de 239.42 t/ha, valor considerablemente superior al registrado en el sistema cacao + bolaina blanca, donde la media fue de 151.48 t/ha. Esta diferencia refleja el mayor porte, volumen y tasa de crecimiento del pino chuncho, una especie forestal de rápido desarrollo que genera un dosel más alto y denso, lo cual incrementa significativamente la acumulación de biomasa. El coeficiente de variación en este componente (34.01% en pino chuncho y 29.46% en bolaina blanca) evidencia una variabilidad moderada entre transectos, esperada en sistemas agroforestales donde la distribución de los árboles y su estado de desarrollo es heterogénea.

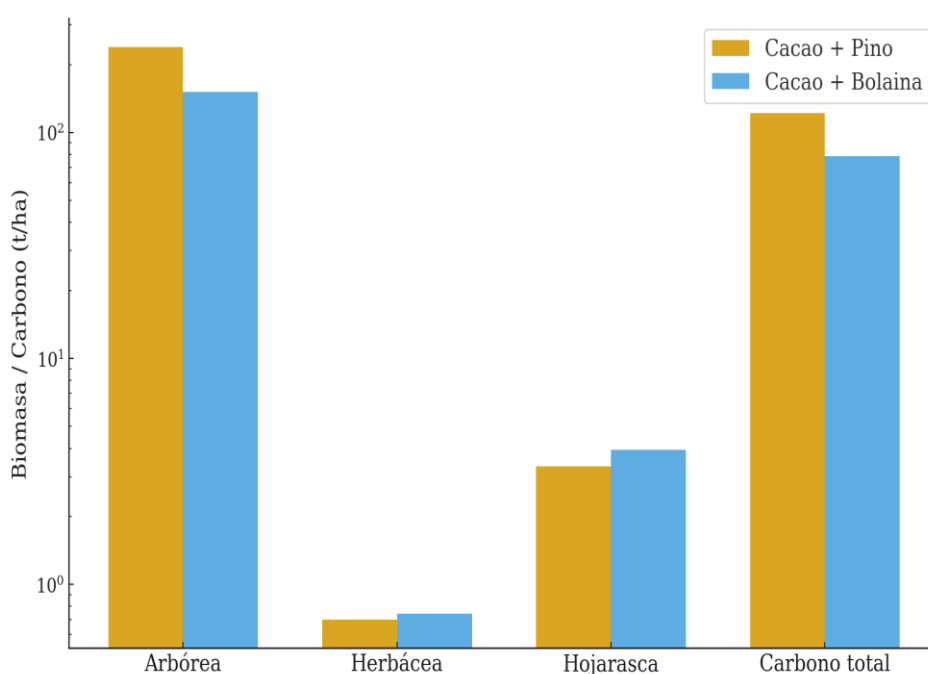
**Tabla 2.** Biomasa y carbono en la biomasa aérea

Sistema Agroforestal	Componente	Media	DE	Mín	Máx	CV (%)
Cacao + pino chuncho	Arbórea	239.42	81.46	152.84	355.38	34.01
	Herbácea	0.7	0.08	0.59	0.78	11.43
	Hojarasca	3.34	0.71	2.2	4	21.26
	Carbono total (t/ha)	121.73	40.84	77.88	179.69	33.55
Cacao + bolaina blanca	Arbórea	151.48	44.64	93.74	216.17	29.46
	Herbácea	0.74	0.21	0.63	1.12	28.38
	Hojarasca	3.94	0.84	2.64	4.72	21.32
	Carbono total (t/ha)	78.48	22.17	49.34	110.2	28.26

En relación con la biomasa herbácea, ambos sistemas mostraron valores bajos, inferiores a 1 t/ha, aunque ligeramente mayores en el sistema cacao + bolaina blanca (0.74 t/ha) respecto al sistema con pino chuncho (0.70 t/ha). Este comportamiento puede estar asociado a la diferencia en la estructura de copa de ambas especies forestales: la bolaina blanca presenta un dosel más abierto que permite mayor entrada de luz, favoreciendo el crecimiento de hierbas y gramíneas. No obstante, la variabilidad fue mayor en bolaina blanca (CV = 28.38%), lo que sugiere que este componente responde de forma más sensible a condiciones microambientales específicas, como luminosidad, humedad y cobertura de suelo.

Respecto a la biomasa de hojarasca, se observó una mayor acumulación en el sistema cacao + bolaina blanca (3.94 t/ha) en comparación con el sistema cacao + pino chuncho (3.34 t/ha). Esto coincide con las características fisiológicas de la bolaina blanca, una especie de hoja más delgada y con mayores tasas de recambio foliar. Los coeficientes de variación, cercanos al 21% en ambos sistemas, indican una variabilidad moderada y relativamente uniforme entre transectos, lo que sugiere que la dinámica de deposición de hojarasca es estable dentro de cada tipo de sistema.

Finalmente, el carbono total almacenado en la biomasa aérea demuestra la mayor eficiencia del sistema cacao + pino chuncho para la captura de carbono atmosférico. En este sistema, el carbono total promedio fue de 121.73 t/ha, mientras que en el sistema cacao + bolaina blanca el valor fue de 78.48 t/ha. Esta diferencia de 43.25 t/ha representa aproximadamente un 55% más de carbono almacenado en el sistema con pino chuncho, lo cual está directamente relacionado con la mayor biomasa arbórea registrada. El coeficiente de variación del carbono total fue de 33.55% en pino chuncho y 28.26% en bolaina blanca, reflejando la heterogeneidad estructural propia de los sistemas agroforestales donde coexisten árboles de diferentes edades, tamaños y distribuciones espaciales.



**Figura 7.** Biomasa y carbono en la biomasa vegetal

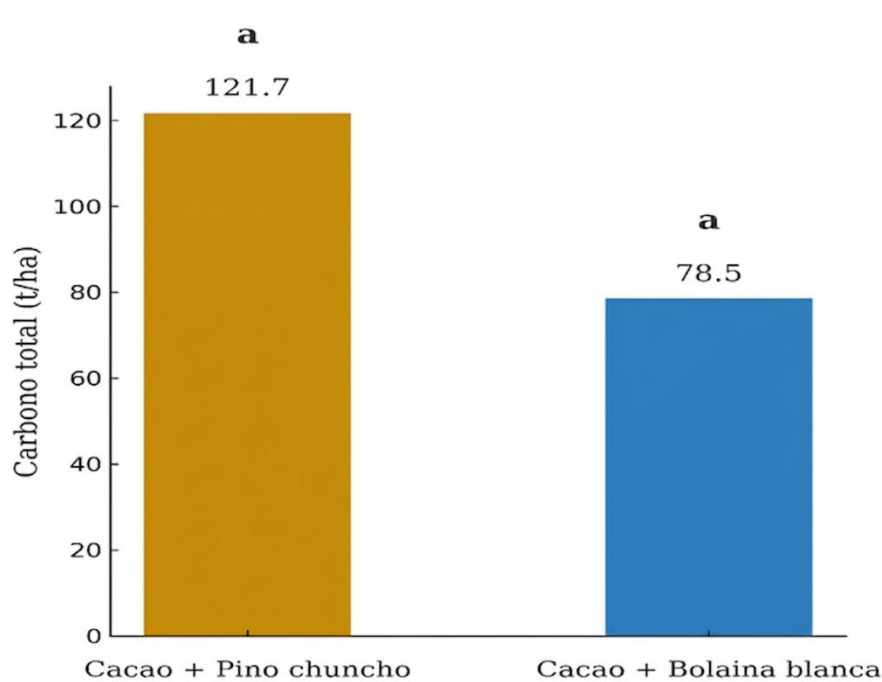
En conjunto, los resultados indican que el sistema cacao + pino chuncho es más eficiente para acumular carbono aéreo, principalmente debido a la mayor contribución del componente arbóreo. Por su parte, el sistema cacao + bolaina blanca presenta una menor

capacidad de almacenamiento de carbono, pero muestra una mayor acumulación de hojarasca y ligeros incrementos en biomasa herbácea, características asociadas a su mayor entrada de luz y mayor recambio foliar. Estos patrones reflejan cómo la especie forestal asociada al cacao influye de manera determinante en la estructura, funcionamiento y potencial de captura de carbono del sistema agroforestal.

Los resultados de la prueba t-Student para muestras independientes indicaron un valor  $t = 2.10$ , con un p-valor bilateral = 0.079, lo cual es mayor que el nivel de significancia convencional ( $\alpha = 0.05$ ). Esto implica que la diferencia observada en el carbono total entre ambos sistemas no es estadísticamente significativa al 95% de confianza, aunque se aprecia claramente una tendencia consistente a mayores valores en el sistema cacao + pino chuncho.

**Tabla 3.** Prueba t de Student para muestras independientes entre los SAFs para el carbono en la biomasa arbórea

SAF	N	Media (1)	M(1)–M(2)	pHomVar	T	p-valor	Prueba
Cacao + pino chuncho	5	121.73	43.25	0.312	2.1	0.079	Bilateral
Cacao + bolaina blanca	5	78.48					



**Figura 8.** Comparación del carbono almacenado en la biomasa arbórea (t/ha) en dos SAFs

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema agroforestal cacao + pino chuncho presenta un mayor almacenamiento de carbono en la biomasa aérea (121.73 t C/ha), superando al sistema cacao + bolaina blanca (78.48 t C/ha). Este comportamiento es consistente con autores que reportan mayores reservas de carbono en sistemas agroforestales dominados por especies forestales de rápido crecimiento y mayor altura, como *S. amazonicum*. Por ejemplo, Piponiot et al. (2025) y Wang et al. (2022) reportan que los sistemas multiestratificados con árboles de porte alto presentan una acumulación de carbono superior debido a su mayor volumen maderable, lo cual coincide con los valores elevados encontrados en cacao + pino chuncho.

Asimismo, los valores obtenidos son comparables a los reportados por Añazco (2021) y Hernández (2021), quienes documentan que sistemas agroforestales con especies nativas de alto crecimiento pueden superar las 100 t C/ha en biomasa aérea, indicando que el cacao asociado con pino chuncho muestra una productividad estructural similar a la de sistemas altamente eficientes en fijar carbono. No obstante, los resultados de cacao + bolaina blanca se sitúan por debajo de lo reportado por Poveda (2013) y Espinoza (2012), quienes describen valores entre 90 y 120 t C/ha en sistemas agroforestales amazónicos, lo cual evidencia que la bolaina blanca, al ser una especie pionera de madera ligera, presenta menor acumulación de biomasa en condiciones similares.

Por otra parte, estudios como los de Negash (2015) y Patiño (2018) señalan que la densidad de la madera influye significativamente en las estimaciones de biomasa aérea; especies con baja densidad, como *G. crinita*, tienden a almacenar menos carbono que especies de densidad intermedia como *S. amazonicum*, lo cual respalda la tendencia observada. De forma semejante, Singh (2018) y Alvarado (2013) evidencian que la arquitectura del dosel y la longevidad de las especies determinan la eficiencia de captura de carbono, siendo los sistemas con árboles altos y bien desarrollados los que muestran mayor capacidad de fijación.

Los resultados también son coherentes con los hallazgos de Santos (2023) y Gómez (2022), quienes señalan que la interacción entre cacao y especies forestales influye en la productividad total del sistema, observándose mayores reservas de carbono cuando las especies acompañantes presentan un crecimiento vertical dominante. En contraste, los valores obtenidos para el sistema cacao + bolaina blanca son inferiores a los reportados por Mondragón (2019) y Silva (2019) en sistemas mixtos con especies de mayor longevidad, lo cual sugiere que la bolaina blanca, debido a su ciclo de vida corto, no alcanza niveles de almacenamiento comparables.

Asimismo, estudios como los de Fasanando (2015), Larrea (2007) y Díaz (2020) muestran que la edad de las plantaciones es un factor determinante en la acumulación de biomasa; sistemas jóvenes presentan menores valores, lo que podría explicar la diferencia observada si las bolainas evaluadas se encontraban en etapas tempranas de desarrollo. De igual manera, Clemente (2021) y Zavala (2018) destacan que el manejo silvicultural, incluyendo podas, aclareos y densidad de siembra, influye notablemente en la biomasa aérea, pudiendo incrementar o limitar el crecimiento de las especies asociadas.

Finalmente, los resultados pueden atribuirse a múltiples factores ecológicos y estructurales: densidad de plantación, edad de los árboles, tasa de crecimiento, densidad de la madera, competencia por luz, estructura del dosel y manejo agroforestal. En conjunto, estos factores explican por qué el sistema cacao + pino chuncho presenta mayor acumulación de carbono en biomasa aérea, mientras que cacao + bolaina blanca refleja valores más moderados pero consistentes con el comportamiento ecológico de la especie.

#### **4.2. Carbono orgánico almacenado en el suelo en sistemas agroforestales**

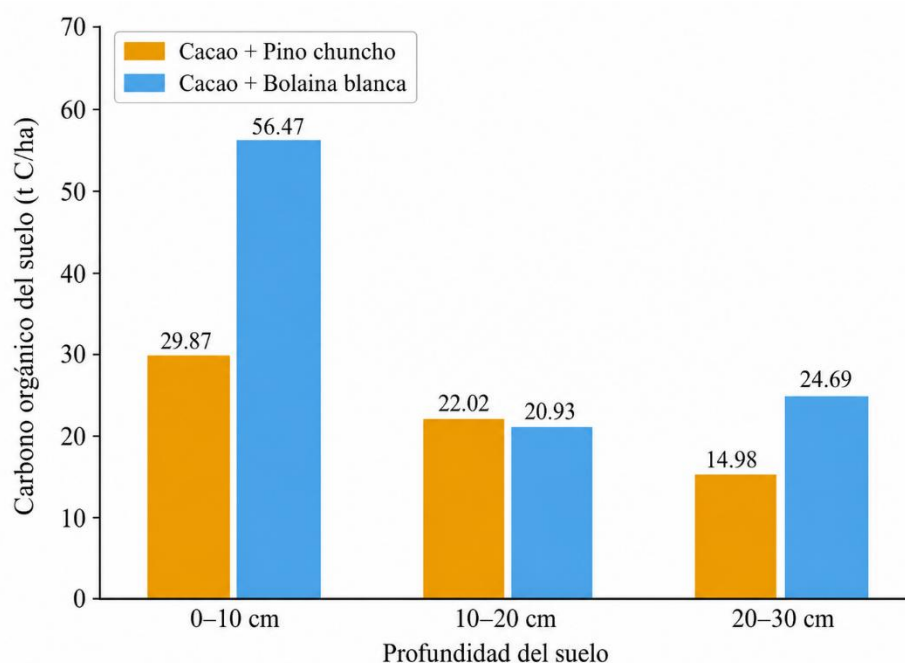
En la **Tabla 4** y **Figura 9**, se observa que el carbono orgánico del suelo presentó diferencias entre los dos sistemas agroforestales y entre las profundidades evaluadas. En el sistema cacao + pino chuncho, el carbono disminuyó conforme aumentó la profundidad, registrando 29.87 t C/ha en 0–10 cm, 22.02 t C/ha en 10–20 cm y 14.98 t C/ha en 20–30 cm. Este comportamiento es esperado, ya que en la capa superficial se acumula mayor cantidad de hojarasca, raíces finas y materia orgánica.

En el sistema cacao + bolaina blanca, el mayor valor también se observó en la capa superficial, con 56.47 t C/ha en 0–10 cm. En las capas inferiores se registraron 20.93 t C/ha en 10–20 cm y 24.69 t C/ha en 20–30 cm. Aunque la última capa presentó un valor ligeramente mayor que la intermedia, este resultado puede explicarse por una mayor densidad aparente y posible acumulación de raíces o carbono más estabilizado en profundidad.

En general, el sistema cacao + bolaina blanca almacenó más carbono orgánico en el suelo, con un total promedio de 102.09 t C/ha en 0–30 cm, mientras que el sistema cacao + pino chuncho alcanzó 66.87 t C/ha. Esto indica que el sistema con bolaina blanca presentó una mayor capacidad de almacenamiento de carbono edáfico, principalmente por su mayor acumulación en la capa superficial del suelo.

**Tabla 4.** Carbono orgánico del suelo en dos sistemas agroforestales

Sistema agroforestal	Profundidad	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	CV (%)
Cacao + pino chuncho	0–10 cm	29.87	3.18	24.38	32.55	10.63
	10–20 cm	22.02	2.88	18.3	24.9	13.1
	20–30 cm	14.98	0.53	14.29	15.72	3.56
<b>Total promedio del sistema</b>	<b>0–30 cm</b>	<b>66.87</b>	<b>6</b>	<b>56.98</b>	<b>72.46</b>	<b>8.98</b>
Cacao + bolaina blanca	0–10 cm	56.47	3	52.84	60.46	5.32
	10–20 cm	20.93	0.52	20.3	21.74	2.51
	20–30 cm	24.69	0.38	24.13	25.09	1.56
<b>Total promedio del sistema</b>	<b>0–30 cm</b>	<b>102.09</b>	<b>3.68</b>	<b>97.95</b>	<b>107.29</b>	<b>3.61</b>

**Figura 9.** Carbono orgánico del suelo a diferentes profundidades

La comparación del carbono orgánico total del suelo en el perfil de 0–30 cm mostró diferencias estadísticamente significativas entre los dos sistemas agroforestales evaluados. El sistema cacao + pino chuncho presentó un promedio de 66.87 t C/ha, mientras que el sistema cacao + bolaina blanca alcanzó 102.09 t C/ha, evidenciando una mayor acumulación de carbono edáfico en este último sistema (**Tabla 5; Figura 10**).

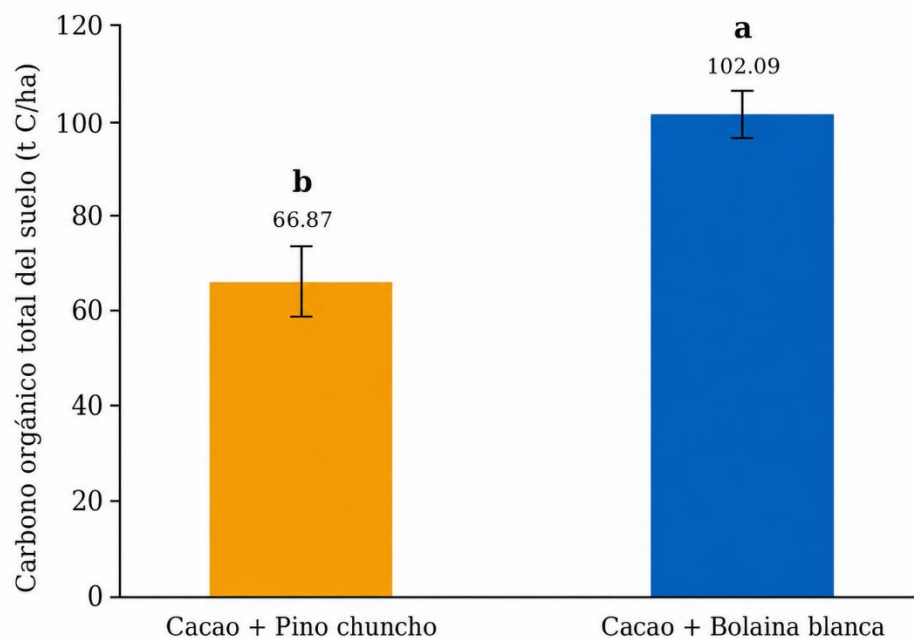
La diferencia promedio entre ambos sistemas fue de 35.23 t C/ha a favor del sistema cacao + bolaina blanca. Previamente, la prueba de homogeneidad de varianzas no fue

significativa ( $p = 0.432$ ), por lo que se asumió igualdad de varianzas para aplicar la prueba t de Student. El resultado mostró una diferencia altamente significativa entre sistemas ( $t = -11.20$ ;  $gl = 8$ ;  $p < 0.001$ ), lo que indica que el carbono orgánico total del suelo fue significativamente mayor en el sistema con bolaina blanca.

En consecuencia, el sistema agroforestal cacao + bolaina blanca presenta una capacidad significativamente mayor para almacenar carbono orgánico en el suelo en comparación con el sistema cacao + pino chuncho. Este comportamiento podría estar asociado a un mayor aporte de materia orgánica, una estructura radicular más desarrollada y procesos edáficos más favorables bajo la presencia de bolaina blanca, lo que resulta en una mayor acumulación y estabilización del carbono en el perfil del suelo.

**Tabla 5.** Prueba de T de student para el carbono orgánico del suelo en dos sistemas agroforestales

SAF	n	Media	M(1) – M(2)	p HomVar	t	p-valor	Prueba
Cacao + pino chuncho	5	66.86	-35.22	0.435	-11.2	< 0.001	Bilateral
Cacao + bolaina blanca	5	102.09	—	—	—	—	—



**Figura 10.** Carbono orgánico en el suelo en dos sistemas agroforestales

Los resultados evidenciaron que el sistema cacao + bolaina blanca presentó mayor contenido de carbono orgánico del suelo en 0–30 cm, con 102.09 t C/ha, en

comparación con el sistema cacao + pino chuncho, que alcanzó 66.87 t C/ha. Esta diferencia indica una mayor capacidad de almacenamiento de carbono edáfico en el sistema con bolaina blanca, posiblemente asociada al mayor aporte de residuos vegetales, hojarasca y raíces finas, así como a mejores condiciones para la incorporación y estabilización de la materia orgánica en el suelo.

El valor obtenido en cacao + bolaina blanca fue ligeramente inferior al rango reportado por Negash et al. (2015) en sistemas agroforestales autóctonos, quienes registraron valores entre 109 y 253 t C/ha. Sin embargo, se aproxima al límite inferior de dicho rango, lo que confirma que los sistemas agroforestales tropicales pueden constituir reservorios importantes de carbono en el suelo. Asimismo, los valores encontrados en el presente estudio fueron superiores a los reportados por Wang et al. (2022) en China (26.4–49.2 t C/ha) y por Santos (2023) en Uchiza (26.09 t C/ha), mientras que el sistema cacao + pino chuncho se ubicó dentro del rango informado por Alvarado et al. (2013) en Tolima (33.6–72.3 t C/ha), y el sistema con bolaina blanca lo superó.

En comparación con estudios locales, el carbono orgánico del suelo registrado en cacao + bolaina blanca fue menor al reportado por Zavala et al. (2018) en Tingo María (148.24 t C/ha), diferencia que podría explicarse por variaciones en la profundidad evaluada, edad del sistema, manejo del suelo, densidad arbórea y aporte de biomasa. No obstante, fue superior al valor informado por Pocomucha et al. (2016) en José Crespo y Castillo (65.57 t C/ha). En el caso del sistema cacao + pino chuncho, el valor obtenido fue muy cercano al reportado por Pocomucha et al. (2016) y superior a los valores registrados por Espinoza-Domínguez et al. (2012), aproximadamente 58 t C/ha, y por Hernández (2021), con rangos de 40.8–42.8 t C/ha para sistemas asociados con cacao.

Las diferencias encontradas entre ambos sistemas agroforestales pueden estar relacionadas con la cantidad y calidad de los residuos orgánicos aportados por las especies acompañantes. En el sistema cacao + bolaina blanca, la mayor acumulación de carbono podría explicarse por el aporte constante de hojarasca, ramas finas y raíces, los cuales favorecen la incorporación de materia orgánica al suelo. Además, la presencia de raíces en diferentes profundidades puede contribuir al ingreso de carbono en capas subsuperficiales, especialmente cuando existen condiciones favorables de humedad, cobertura y actividad biológica.

Por otro lado, el sistema cacao + pino chuncho presentó menor acumulación total de carbono orgánico del suelo, aunque sus valores también reflejan una contribución importante al almacenamiento edáfico. Esta diferencia no debe atribuirse a características propias de los pinos con acículas, debido a que el pino chuncho corresponde a *Schizolobium amazonicum*, una especie latifoliada tropical. Por tanto, las diferencias observadas podrían estar más relacionadas con la arquitectura del sistema, la distribución radicular, el aporte de biomasa, la cobertura del suelo y las condiciones de manejo. En conjunto, los resultados muestran que ambos sistemas agroforestales contribuyen al almacenamiento de carbono en el suelo, pero el sistema con bolaina blanca presentó una mayor eficiencia en el perfil evaluado.

### 4.3. Indicadores fisicoquímicos del suelo en sistemas agroforestales

#### 4.3.1. Densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ )

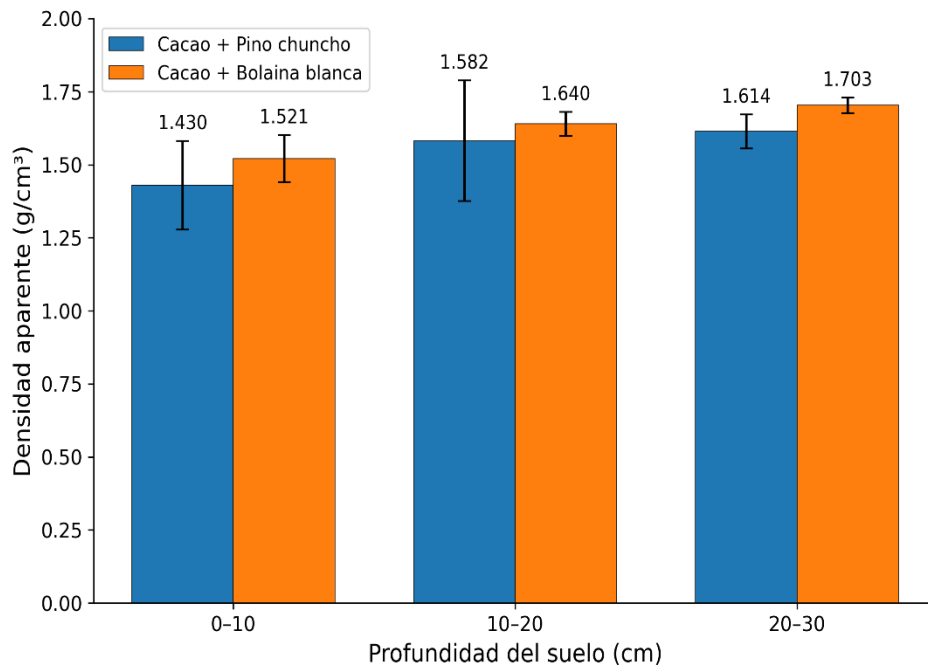
La densidad aparente del suelo presentó un incremento gradual con la profundidad en ambos sistemas agroforestales. En el sistema cacao + pino chuncho, los valores aumentaron de  $1.430 \text{ g/cm}^3$  en la capa de 0–10 cm a  $1.582 \text{ g/cm}^3$  en 10–20 cm y  $1.614 \text{ g/cm}^3$  en 20–30 cm. Este comportamiento indica una mayor compactación natural en las capas subsuperficiales, posiblemente asociada a la menor presencia de materia orgánica, menor actividad radicular y menor porosidad en profundidad. Los coeficientes de variación fueron bajos a moderados, lo que evidencia una variabilidad aceptable entre transectos (**Tabla 6; Figura 11**).

En el sistema cacao + bolaina blanca, la densidad aparente también aumentó con la profundidad, pasando de  $1.521 \text{ g/cm}^3$  en 0–10 cm a  $1.640 \text{ g/cm}^3$  en 10–20 cm y  $1.703 \text{ g/cm}^3$  en 20–30 cm. Estos valores fueron ligeramente superiores a los registrados en el sistema con pino chuncho, lo que sugiere una mayor densificación del suelo en el sistema con bolaina blanca. Sin embargo, los coeficientes de variación fueron bajos, especialmente en las capas de 10–20 cm y 20–30 cm, indicando una distribución relativamente homogénea de la densidad aparente en el perfil evaluado (**Tabla 6; Figura 11**).

En general, ambos sistemas mostraron un patrón coherente, donde la densidad aparente fue menor en la superficie y mayor en profundidad. Este comportamiento es esperado en suelos agroforestales, debido a que las capas superficiales suelen presentar mayor aporte de hojarasca, raíces finas y materia orgánica, factores que favorecen la agregación y reducen la compactación del suelo.

**Tabla 6.** Densidad aparente del suelo ( $\text{g/cm}^3$ ) a tres profundidades.

Sistema agroforestal	Profundidad (cm)	n	Media	DE	Mín.	Máx.	CV (%)
Cacao + pino chuncho	0–10	5	1.43	0.152	1.168	1.558	10.62
	10–20	5	1.582	0.207	1.315	1.789	13.1
	20–30	5	1.614	0.058	1.54	1.694	3.56
<b>Promedio 0–30 cm</b>	—	5	<b>1.542</b>	<b>0.13</b>	<b>1.34</b>	<b>1.66</b>	<b>8.1</b>
Cacao + bolaina blanca	0–10	5	1.521	0.081	1.423	1.629	5.33
	10–20	5	1.64	0.041	1.591	1.704	2.51
	20–30	5	1.703	0.026	1.664	1.73	1.55
<b>Promedio 0–30 cm</b>	—	5	<b>1.621</b>	<b>0.05</b>	<b>1.58</b>	<b>1.69</b>	<b>2.75</b>

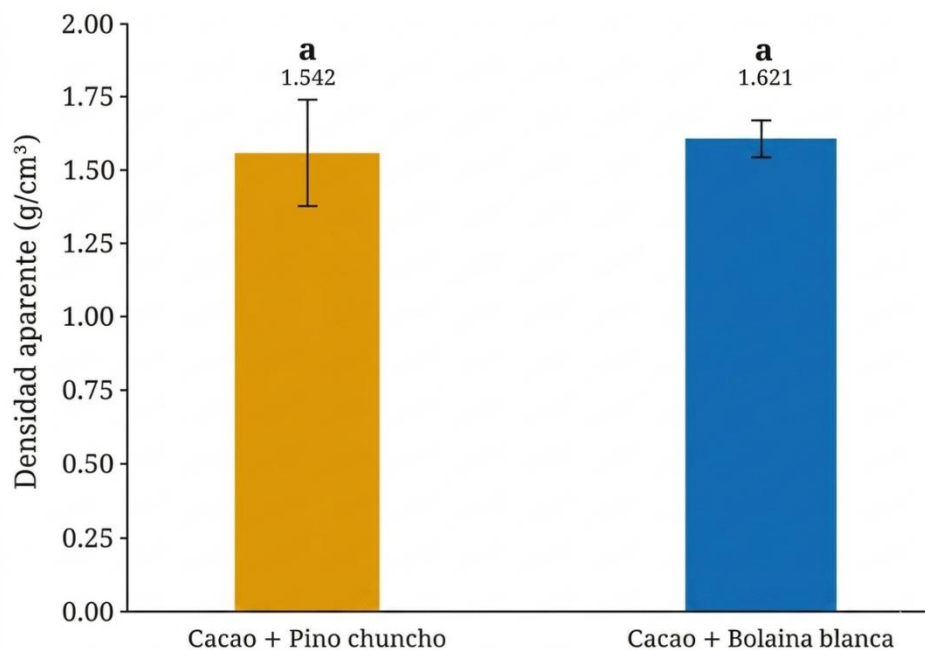
**Figura 11.** Densidad aparente del suelo en dos sistemas agroforestales

La comparación estadística de la densidad aparente promedio del suelo en el perfil de 0–30 cm mostró que el sistema cacao + bolaina blanca presentó un valor ligeramente mayor ( $1.621 \text{ g/cm}^3$ ) que el sistema cacao + pino chuncho ( $1.542 \text{ g/cm}^3$ ). Sin embargo, esta diferencia no fue estadísticamente significativa. La prueba de homogeneidad de varianzas no fue significativa ( $p = 0.094$ ), por lo que se asumió igualdad de varianzas para aplicar la prueba t de Student. El resultado obtenido ( $t = -1.333$ ;  $p = 0.219$ ) indica que, al nivel de significancia del 5 %, no existen diferencias significativas entre ambos sistemas agroforestales (Tabla 7; Figura 12).

Aunque estadísticamente la densidad aparente fue similar entre sistemas, los valores descriptivos muestran una ligera tendencia a mayores valores en cacao + bolaina blanca, especialmente en las capas subsuperficiales. Este comportamiento podría estar relacionado con una mayor densificación del suelo en profundidad; sin embargo, al no existir diferencia significativa, esta tendencia debe interpretarse con cautela y complementarse con otros indicadores edáficos, como carbono orgánico, textura, humedad y porosidad. En la Figura 12, la presencia de la misma letra sobre ambas barras confirma que los sistemas no difieren estadísticamente en densidad aparente promedio.

**Tabla 7.** Prueba t de Student para la densidad aparente del suelo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) en dos sistemas agroforestales

SAF	N	Media	M(1)–M(2)	PHomVar	T	P-valor	Prueba
Cacao + pino chuncho	5	1.542	-0.079	0.094	-1.33	0.219	Bilateral
Cacao + bolaina blanca	5	1.621	—	—	—	—	—



**Figura 12.** Densidad aparente del suelo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) en dos sistemas agroforestales

La densidad aparente (DA) registrada en los sistemas agroforestales evaluados mostró un incremento con la profundidad en ambos sistemas. En cacao + pino chuncho, los valores variaron entre 1.430 y 1.614  $\text{g}/\text{cm}^3$ , mientras que en cacao + bolaina blanca oscilaron entre 1.521 y 1.703  $\text{g}/\text{cm}^3$ , evidenciando una ligera mayor densificación en este último sistema. Al comparar estos valores con estudios previos, se observa que ambos sistemas

presentan densidades superiores a las reportadas por Huamán (2021) en Cora Cora, donde los sistemas agroforestales y de coca mostraron DA de  $1.14 \text{ g/cm}^3$  y el bosque  $1.00 \text{ g/cm}^3$ , lo que sugiere que los suelos evaluados en Luyando presentan una condición física más compacta. De manera similar, los valores obtenidos superan los registrados por Schwartzmann (2019), quien reportó  $1.27 \text{ g/cm}^3$  en un SAF de Madre de Dios y  $1.43 \text{ g/cm}^3$  en pastizales degradados.

Asimismo, al contrastar con Calderón-Medina et al. (2018), cuyos SAF en Colombia presentaron densidades entre  $1.34$  y  $1.46 \text{ g/cm}^3$ , los valores del sistema cacao + pino chuncho resultan cercanos, aunque ligeramente superiores en las capas más profundas, mientras que los del sistema cacao + bolaina blanca son mayores, principalmente en 10–20 y 20–30 cm. Fasanando (2015) reportó densidades menores en bosques ( $1.26 \text{ g/cm}^3$ ) y SAF ( $1.35 \text{ g/cm}^3$ ), y mayores en pastizales ( $2.02 \text{ g/cm}^3$ ); en este contexto, los valores registrados en Luyando se ubican por encima de los SAF reportados por dicho autor, pero por debajo de los valores extremos de pastizales degradados. De igual forma, Fernández Ríos (2024) encontró DA de  $1.47$ – $1.52 \text{ g/cm}^3$  en agroforestales y  $1.43$ – $1.48 \text{ g/cm}^3$  en bosques, valores comparables con la capa superficial de los sistemas evaluados, pero menores que los registrados en las capas subsuperficiales, especialmente en cacao + bolaina blanca.

De igual modo, Singh et al. (2018) reportaron densidades de  $1.25$ – $1.28 \text{ g/cm}^3$  en SAF arborizados y de  $1.41$ – $1.45 \text{ g/cm}^3$  en sistemas agrícolas del Himalaya, valores inferiores a los obtenidos en Luyando, principalmente en las capas de 10–20 y 20–30 cm. Por último, Molina et al. (2021), en estudios andinos, encontraron densidades entre  $0.61$  y  $0.95 \text{ g/cm}^3$ , reafirmando que los sistemas agroforestales evaluados presentan suelos relativamente más densos que los observados en bosques o sistemas silvoagrícolas de zonas altoandinas.

En conjunto, la evidencia muestra que la DA de ambos sistemas agroforestales se encuentra dentro de rangos moderadamente altos, con una tendencia ligeramente mayor en cacao + bolaina blanca. Sin embargo, la comparación estadística no evidenció diferencias significativas entre sistemas, por lo que esta diferencia debe interpretarse con cautela. Las variaciones observadas podrían estar asociadas a factores como el contenido de materia orgánica, la textura del suelo, la distribución de raíces, el manejo del sistema y la compactación natural en profundidad. Por ello, aunque el sistema con bolaina blanca presentó valores descriptivamente superiores, ambos sistemas mantienen una condición física relativamente similar en el perfil de 0–30 cm.

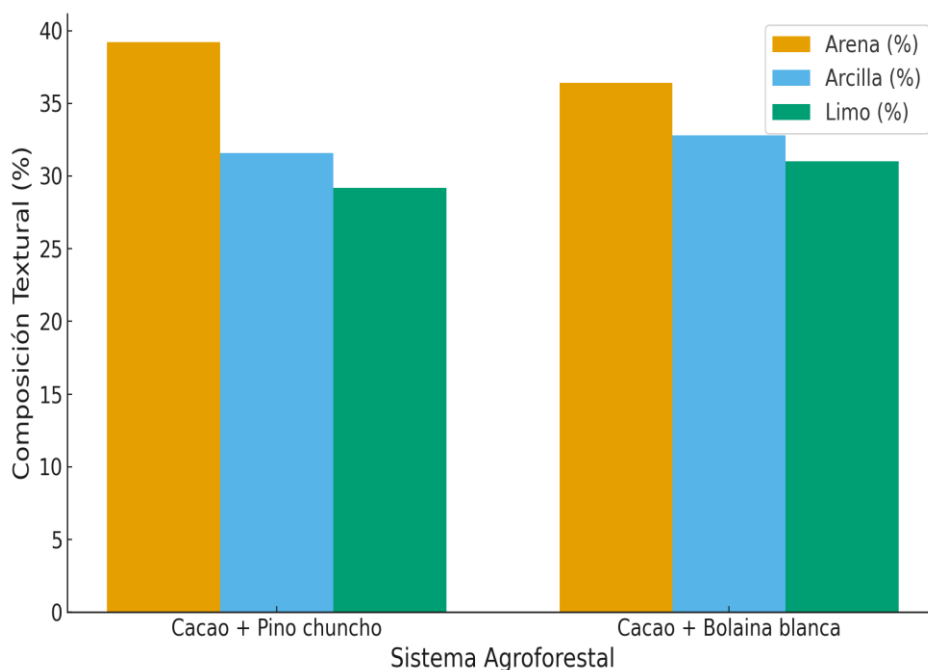
### 4.3.2. Textura

La textura del suelo mostró una composición muy homogénea entre los dos sistemas agroforestales evaluados. En el sistema cacao + pino chuncho, la fracción arenosa presentó un promedio de 39.2%, seguido de arcilla con 31.6% y limo con 29.2%, lo que refleja un equilibrio textural característico de suelos moderadamente finos. De manera similar, el sistema cacao + bolaina blanca presentó valores promedio de 36.4% para arena, 32.8% para arcilla y 31.0% para limo, manteniendo proporciones muy cercanas a las del primer sistema. Esta distribución relativamente estable entre las tres fracciones texturales evidencia que ambos sistemas comparten condiciones físicas similares, sin que exista un dominio claro de una fracción granulométrica sobre las demás.

Como resultado, la clasificación textural obtenida fue Franco Arcilloso en el 100% de las muestras para ambos sistemas. Esta clase textural es reconocida por su capacidad para retener humedad y nutrientes, favorecer la actividad biológica y mantener una estructura edáfica adecuada para el crecimiento radicular, sin presentar los problemas de compactación severa propios de suelos arcillosos ni el drenaje excesivo típico de suelos arenosos. En este contexto, la similitud en la textura sugiere que las diferencias observadas en otros indicadores edáficos (carbono orgánico, densidad aparente o propiedades químicas) no se deben a variaciones en la textura del suelo, sino a factores asociados al manejo, la especie acompañante y las interacciones ecológicas propias de cada sistema agroforestal.

**Tabla 8.** Textura del suelo en dos sistemas agroforestales

Sistema Agroforestal (SAF)	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Clase textural predominante
	Promedio (Min– Max)	Promedio (Min–Max)	Promedio (Min– Max)	
Cacao + pino chuncho	39.2 (30–44)	31.6 (28–36)	29.2 (26–34)	Franco Arcilloso (100%)
Cacao + bolaina blanca	36.4 (30–44)	32.8 (28–38)	31.0 (22–36)	Franco Arcilloso (100%)



**Figura 13.** Porcentaje de arena, arcilla y limo en dos sistemas agroforestales

La textura del suelo en ambos sistemas agroforestales evaluados (cacao + pino chuncho y cacao + bolaina blanca), clasificada como Franco Arcillosa en el 100% de las muestras, coincide con lo reportado por diversos autores en sistemas similares de la selva alta y regiones tropicales. En primer lugar, los valores obtenidos (arena: 36.4–39.2%, arcilla: 31.6–32.8% y limo: 29.2–31.0%) se muestran coherentes con los hallazgos de Fasanando (2015), quien describe suelos franco arcillosos en sistemas agroforestales y forestales con proporciones muy similares de arena (33.68–37.68%), arcilla (33.04–37.04%) y limo (27.28–31.28%). Esto indica que la granulometría observada en Luyando sigue el patrón textural predominante en suelos tropicales húmedos sometidos a manejo silvícola y agroforestal.

De manera semejante, Fernández Ríos (2024) también reportó textura franco arcillosa en sistemas agroforestales y bosques primarios, con valores cercanos a los encontrados en este estudio (arena 24–31%, limo 35–36%, arcilla 31–34%), lo que refuerza la consistencia regional en la distribución de las fracciones edáficas y su estabilidad frente al uso del suelo. Sin embargo, respecto a Huamán (2021), quien halló textura franco arcillosa en sistemas agroforestales y bosques, pero franco arcillo-limosa en cultivos de coca, los valores de Luyando muestran una composición más equilibrada y uniforme, sin transiciones texturales asociadas a perturbaciones antrópicas intensivas.

En contraste, Parrales (2022) y Molina et al. (2021) documentaron mayor variabilidad textural incluyendo suelos francos, franco arenosos y franco arcillo arenosos, lo que evidencia que la homogeneidad encontrada en Luyando es un rasgo distintivo que podría

atribuirse a condiciones geomorfológicas más estables y a un manejo agrícola menos intensivo que en otras regiones. Asimismo, los valores registrados difieren ligeramente de los reportados por Singh et al. (2018), quienes encontraron mayor fluctuación en arena y arcilla en sistemas agroforestales del Himalaya, lo cual es atribuible a diferencias ecológicas y geológicas marcadas entre ambas regiones.

En conjunto, los resultados confirman que ambos sistemas agroforestales comparten una textura Franco Arcillosa estable, capaz de favorecer la retención de humedad, la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica, lo que implica que las diferencias observadas en otras variables edáficas no se deben a la textura del suelo, sino a factores asociados al manejo, la composición de especies y la dinámica de aportes orgánicos de cada sistema.

#### **4.3.3. Propiedades químicas**

Los resultados muestran diferencias claras entre los dos sistemas agroforestales evaluados en cuanto a la calidad química del suelo. En términos de materia orgánica (MO), ambos sistemas presentan valores medios similares (3.118 % en cacao + pino chuncho y 3.19 % en cacao + bolaina blanca), con coeficientes de variación bajos (16.12 % y 15.88 %, respectivamente). Esto sugiere que ambos sistemas mantienen niveles de MO relativamente estables y homogéneos, lo cual es fundamental para el sostenimiento de la estructura edáfica y la disponibilidad de nutrientes. Sin embargo, se observa un ligero incremento en el sistema con bolaina blanca, posiblemente asociado a un mayor aporte de hojarasca o a una descomposición más eficiente bajo este dosel arbóreo.

Con respecto al pH del suelo, se evidenció un incremento notable en el sistema cacao + bolaina blanca ( $\text{pH} = 5.604$ ), en comparación con el sistema con pino chuncho ( $\text{pH} = 4.85$ ). Esta diferencia es importante debido a que valores más altos de pH dentro de este rango tienden a mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales y reducir la acidez del suelo, condicionando un ambiente más favorable para el desarrollo radicular del cacao. Además, el coeficiente de variación en el sistema con bolaina blanca (2.05 %) fue considerablemente menor que en el sistema con pino chuncho (4.27 %), lo que indica que el suelo bajo bolaina blanca presenta una mayor estabilidad química en cuanto a su acidez.

En relación al nitrógeno total, el sistema cacao + bolaina blanca también mostró valores ligeramente superiores (0.1694 %) respecto al sistema con pino chuncho (0.1558 %). Esta diferencia podría asociarse a una mayor tasa de descomposición de hojarasca o una

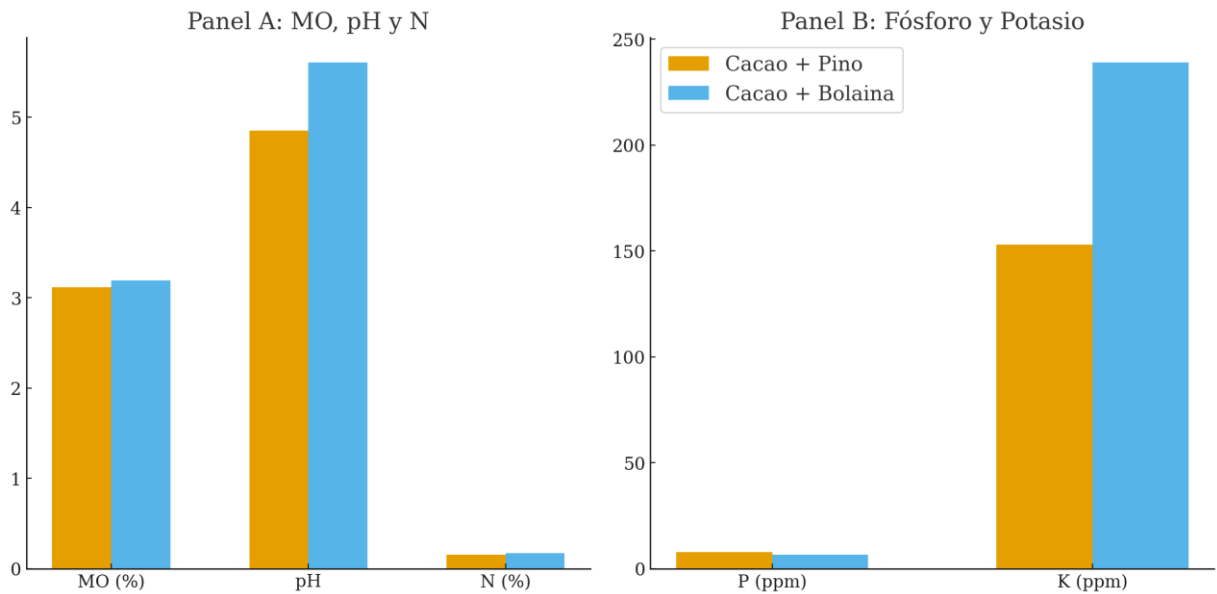
mejor ciclicidad de nutrientes en el sistema con bolaina blanca. Los valores de variación fueron similares entre sistemas (alrededor del 16 %), indicando que el contenido de N se mantiene relativamente homogéneo en ambas condiciones.

En cuanto a los macronutrientes del suelo, se observaron tendencias diferenciadas entre los sistemas. El contenido de fósforo disponible fue mayor en cacao + pino chuncho (7.7248 ppm) que en cacao + bolaina blanca (6.646 ppm). Esto sugiere que la presencia de pino chuncho podría estar asociada a una menor inmovilización de P en el suelo o a un menor consumo del mismo por parte del dosel arbóreo. No obstante, el sistema con bolaina blanca mostró mayor variabilidad (CV = 17.65 %), lo cual sugiere una distribución menos uniforme del P en ese sistema.

Finalmente, el potasio fue marcadamente superior en el sistema cacao + bolaina blanca (238.97 ppm) comparado con cacao + pino chuncho (153.03 ppm). Este incremento podría estar relacionado con la naturaleza de los residuos foliares de la bolaina blanca, la tasa de mineralización o el retorno de nutrientes vía hojarasca. El coeficiente de variación en ambos sistemas fue similar (aprox. 18 %), indicando estabilidad relativa en la distribución del K, pero con mayor disponibilidad en el sistema con bolaina blanca.

**Tabla 9.** Propiedades químicas del suelo de dos sistemas agroforestales

<b>Variable</b>	<b>Sistema Agroforestal</b>	<b>Media</b>	<b>DE</b>	<b>CV (%)</b>
<b>MO (%)</b>	Cacao + pino chuncho	3.118	0.503	16.12
	Cacao + bolaina blanca	3.19	0.507	15.88
<b>pH (1:1)</b>	Cacao + pino chuncho	4.85	0.207	4.27
	Cacao + bolaina blanca	5.604	0.115	2.05
<b>N (%)</b>	Cacao + pino chuncho	0.1558	0.025	16.11
	Cacao + bolaina blanca	0.1694	0.027	15.64
<b>Fósforo (ppm)</b>	Cacao + pino chuncho	7.7248	0.837	10.84
	Cacao + bolaina blanca	6.646	1.173	17.65
<b>Potasio (ppm)</b>	Cacao + pino chuncho	153.03	26.98	17.63
	Cacao + bolaina blanca	238.97	43.41	18.16



**Figura 14.** Propiedades químicas del suelo en dos sistemas agroforestales

Los dos sistemas agroforestales evaluados mostraron diferencias marcadas en sus propiedades químicas, reflejando la influencia de la composición arbórea y las condiciones edáficas locales. En cuanto al pH, el sistema cacao + bolaina blanca alcanzó valores más altos (5.60) en comparación con cacao + pino chuncho (4.85), situándose este último en un rango más ácido. Resultados similares fueron reportados por Huamán (2021), quien encontró pH de 6.97 en un sistema agroforestal en Luyando, superiores a los de ambos sistemas del presente estudio, mientras que Fasanando (2015) documentó valores entre 6.25 y 7.12 en bosques y sistemas agroforestales, también mayores que los obtenidos aquí. Estos contrastes sugieren que los sistemas estudiados tienden a una mayor acidificación, posiblemente asociada a la composición de especies y a la dinámica de descomposición de sus residuos. Por otra parte, Molina et al. (2021) reportaron pH entre 5.21 y 5.99 en sistemas altoandinos, valores comparables a los observados en cacao + bolaina blanca, indicando que este sistema presenta condiciones químicas más equilibradas para el cacao.

Respecto a la materia orgánica (MO), ambos sistemas mostraron contenidos medios (3.118 % y 3.19 %), superiores a los reportados por Huamán (2021) para sistemas agroforestales en Cora Cora (1.68 %), así como a los valores documentados por Fernández Ríos (2024) (0.80–1.06 % en SAF). Sin embargo, fueron inferiores a los reportes de Moreno y Navorio (2004) en sistemas cafetaleros con leguminosas (18.46–22.9 %), donde la acumulación de MO es considerablemente mayor. En concordancia, Schwartzmann (2019) registró valores de 3.12 % en SAF amazónicos, similares a los encontrados en este estudio, lo

que sugiere que ambos sistemas presentan una adecuada provisión de residuos orgánicos, aunque condicionada por la estructura del dosel y la calidad del aporte foliar.

El nitrógeno total presentó valores bajos en ambos sistemas (0.1558 % y 0.1694 %), alineándose con lo hallado por Huamán (2021) (0.08 % en SAF) y Fernández Ríos (2024) (0.05–0.06 %), quienes señalan que los sistemas agroforestales de la selva alta suelen presentar deficiencias en N debido a la limitada mineralización y la ausencia de leguminosas fijadoras. No obstante, estos valores fueron inferiores a los encontrados por Fasanando (2015) (0.12–0.22 %) y muy por debajo de sistemas con aportes orgánicos como los reportados por Moreno y Navorio (2004) (0.37–0.46 %), lo que evidencia la necesidad de mejorar el reciclaje de biomasa y la entrada de N en los sistemas estudiados.

En cuanto al fósforo disponible, el sistema cacao + pino chuncho mostró mayores niveles (7.72 ppm) respecto al sistema con bolaina blanca (6.64 ppm), valores comparables a los registrados por Schwartzmann (2019) (9.87 ppm) y cercanos a los obtenidos por Huamán (2021) (6.56 ppm). Sin embargo, fueron inferiores a los reportes de Fasanando (2015) (9.21–20.15 ppm) y especialmente a los documentados en agroforestería con especies de alta capacidad de ciclado como en Singh et al. (2018) (17–26 kg/ha). Esto indica que, si bien los valores son aceptables para sistemas tropicales ácidos, podrían potenciarse mediante manejo de residuos y prácticas de fertilización orgánica.

Finalmente, el potasio presentó diferencias marcadas entre sistemas, con un valor mucho más alto en cacao + bolaina blanca (238.97 ppm) que en cacao + pino chuncho (153.03 ppm). Este valor supera ampliamente a los reportes de Huamán (2021) (83.71 ppm) y a los hallados por Schwartzmann (2019) ( $\approx 0.41$  cmol/kg), e incluso es comparable a los sistemas agrícolas intensivos descritos por Nieto (2015) (362–400 kg/ha). Este resultado sugiere que la bolaina blanca podría contribuir a un mayor retorno de K vía hojarasca o que el sistema presenta una menor extracción del cultivo asociado.

#### **4.4. Relación entre el carbono almacenado en la biomasa aérea con los indicadores fisicoquímicos del suelo en sistemas agroforestales**

El análisis de correlación entre el carbono almacenado en la biomasa vegetal y las propiedades fisicoquímicas del suelo no mostró relaciones estadísticamente significativas en ninguno de los sistemas agroforestales evaluados, ya que todos los valores de p fueron mayores a 0.05. En el sistema cacao + pino chuncho, las correlaciones fueron en general débiles,

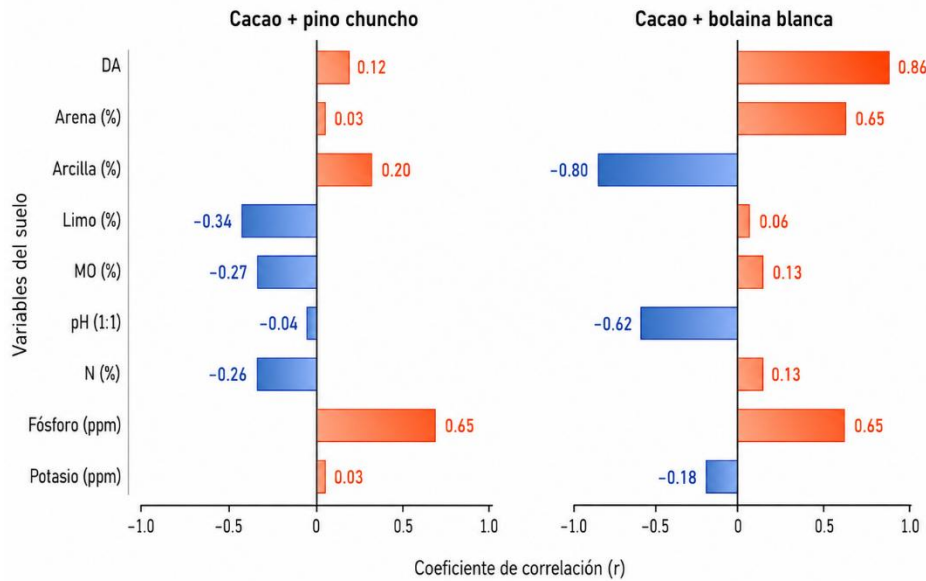
lo que indica que el carbono de la biomasa vegetal no presentó una relación directa con las variables edáficas evaluadas. La mayor tendencia positiva se observó con el fósforo ( $r = 0.650$ ;  $p = 0.235$ ), aunque sin significancia estadística, por lo que debe interpretarse solo como una posible asociación.

En el sistema cacao + bolaina blanca, las correlaciones fueron más marcadas, aunque tampoco significativas. Destacó la relación positiva alta con la densidad aparente ( $r = 0.863$ ;  $p = 0.059$ ), cercana al nivel de significancia, lo que sugiere una posible tendencia entre mayor densidad del suelo y mayor carbono en biomasa vegetal. También se observaron relaciones positivas moderadas con arena ( $r = 0.650$ ;  $p = 0.235$ ) y fósforo ( $r = 0.653$ ;  $p = 0.232$ ), mientras que la arcilla mostró una relación negativa alta ( $r = -0.796$ ;  $p = 0.107$ ) y el pH una relación negativa moderada ( $r = -0.618$ ;  $p = 0.267$ ).

En conjunto, los resultados indican que el carbono de la biomasa vegetal no estuvo determinado significativamente por una sola propiedad del suelo. Sin embargo, las tendencias observadas, especialmente en el sistema cacao + bolaina blanca, sugieren que variables como la densidad aparente, textura y fósforo podrían influir en la acumulación de biomasa, por lo que sería conveniente evaluarlas con un mayor número de observaciones en futuros estudios.

**Tabla 10.** Correlación de Pearson del carbono almacenado en la biomasa vegetal con las propiedades fisicoquímicas del suelo

Variable	Cacao + pino chuncho		Cacao + bolaina blanca	
	r	p-valor	R	p-valor
DA	0.123	0.844	0.863	0.059
Arena (%)	0.031	0.96	0.65	0.235
Arcilla (%)	0.198	0.749	-0.796	0.107
Limo (%)	-0.337	0.579	0.055	0.93
MO (%)	-0.27	0.661	0.134	0.83
pH (1:1)	-0.036	0.954	-0.618	0.267
N (%)	-0.259	0.674	0.133	0.831
Fósforo (ppm)	0.65	0.235	0.653	0.232
Potasio (ppm)	0.03	0.962	-0.184	0.768



**Figura 15.** Corplot de correlación del carbono de biomasa vegetal con las propiedades fisicoquímicas del suelo

Los resultados mostraron que el carbono almacenado en la biomasa vegetal presentó correlaciones no significativas con las propiedades fisicoquímicas del suelo en ambos sistemas agroforestales, lo que indica que su variación no estuvo explicada directamente por los atributos edáficos evaluados. En el sistema cacao + pino chuncho, las correlaciones fueron mayormente débiles, destacando solo una tendencia positiva moderada con el fósforo ( $r = 0.650$ ;  $p = 0.235$ ), aunque sin significancia estadística. Este comportamiento coincide con lo reportado por Calderón-Medina et al. (2018), quienes señalan que, si bien los sistemas agroforestales pueden presentar condiciones químicas favorables, la acumulación de biomasa depende también de la estructura del dosel, densidad de individuos y características propias de las especies. Asimismo, Singh et al. (2018) observaron que la fertilidad del suelo puede favorecer el potencial productivo, pero no siempre se traduce en incrementos proporcionales de biomasa aérea.

En el sistema cacao + bolaina blanca, las asociaciones fueron más marcadas, aunque tampoco significativas. Se observó una correlación positiva alta entre la biomasa vegetal y la densidad aparente ( $r = 0.863$ ;  $p = 0.059$ ), así como correlaciones positivas moderadas con arena ( $r = 0.650$ ;  $p = 0.235$ ) y fósforo ( $r = 0.653$ ;  $p = 0.232$ ). En cambio, la arcilla presentó una relación negativa alta ( $r = -0.796$ ;  $p = 0.107$ ) y el pH una relación negativa moderada ( $r = -0.618$ ;  $p = 0.267$ ). Estas tendencias sugieren que la textura, la densidad del suelo y la disponibilidad de fósforo podrían influir parcialmente en el comportamiento de la biomasa,

aunque los resultados deben interpretarse con cautela debido a la ausencia de significancia estadística.

La tendencia positiva observada con el fósforo en ambos sistemas coincide parcialmente con Fasanando (2015), quien reportó variaciones importantes del P disponible entre usos del suelo, aunque su relación con la productividad puede ser limitada por procesos de fijación en suelos ácidos. De igual manera, la relación negativa entre biomasa y pH en el sistema con bolaina blanca guarda relación con lo señalado por Huamán (2021), quien evidenció la presencia de suelos ácidos en sistemas agroforestales, sin que ello necesariamente limite de forma marcada el crecimiento arbóreo. Por otro lado, la débil asociación entre biomasa y materia orgánica coincide con Schwartzmann (2019), quien indica que la MO refleja principalmente procesos de acumulación y descomposición edáfica, más que una respuesta inmediata de la biomasa aérea.

En conjunto, las correlaciones obtenidas sugieren que el carbono en biomasa vegetal no depende de una sola propiedad fisicoquímica del suelo, sino de la interacción entre las condiciones edáficas, la estructura del sistema agroforestal, la densidad de árboles, la arquitectura de copa, la competencia por luz y las características propias de cada especie. Esta interpretación coincide con lo propuesto por el IPCC y otros autores, quienes señalan que el crecimiento arbóreo responde a múltiples factores del sitio, manejo y composición del sistema, más que a variaciones aisladas del suelo en el corto plazo.

En conjunto, las correlaciones obtenidas sugieren que, en estos sistemas agroforestales, el carbono en biomasa aérea depende principalmente de factores estructurales del sistema (densidad de individuos, arquitectura de copa, aporte de sombra, competencia por luz) y no de forma directa de las propiedades fisicoquímicas del suelo. Esta interpretación coincide con lo propuesto por el IPCC y otros autores, quienes indican que el crecimiento arbóreo responde más a condiciones de sitio, manejo y características intrínsecas de las especies que a variaciones edáficas en el corto plazo.

#### **4.5. Relación entre el carbono orgánico del suelo con los indicadores fisicoquímicos del suelo en sistemas agroforestales**

El análisis de correlación entre el carbono orgánico del suelo (COS) y las propiedades edáficas mostró patrones diferenciados según el tipo de análisis realizado. Cuando se evaluó por profundidad, la materia orgánica presentó una correlación positiva alta y

significativa con el COS en ambos sistemas agroforestales. En cacao + pino chuncho, la relación fue de  $r = 0.935$  ( $p < 0.001$ ), mientras que en cacao + bolaina blanca fue de  $r = 0.995$  ( $p < 0.001$ ). Este resultado es coherente, ya que las capas con mayor contenido de materia orgánica, principalmente la superficie del suelo, también concentraron mayores valores de carbono orgánico (**Tabla 11** y **Figura 16**).

En el sistema cacao + pino chuncho, las demás variables no presentaron correlaciones significativas. Se observaron asociaciones moderadas con arcilla ( $r = 0.529$ ), materia orgánica ( $r = -0.477$ ), nitrógeno ( $r = -0.468$ ) y potasio ( $r = -0.464$ ), pero todas con valores de  $p > 0.05$ , por lo que no pueden considerarse relaciones concluyentes (**Tabla 11** y **Figura 16**).

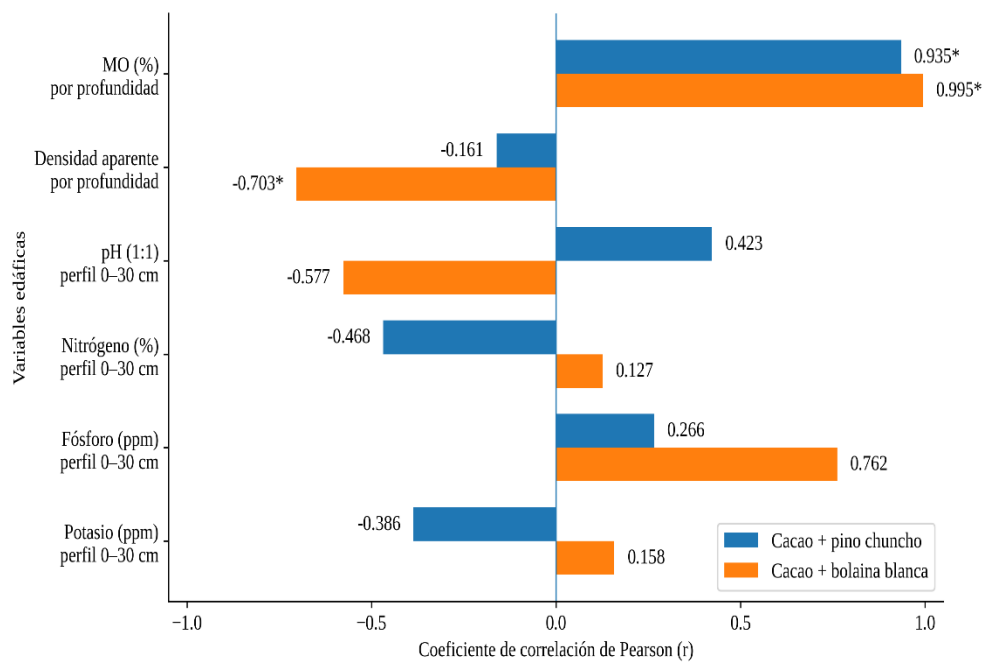
Respecto a la densidad aparente, en cacao + pino chuncho se observó una correlación negativa débil y no significativa con el COS ( $r = -0.161$ ;  $p = 0.566$ ). En cambio, en cacao + bolaina blanca la relación fue negativa y significativa ( $r = -0.703$ ;  $p = 0.003$ ), lo que indica que las capas con menor densidad aparente presentaron mayor acumulación de carbono orgánico. Este comportamiento es esperable en suelos agroforestales, debido a que las capas superficiales suelen tener mayor aporte de hojarasca, raíces finas y materia orgánica, lo que favorece menor densidad y mayor almacenamiento de carbono (**Tabla 11** y **Figura 16**).

Por otro lado, las propiedades químicas evaluadas por transecto en el perfil de 0–30 cm no presentaron correlaciones significativas con el COS. En cacao + pino chuncho, el pH mostró una relación positiva moderada ( $r = 0.423$ ;  $p = 0.477$ ), mientras que el nitrógeno y el potasio presentaron relaciones negativas moderadas, aunque sin significancia estadística. En cacao + bolaina blanca, destacó una tendencia positiva alta con el fósforo ( $r = 0.762$ ;  $p = 0.134$ ) y una relación negativa moderada con el pH ( $r = -0.577$ ;  $p = 0.308$ ), pero ambas no fueron significativas.

En conjunto, los resultados indican que el COS estuvo más asociado a la materia orgánica y, en el caso de cacao + bolaina blanca, también a la densidad aparente, cuando el análisis se realizó por profundidad. En cambio, las propiedades químicas homogenizadas por transecto no explicaron de manera significativa la variación del carbono orgánico total en el perfil 0–30 cm. Por ello, la acumulación de carbono en el suelo parece responder principalmente a la distribución vertical de la materia orgánica y a las condiciones físicas del perfil edáfico, más que a una sola propiedad química del suelo.

**Tabla 11.** Correlación de Pearson del carbono orgánico del suelo con las propiedades fisicoquímicas del suelo

Tipo de análisis	Variable correlacionada con COS	Cacao + pino chuncho		Cacao + bolaina blanca	
		r	p-valor	r	p-valor
Por profundidad	Materia orgánica (%)	0.935	< 0.001	0.995	< 0.001
Por profundidad	Densidad aparente	-0.161	0.566	-0.703	0.003
Por transecto, perfil 0–30 cm	pH (1:1)	0.423	0.477	-0.577	0.308
Por transecto, perfil 0–30 cm	Nitrógeno (%)	-0.468	0.427	0.127	0.839
Por transecto, perfil 0–30 cm	Fósforo (ppm)	0.266	0.665	0.762	0.134
Por transecto, perfil 0–30 cm	Potasio (ppm)	-0.386	0.521	0.158	0.799



**Figura 16.** Corplot de correlación del carbono de biomasa vegetal con las propiedades fisicoquímicas del suelo

Los resultados obtenidos mostraron que el carbono orgánico del suelo (COS) presentó una relación estrecha con la materia orgánica cuando el análisis se realizó por profundidad. En el sistema cacao + pino chuncho, la correlación fue positiva alta y significativa ( $r = 0.935$ ;  $p < 0.001$ ), mientras que en cacao + bolaina blanca fue positiva muy alta y significativa ( $r = 0.995$ ;  $p < 0.001$ ). Este resultado es coherente con la dinámica natural del carbono en el suelo, ya que las capas superficiales presentan mayor acumulación de residuos

orgánicos, raíces finas y hojarasca, lo que incrementa tanto la materia orgánica como el carbono orgánico. Esta tendencia contrasta parcialmente con Nieto (2015), quien también reportó asociaciones altas del COS con la materia orgánica y el nitrógeno en sistemas agroforestales de café, atribuibles al aporte constante de biomasa y a la actividad biológica del suelo.

Respecto a la densidad aparente, el comportamiento fue diferente entre sistemas. En cacao + pino chuncho, la relación con el COS fue negativa débil y no significativa ( $r = -0.161$ ;  $p = 0.566$ ), mientras que en cacao + bolaina blanca fue negativa alta y significativa ( $r = -0.703$ ;  $p = 0.003$ ). Este resultado indica que, especialmente en el sistema con bolaina blanca, las capas con menor densidad aparente concentraron mayores valores de carbono orgánico. Esta relación es esperable en sistemas agroforestales, debido a que la capa superficial suele presentar mayor materia orgánica, mejor agregación, mayor porosidad y menor compactación. Esta tendencia se relaciona parcialmente con lo reportado por Huamán (2021), quien señaló que la densidad aparente es un indicador estructural importante en sistemas agroforestales de Luyando, aunque su efecto puede variar según el manejo y los aportes de biomasa.

En cuanto a las propiedades químicas evaluadas por transecto en el perfil de 0–30 cm, no se encontraron correlaciones significativas entre el COS y el pH, nitrógeno, fósforo y potasio. En cacao + pino chuncho, se observaron relaciones moderadas con pH ( $r = 0.423$ ), nitrógeno ( $r = -0.468$ ) y potasio ( $r = -0.386$ ), pero todas sin significancia estadística. En cacao + bolaina blanca, destacó una tendencia positiva alta con el fósforo ( $r = 0.762$ ;  $p = 0.134$ ) y una relación negativa moderada con el pH ( $r = -0.577$ ), aunque tampoco fueron significativas. Estos resultados sugieren que las propiedades químicas homogenizadas por transecto no explicaron de manera directa la variación del COS total acumulado en el perfil evaluado. Asimismo, Guera (2022) señala que el fósforo puede relacionarse con la fracción lábil del carbono, aunque dicha relación depende del estado de la materia orgánica y de las condiciones del suelo. En el caso del potasio, lo observado coincide parcialmente con Ghosh (2018), quien indica que su influencia sobre el COS suele ser más evidente en suelos con déficit marcado o bajo manejo intensivo.

En conjunto, los resultados sugieren que la variación del carbono orgánico del suelo estuvo más asociada a la materia orgánica y a la densidad aparente cuando el análisis se realizó por profundidad. En cambio, las propiedades químicas evaluadas a nivel de transecto no presentaron relaciones significativas con el COS total del perfil 0–30 cm. Esto podría atribuirse

al tamaño muestral, a la homogenización de las muestras químicas, a la variabilidad del manejo y a la dinámica vertical del carbono en el suelo. Por ello, aunque se observaron algunas tendencias con fósforo, pH, nitrógeno y potasio, estas no permiten establecer relaciones concluyentes. Así, la acumulación de carbono orgánico del suelo en los sistemas agroforestales evaluados parece responder principalmente a la distribución vertical de la materia orgánica y a las condiciones físicas del perfil edáfico, más que a una sola propiedad química del suelo.

## V. CONCLUSIÓN

1. El carbono almacenado en la biomasa aérea fue mayor en el sistema cacao + pino chuncho (121.73 t/ha) en comparación con cacao + bolaina blanca (78.48 t/ha).
2. El carbono orgánico del suelo fue mayor en cacao + bolaina blanca, con 102.09 t C/ha, frente a 66.87 t C/ha en cacao + pino chuncho, lo que evidencia un mayor almacenamiento de carbono edáfico en el sistema con bolaina blanca.
3. Las propiedades fisicoquímicas del suelo mostraron características similares entre los sistemas evaluados: la textura fue franco arcilloso; los valores de pH oscilaron entre 4.82 y 5.21 en cacao + pino chuncho, y entre 5.52 y 5.77 en cacao + bolaina blanca; la materia orgánica varió entre 2.59% y 3.82%; el nitrógeno, entre 0.129% y 0.191%; y el fósforo, entre 7.085 y 9.183 ppm. Respecto al potasio, este se situó entre 116.23 y 189.68 ppm en el sistema con pino chuncho, mientras que en el de bolaina blanca alcanzó valores mayores, ubicándose entre 165.68 y 280.32 ppm.
4. No se encontraron correlaciones significativas entre el carbono almacenado en la biomasa vegetal y las propiedades fisicoquímicas del suelo, dado que todos los p-valores fueron superiores a 0.05. En el sistema cacao + pino chuncho, la mayor correlación positiva se registró con el fósforo ( $r = 0.650$ ), mientras que la menor se presentó con el limo ( $r = -0.337$ ). Por su parte, en el sistema cacao + bolaina blanca, la correlación más alta se observó con la densidad aparente ( $r = 0.863$ ), valor cercano a la significancia estadística; mientras que la menor correspondió a la arcilla ( $r = -0.796$ ). Estos resultados sugieren ciertas tendencias de asociación; sin embargo, no constituyen relaciones estadísticamente concluyentes.
5. El carbono orgánico del suelo se correlacionó positiva y significativamente con la materia orgánica en los sistemas cacao + pino chuncho ( $r = 0.935$ ;  $p < 0.001$ ) y cacao + bolaina blanca ( $r = 0.995$ ;  $p < 0.001$ ). Además, la densidad aparente mostró relación negativa significativa en el sistema cacao + bolaina blanca ( $r = -0.703$ ;  $p = 0.003$ ); por el contrario, las propiedades químicas no presentaron correlaciones significativas.

## **VI. PROPUESTAS A FUTURO**

1. Para mejorar la robustez estadística, se recomienda ampliar el número de subparcelas y considerar estratos basados en la edad de los árboles, intensidad de manejo, pendiente y cobertura del dosel. Esto ayudaría a reducir la variabilidad interna observada y a capturar patrones más claros en la relación entre el carbono y el suelo.
2. Incorporar mediciones de carbono en raíces y necromasa, con el propósito de obtener una valoración más completa del carbono total almacenado en los sistemas agroforestales.
3. Se recomienda complementar los análisis con indicadores biológicos del suelo, como biomasa microbiana, respiración y fauna edáfica, ya que estos pueden explicar de mejor manera las diferencias observadas en la estabilidad del carbono orgánico.
4. Incrementar el número de subparcelas y repeticiones, a fin de reducir la variabilidad interna y obtener estimaciones más robustas del carbono almacenado en la biomasa y el suelo.
5. Realizar muestreos en diferentes épocas del año, especialmente durante los periodos seco y húmedo, con el fin de disminuir el efecto estacional sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la dinámica del carbono.

## VII. REFERENCIAS

- Almendros, G., & González Pérez, J. (2025). Soil Organic Carbon Sequestration Mechanisms and the Chemical Nature of Soil Organic Matter—A Review. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su17156689>
- Alvarado, J., Andrade, H. J. & Segura, M. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de Café (*Coffea arabica* L.) en el Municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*, 16 (1), 21-31. <https://www.redalyc.org/comocitar.ou?id=423939619002>
- Andrade, H. J. & Segura Madrigal, M. (2025). *Captura de carbono orgánico en suelos: conceptos, métodos y elementos de proyectos de mitigación del cambio climático*. (1ª Ed.). Editorial Universidad del Tolima. <https://repository.ut.edu.co/handle/001/4111>
- Añazco Romero, M., & Fernández Gómez, N. (2021). Fijación de carbono en sistemas agroforestales gestionados por pequeños productores de los Andes del Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 11(2), 32–42. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/1089>
- Aparicio, J. (2009). *Evaluación de sistemas agroforestales en la comunidad de Capellanía del municipio de Coroico - La Paz*. [Tesis pregrado, Universidad Mayor de San Andrés]
- Arévalo Delgado, C. D., Jumbo Salazar, C.A. & Ramírez Cando, L. J. (2018). Medición de carbono del estrato arbóreo del bosque natural Tinajillas-Limón Indanza, Ecuador. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 27 (1), 51-63. <https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.04>
- Baccini, A., Walker, W., Carvalho, L., Farina, M., Sulla Menashe, D. & Houghton, R. A. (2017). Los bosques tropicales son una fuente neta de carbono según mediciones de ganancia y pérdida en la superficie. *Science*, 358 (6360), 230-234. <https://doi.org/10.1126/science.aam5962>
- Becerra, M. (2018). *Agroforestería como una propuesta de agricultura sostenible en ecosistemas amazónicos: caso de estudio distrito de Santa Ana*. [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú] <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/12311>

- Bradley, S., & Ghimire, C. (2024). Design of an Ultrasound Sensing System for Estimation of the Porosity of Agricultural Soils. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 24. <https://doi.org/10.3390/s24072266>.
- Brockhoff, E. G., Barbaro, L., & Castagneyrol, B. (2017). Biodiversidad forestal, funcionamiento del ecosistema y provisión de servicios ecosistémicos. *Biodivers Conserv* 26, 3005–3035 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1453-2>
- Cabudivo Coquinche, K. (2017). *Secuestro de CO2 y producción de oxígeno en árboles urbanos de la Av. Abelardo Quiñones - distrito San Juan Bautista, Loreto - Perú, 2016*. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. <http://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/4694>
- Calderón-Medina, C. L., Bautista-Mantilla, G. P., & Rojas-González, S. (2018). *Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta*. Orinoquia, 22(2). Universidad de los Llanos.
- Cargua Catagña, F. E., Rodríguez Llerena, M. V., Gualpa Calva, M. A. & Montenegro Córdova, G. B. (2013). *Elaboración de un inventario florístico multipropósito con énfasis en el contenido de carbono de las diferentes clases de uso de tierra, parroquia Achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo*. [Archivo PDF]. <https://agris.fao.org/search/en/providers/125028/records/6748980c7625988a371e33b7>
- Casanova, M., Tapia, E., Seguel, O., & Salazar, O. (2016). Direct measurement and prediction of bulk density on alluvial soils of central Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 76, 105-113. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392016000100015>
- Churampi Casas, B. S. (2017). *Cuantificación de la captura de carbono en la biomasa aérea de la guayaba (Psidium guajava L.) en el Fundo Conde Vargas, Cajabamba, Cajamarca*. [Tesis de Postgrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/1918>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. BC, Vieilledent, G. (2015). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190.

- Clemente Arenas, E. R. (2021). *Captura de carbono en sistemas agroforestales en el Perú. Revista Forestal del Perú*, 36(2), 180-196.
- Da Silva, M., Barreto Garcia, P., Marques Monroe, P. H., Gervasio Pereira, M., da Silva Rodrigues Pinto, L. A. & Nunes, M. R. (2025). Physically protected carbon stocks in a Brazilian Oxisol under homogeneous forest systems. *Geoderma Regional, Volume 40*. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00915>
- Díaz Arteaga, L. (2020). *Estimación de la captura de carbono en dos sistemas agroforestales de café en la provincia de Rioja, San Martín – Perú*. [Tesis de Pregrado, Universidad Católica Sedes Sapientiae]
- Escalona, F. C. P.; Aldrete, A.; Guerrero, A. G.; González, A. M. F.; Alcalá, V. M. C., y Huerta, H. V. (2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de pinus greggii Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(3), 251-254.
- Espinoza Domínguez, W., Krishnamurthy, L., Vázquez Alarcón, A., & Torres Rivera, A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), 57-70.
- Fasanando, L. L. (2015). *Propiedades químicas, físicas y biológicas en cuatro sistemas de uso de suelo en la localidad de Cayena, departamento San Martín*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/f29a0ae4-ea9b-4831-b19e-c1b4675b0323>
- Fernández Ríos, E. B. (2024). *Propiedades fisicoquímicas y biológicas en tres tipos de sistemas de uso del suelo en el caserío Cajatambo – Uchiza – Tocache – San Martín* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/e94da8e5-b808-4e8f-b916-fbd46d2a83b5>
- Flores Silva, A. (2013). *Situación actual de la reforestación con sistemas agroforestales para captura de carbono, en tres comunidades de la carretera Iquitos - Nauta, región Loreto*. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana] <http://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/1801/T.pdf>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6e5e1fa9-ef55-4198-9160-fa580483f991/content>

- García, S., Kaminska, S. & Maroto-Valer, M. (2012). Almacenamiento subterráneo de dióxido de carbono en formaciones salinas. *Actas de la Institución de Ingenieros Civiles - Gestión de Residuos y Recursos*, 163 (2), 77–88. <https://doi.org/10.1680/warm.2010.163.2.77>
- Ghosh, A., Bhattacharyya, R., Meena, M., Dwivedi, B., Singh, G., Agnihotri, R., & Sharma, C. (2018). Long-term fertilization effects on soil organic carbon sequestration in an Inceptisol. *Soil & Tillage Research*, 177, 134-144. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.006>
- Gómez Lázaro, F. (2022). *Estimación de carbono almacenado en sistemas Agroforestales de Café, Distrito de Anco - La Mar, Región Ayacucho, 2019*. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión] <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2610>
- Gong, S., Liu, S., Li, F., Xu, G., Chen, J., Jia, L. & Shi, Z. (2025). Natural forests vs. plantations: A meta-analysis of consequences for soil organic carbon functional fractions. *Journal of environmental management*, Volumen 377. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124673>
- Gong, S., Liu, S., Li, F., Xu, G., Chen, J., Jia, L. & Shi, Z. (2025). Natural forests vs. plantations: A meta-analysis of consequences for soil organic carbon functional fractions. *Journal of environmental management*, Volumen 377. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124673>
- González, M., Etchevers, B., Hidalgo, M. (2008). Carbono en suelos de ladera: Factores que deben de considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*. 42(7).
- Hernández Núñez, H. E., Andrade, H. J., Suárez Salazar, J. C., Sánchez, J. R., Gutiérrez, D. R., Gutiérrez García, G. A., Trujillo Trujillo, E., & Casanoves, F. (2021). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en los Llanos Orientales de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 69 (1), 352-368. <https://dx.doi.org/10.15517/rbt.v69i1.42959>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6.ª edición). McGraw-Hill España.

- Heshmati, H. M. (2021). *Impacto del cambio climático en la vida*. Cuestiones ambientales y desarrollo sostenible. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94538>
- Huamán Mendoza, J. H. (2021). *Influencia de los sistemas de uso en la calidad de suelo sector Cora Cora, distrito Luyando, provincia de Leoncio Prado* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/029ecdee-18b7-418c-93a1-f71657ea4d34>
- Hurtado, C., Corte, C. & Triana, M. (2017). Estimación del carbono almacenado en el bosque natural en la cuenca media - baja. Municipio de Río Quito Chocó, Colombia. *Ingeniería e Innovación*, 5(1), 32-42. <https://doi.org/10.21897/23460466.1102>
- IPCC (2013). *Glosario: Cambio climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del IPCC*. Cambridge University Press.
- Jara Sánchez, R. A. (2016). *Almacenamiento de carbono en el suelo en dos tipos de sistemas agroforestales cacao (Theobroma cacao L.) y café (Coffea arábica L.) en Hermilio Valdizán*. [Tesis pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva] <https://hdl.handle.net/20.500.14292/1363>
- Juep Peas, G. M. & Alarcon Loayza, J. K. (2024). *Estimación de la captura de carbono en el bosque de la comunidad nativa Huasta, distrito de Awajún*. [Tesis de Pregrado, Universidad Católica Sedes Sapientiae]. <https://hdl.handle.net/20.500.14095/3016>
- Larrea Aguinaga, G. (2007). *Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de combinaciones agroforestales de Theobroma cacao L. & determinación de la ecuación alométrica para el cacao*. [Tesis de Postgrado, Universidad Nacional Agraria La Molina] <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/1152>
- Lewis, S. L., López González, G., Sonké, B., Affum Baffoe, K., Baker, T. R., Ojo, L. O., Phillips, O. L., Reitsma, J. M., White, L., Comiskey, J.A., K, Marie-Noël Djuikou, K., Ewango, C., Feldpausch, T. R., Hamilton, A. C., Gloor, M., Hart, T., Hladik, A., Lloyd, J., Lovett, J. C. & Wöll, H. (2013). Aumento del almacenamiento de carbono en bosques tropicales africanos intactos. *Naturaleza*, 457 (7232), 1003–1006. <https://doi.org/10.1038/nature07771>
- Loguercio, G. A., Simon, A., Winter, A. N., Ivancich, H., Reiter, E. J., Caselli, M., Heinzle, F.

- G., Leuschner, C. & Walentowski, H. (2024). Densidad y secuestro de carbono en los bosques templados del norte de la Patagonia, Argentina. *Frontiers in Forests and Global Change*. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1373187>
- Machado, R., & Serralheiro, R. (2017). Soil Salinity: Effect on Vegetable Crop Growth. Management Practices to Prevent and Mitigate Soil Salinization. *Horticulturae*, 3, 30. <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020030>
- Mebrate, A., Kippie, T., Zeray, N. & Haile, G. (2022). Selected physical and chemical properties of soil under different agroecological zone in Gedeo Zone, Southern Ethiopia. *Heliyon*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12011>
- Ministerio Nacional del Ambiente (MINAM). (2009). Identificación de metodologías existentes para determinar stock de carbono en ecosistemas forestales.
- Mitchell, G. R. (2017). Climate Change and Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 12, 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.08.033>
- Molina, D. A., Moreno, A. S., & Navia, J. F. (2021). *Evaluación de propiedades físico-químicas en diferentes usos y manejos de suelo, región Altoandina de Pasto*. Universidad de Nariño. <https://sired.udenar.edu.co/5974/>
- Mondragón Gil, G. L. (2019). *Carbono total almacenado en una plantación de Theobroma cacao L. en condiciones de Ceja de Selva - Bellavista - Jaén*. [Tesis pregrado, Universidad Nacional de Jaén] <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/122>
- Moreno, A. E., & Navorio, C. A. (2004). *Caracterización biofísica y suelos de los sistemas agroforestales de café bajo sombra en la zona del Pacífico de Nicaragua: Uso y efectividad de los nutrientes* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional UNA. <https://repositorio.una.edu.ni/1929/>
- Negash, M., & Starr, M. (2015). Biomass and soil carbon stocks of indigenous agroforestry systems on the south-eastern Rift Valley escarpment, Ethiopia. *Plant and Soil*, 393(1–2), 95–107. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2469-6>
- Nieto Montecillo, J. J. (2015). *Propiedades químicas y carbono orgánico almacenado en el suelo de tres sistemas de uso de la tierra en el distrito Nuevo Progreso, región San Martín*. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]

<https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/c6504ebc-da55-431c-9d44-b9109ea5a5b7/content>

- Oshunsanya, S. (2019). *pH del suelo para la disponibilidad de nutrientes y el rendimiento de los cultivos*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/68057>
- Pardé, M. 1. (1980). Commonwealth Forestry Bureau. *Forest Biomass Forestry*, 8.
- Pardos, J. A. (2016). *Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono: Un triángulo de relaciones mutuas*. Sociedad Española de Ciencias Forestales. [https://secforestales.org/sites/default/files/archivos/libropardos\\_definitivo\\_171221.pdf](https://secforestales.org/sites/default/files/archivos/libropardos_definitivo_171221.pdf)
- Parrales, J. J. (2022). *Efectos de los sistemas agroforestales sobre la fertilidad de los suelos del sitio Ramo Grande, parroquia La América, cantón Jipijapa* [Trabajo de titulación, Universidad Estatal del Sur de Manabí]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/4041>
- Patiño, S., Suárez, L., Andrade, H. & Segura, M. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. Vol. 9, Núm. 2 (2018)
- Peña, Y., Rodríguez, L. (2018). Efecto de diferentes niveles de diversidad microbiana del suelo en la relación simbiótica planta – hongo Micorrízico Arbuscular. In Universidad distrital Francisco Jose de Caldas. <http://hdl.handle.net/11349/14010>
- Peralta Vásquez, M. A. (2022). *Estimación de carbono almacenado en la biomasa aérea del bosque montano Los Lanches, Chota – Perú*. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Autónoma de Chota] <https://hdl.handle.net/20.500.14142/199>
- Piponiot, C., Cogné, M., Freycon, V., Thoumazeau, A., Gusmão, M. & Peltier, R. (2025). Los sistemas agroforestales tradicionales de Timor-Leste pueden almacenar grandes cantidades de carbono tanto en el suelo como en la biomasa. *Agroforestry Systems*, 99 (6). <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01222-8>
- Pocomucha, V. S., Alegre, J., & Abregú, L. (2016). Análisis socioeconómico y carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Huánuco. *Ecología Aplicada*, 15(2).

- Poveda, V., Orozco, L., Medina, C., Cerda, R., & López, A. (2013). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao en Waslala, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, 49, 1-12.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2007). *Informe sobre Desarrollo Humano 2007-2008: La lucha contra el cambio climático: Solidaridad frente a un mundo dividido*. [Archivo PDF]. <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/Publicaciones/2010/7709.pdf>
- Rahman, N., Giller, K., De Neergaard, A., Magid, J., Van De Ven, G. & Bruun, T. (2020). The effects of management practices on soil organic carbon stocks of oil palm plantations in Sumatra, Indonesia. *Journal of environmental management*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111446>
- Rajeev, J. & Hukum, S. (2020). Potencial de secuestro de carbono en ecosistemas forestales perturbados y no perturbados: una herramienta para mitigar el cambio climático. *Revista Africana de Ciencia y Tecnología Ambiental*, 14 (11), 385–393. <https://doi.org/10.5897/ajest2020.2920>
- Ramírez, A. (1997). *Ecología Aplicada*. Fundación Universidad de Bogotá. Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- Rengifo Mallqui, M. S. (2017). *Almacenamiento de carbono en el suelo del sistema agroforestal, guaba (Inga edulis Mart.), cacao (Theobroma cacao), forestal, bolaina blanca (Guazuma crinita Martius), en el centro de investigación y producción Tulumayo* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva] <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2655>
- Reyers B., Folke, C., Moore, M.L., Biggs, R. & Galaz, V. (2018). Perspectivas de los sistemas socioecológicos para navegar la dinámica del Antropoceno. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2018. 43:267–89 <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085349>
- Rivera, E., Sánchez, M., & Domínguez, H. (2022). pH como factor de crecimiento en plantas. *Revista de Iniciación Científica*, 4, 101–105.
- Rodríguez Caballero, D. G. (2024). *Propiedades físico-químicas del suelo bajo plantaciones forestales nativas en áreas degradadas por la minería no metálica - Chongos Alto –*

- Huancayo. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/11068>
- Romero Salazar, F. (2015). *Determinación de la captura del carbono en dos sistemas de pastos mejorados en el distrito de San Silvestre de Cochán provincia de San Miguel - Cajamarca*. [Tesis de Postgrado, Universidad Nacional de Cajamarca] <http://hdl.handle.net/20.500.14074/1556>
- Santos Peña, M. N. (2023). *Carbono almacenado en tres sistemas de uso del suelo en el distrito de Uchiza - San Martín* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2765>
- Schwartzmann, T. M. (2019). *Cambios en la calidad del suelo en un sistema agroforestal comparado con un pastizal en Madre de Dios* [Tesis de pregrado, Universidad Científica del Sur] <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/807>
- Shabtai, I., Wilhelm, R., Schweizer, S., Höschen, C., Buckley, D., & Lehmann, J. (2023). Calcium promotes persistent soil organic matter by altering microbial transformation of plant litter. *Nature Communications*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42291->
- Silva Guera, K. & Ferreira da Fonseca, A. (2022). Fracciones de fósforo y su relación con los atributos químicos del suelo en un sistema integrado de cultivo y ganadería bajo fertilización anual con fosfatos. *Front. Sustain. Food Syst.* 6:893525. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.893525>
- Silva López, J. C., & Olaya Serrano, L. (2019). *Cuantificación de carbono almacenado en un sistema agroforestal de café (Coffea arabica L.), asociado con guaba (Inga edulis sp.), distrito Jaén – Cajamarca* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Jaén]. <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/133>
- Singh, I., Rawat, P., Kumar, A., & Bhatt, P. (2018). Soil physico-bio-chemical properties under different agroforestry systems in Terai region of the Garhwal Himalayas. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(5), 2813–2821.
- Varela Romero, A., López Pacheco, A. A., Escárcega Bobadilla, M. V., Mondragón Camarillo, L., Hayano Kanashiro, C., Vílchez Vargas, R. & Calderón, K. (2020). Evaluación del ciclo del nitrógeno en un suelo agrícola perturbado con compuestos Salfen de níquel y

zinc. *Biotecnia*, 22(3), 29-39. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i3.1134>

Taípe Rodríguez, A. J. (2019). *Secuestro de carbono de la biomasa aérea, suelo y necromasa en el paraje Ccallanapucro, Comunidad Campesina de Sacsamarca – Huancavelica*. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/5541>

Traversa, I. (2013). *Evaluación de los sistemas agroforestales del norte uruguayo, propuestas de gestión y educación*. [Tesis de Doctorado, Universidad de Huelva] <http://www.redriedial.net/referencia-bibliografica-58064.html>

Wang, W., Ingwersen, J., Yang, G., Wang, Z., & Alimu, A. (2022). Effects of Farmland Conversion to Orchard or Agroforestry on Soil Organic Carbon Fractions in an Arid Desert Oasis Area. *Forests*, 13(2), 181. <https://doi.org/10.3390/f13020181>

Zavala, J. W., Zavala, S. L., & Mansilla, L. G. (2018). Estimación de la biomasa y carbono almacenado en un sistema agroforestal del cafetal de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. *Investigación y Amazonía*, 8(5), 1-8.

Zavaleta, G. (1992). *Edafología. El suelo en relación con la producción*. Consejo Nacional de Concentración y Tecnología. Lima, Perú.

Zhang, L., Chen, M., Zong, Y., Sun, Z., Li, Y., Ding, X., & Zhang, S. (2025). Respuesta del secuestro de carbono orgánico del suelo a la adición de materia orgánica en suelos salinoalcalinos: desde la perspectiva de la estructura de los agregados del suelo y el componente de carbono orgánico. *Plant Soil* 512, 1619–1638 <https://doi.org/10.1007/s11104-024-07163-y>

**ANEXO**

**Tabla 12.** Registro de variables dasométricas y biomasa de *G. crinita* en el SAF 1

Nº SAF	Transecto	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	DAP	Altura (m)	Biomasa (kg/árbol)
1	1	0.41	27.6	21.2	360.787
1	1	0.41	24.2	20.1	264.984
1	1	0.41	21.3	20.5	210.553
1	1	0.41	21.1	22.1	222.443
1	1	0.41	23.5	19.3	240.503
1	2	0.41	25.7	15.2	226.862
1	2	0.41	23.5	20.1	250.228
1	2	0.41	22.8	17.9	210.652
1	2	0.41	29.6	21.5	419.289
1	3	0.41	20.6	18.4	177.510
1	3	0.41	22.6	18.3	211.575
1	3	0.41	28.7	21.2	389.387
1	3	0.41	35.9	19.3	549.972
1	3	0.41	34.7	21	558.858
1	4	0.41	26.1	23.2	353.257
1	4	0.41	26.3	19.7	305.664
1	4	0.41	29.9	22.5	447.026
1	4	0.41	26.9	18.7	303.589
1	5	0.41	22.4	7.4	85.930
1	5	0.41	14.3	16	75.950
1	5	0.41	17.9	15.6	114.855
1	5	0.41	19.5	15.2	132.348
1	5	0.41	25.7	19.4	287.857

**Tabla 13.** Biomasa de *T. cacao* en el SAF 1

Nº SAF	Transecto	Especie	Diámetro (cm)	Biomasa (kg/planta)
1	1	Cacao	11.4	15.3623294
1	1	Cacao	9.8	12.3934783
1	1	Cacao	11.1	14.7914522
1	1	Cacao	13.9	20.3579105
1	1	Cacao	8.1	9.45585733
1	1	Cacao	5.9	6.02923263
1	1	Cacao	7.3	8.15775476
1	1	Cacao	15.2	23.1137323
1	1	Cacao	8.6	10.2953232
1	1	Cacao	8.2	9.62205543
1	1	Cacao	14.2	20.9846453
1	1	Cacao	10.7	14.0403246
1	1	Cacao	11.1	14.7914522
1	1	Cacao	9.6	12.0358658
1	1	Cacao	11.6	15.7464453
1	1	Cacao	12	16.5230248
1	2	Cacao	10.4	13.4846453
1	2	Cacao	9.4	11.6813688
1	2	Cacao	8.6	10.2953232
1	2	Cacao	10.7	14.0403246
1	2	Cacao	11.8	16.1333529
1	2	Cacao	9.4	11.6813688
1	2	Cacao	11	14.6025868
1	2	Cacao	12.7	17.9082632
1	2	Cacao	9.4	11.6813688
1	2	Cacao	8.3	9.78910699
1	2	Cacao	9.1	11.1555493
1	2	Cacao	9.8	12.3934783
1	2	Cacao	7.2	7.99952738
1	2	Cacao	8.9	10.8090119
1	2	Cacao	10.2	13.1179034

1	2	Cacao	9.3	11.5053006
1	2	Cacao	16.3	25.5245787
1	3	Cacao	12.4	17.3105544
1	3	Cacao	9.6	12.0358658
1	3	Cacao	7.5	8.47694135
1	3	Cacao	8.4	9.95700603
1	3	Cacao	10.7	14.0403246
1	3	Cacao	10.3	13.3009005
1	3	Cacao	8.2	9.62205543
1	3	Cacao	11.5	15.5540366
1	3	Cacao	10.4	13.4846453
1	3	Cacao	10.2	13.1179034
1	3	Cacao	13.8	20.1502522
1	3	Cacao	13.1	18.7144653
1	3	Cacao	14.2	20.9846453
1	3	Cacao	12.2	16.9154339
1	3	Cacao	15.7	24.2007982
1	3	Cacao	16.2	25.3025042
1	3	Cacao	14.3	21.1948017
1	4	Cacao	9.3	11.5053006
1	4	Cacao	13.1	18.7144653
1	4	Cacao	7.2	7.99952738
1	4	Cacao	12.5	17.5091234
1	4	Cacao	8.5	10.1257467
1	4	Cacao	12.3	17.1126569
1	4	Cacao	11.8	16.1333529
1	4	Cacao	12.5	17.5091234
1	4	Cacao	11.5	15.5540366
1	4	Cacao	9.3	11.5053006
1	4	Cacao	15.2	23.1137323
1	4	Cacao	9.6	12.0358658
1	4	Cacao	7.5	8.47694135
1	4	Cacao	10.6	13.8543614

1	4	Cacao	8.6	10.2953232
1	5	Cacao	9.3	11.5053006
1	5	Cacao	9.8	12.3934783
1	5	Cacao	9.6	12.0358658
1	5	Cacao	7.1	7.84222032
1	5	Cacao	10.7	14.0403246
1	5	Cacao	12.5	17.5091234
1	5	Cacao	9.1	11.1555493
1	5	Cacao	11.4	15.3623294
1	5	Cacao	12.2	16.9154339
1	5	Cacao	8.9	10.8090119
1	5	Cacao	8.7	10.4657299
1	5	Cacao	10.1	12.9356583
1	5	Cacao	10.3	13.3009005
1	5	Cacao	10.5	13.6691336
1	5	Cacao	10.1	12.9356583
1	5	Cacao	11.5	15.5540366
1	5	Cacao	12.9	18.3100518
1	5	Cacao	10.5	13.6691336

**Tabla 14.** Biomasa de hojarasca y herbácea en SAF 1

N° SAF	Transecto	Biomasa	PFT (g)	PFM (g)	PSM (g)	Biomasa (t/ha)
1	T1	Herbácea	331	175	59	1.1159
1		Hojarasca	100	100	66	2.6400
1	T2	Herbácea	234	184	50	0.6359
1		Hojarasca	174	174	118	4.7200
1	T3	Herbácea	248	180	46	0.6338
1		Hojarasca	109	109	90	3.6000
1	T4	Herbácea	218	102	30	0.6412
1		Hojarasca	147	147	112	4.4800
1	T5	Herbácea	221	142	43	0.6692
1		Hojarasca	125	125	107	4.2800

**Tabla 15.** Densidad aparente y carbono orgánico del suelo en el SAF 1

Nº SAF	Transecto	Profundidad (cm)	DA (g/cm <sup>3</sup> )	% carbono	COS (t/ha)
1		0-10	1.467	3.712	54.462
1	T1	10-20	1.626	1.276	20.749
1		20-30	1.664	1.450	24.128
1		0-10	1.567	3.712	58.172
1	T2	10-20	1.645	1.276	20.992
1		20-30	1.689	1.450	24.492
1		0-10	1.629	3.712	60.463
1	T3	10-20	1.704	1.276	21.741
1		20-30	1.730	1.450	25.087
1		0-10	1.519	3.712	56.404
1	T4	10-20	1.634	1.276	20.852
1		20-30	1.720	1.450	24.942
1		0-10	1.423	3.712	52.838
1	T5	10-20	1.591	1.276	20.297
1		20-30	1.711	1.450	24.815

**Tabla 16.** Registro de variables dasométricas y biomasa de *S. amazonicum* en el SAF 2

N° SAF	Transecto	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	DAP (cm)	Altura (m)	Biomasa (kg/árbol)
2	1	0.49	35.40	26.40	864.54
2	1	0.49	26.10	23.10	418.61
2	1	0.49	16.20	16.70	120.22
2	2	0.49	15.70	19.90	134.19
2	2	0.49	33.00	18.70	538.40
2	2	0.49	17.10	19.40	154.65
2	2	0.49	30.70	22.10	550.39
2	2	0.49	14.80	10.80	65.86
2	2	0.49	14.50	15.00	87.20
2	2	0.49	36.90	26.40	937.49
2	3	0.49	14.80	17.10	103.13
2	3	0.49	33.80	27.00	807.43
2	3	0.49	14.20	21.00	116.25
2	3	0.49	29.50	24.30	558.59
2	3	0.49	44.30	27.30	1383.95
2	3	0.49	28.20	23.40	493.05
2	4	0.49	16.10	21.00	148.54
2	4	0.49	13.90	21.40	113.58
2	4	0.49	36.50	24.90	866.83
2	4	0.49	16.70	21.70	164.73
2	4	0.49	15.30	20.20	129.48
2	4	0.49	14.00	18.70	100.97
2	4	0.49	12.60	18.80	82.63
2	5	0.49	38.20	25.10	954.81
2	5	0.49	35.00	22.70	729.71
2	5	0.49	22.90	24.70	346.19
2	5	0.49	28.00	22.60	470.01

**Tabla 17.** Biomasa de *T. cacao* en el SAF 2

Nº SAF	Transecto	Especie	Diámetro (cm)	Biomasa (kg/planta)
2	1	Cacao	6.9	7.530
2	1	Cacao	7.7	8.800
2	1	Cacao	8.3	9.789
2	1	Cacao	7.6	8.638
2	1	Cacao	5.8	5.885
2	1	Cacao	8.2	9.622
2	1	Cacao	6.1	6.322
2	1	Cacao	8.4	9.957
2	1	Cacao	9	10.982
2	1	Cacao	9.2	11.330
2	1	Cacao	5.3	5.178
2	1	Cacao	7.1	7.842
2	1	Cacao	4.6	4.234
2	1	Cacao	5.2	5.039
2	1	Cacao	6.9	7.530
2	1	Cacao	6.1	6.322
2	2	Cacao	8.9	10.809
2	2	Cacao	7.7	8.800
2	2	Cacao	9.2	11.330
2	2	Cacao	8.4	9.957
2	2	Cacao	10.5	13.669
2	2	Cacao	7.6	8.638
2	2	Cacao	6.7	7.222
2	2	Cacao	9.8	12.393
2	2	Cacao	8.4	9.957
2	2	Cacao	6.2	6.469
2	2	Cacao	8.5	10.126
2	2	Cacao	8.1	9.456
2	2	Cacao	8.3	9.789
2	2	Cacao	4.9	4.632

2	3	Cacao	7.4	8.317
2	3	Cacao	5.8	5.885
2	3	Cacao	7.9	9.126
2	3	Cacao	6.2	6.469
2	3	Cacao	10	12.754
2	3	Cacao	5.2	5.039
2	3	Cacao	8.9	10.809
2	3	Cacao	10.1	12.936
2	3	Cacao	6.6	7.070
2	3	Cacao	4.7	4.365
2	3	Cacao	7.6	8.638
<hr/>				
2	4	Cacao	5.1	4.902
2	4	Cacao	9.2	11.330
2	4	Cacao	5.3	5.178
2	4	Cacao	7.2	8.000
2	4	Cacao	4.9	4.632
2	4	Cacao	11.6	15.746
2	4	Cacao	8.7	10.466
2	4	Cacao	7	7.686
2	4	Cacao	9.5	11.858
2	4	Cacao	5.7	5.741
2	4	Cacao	7.7	8.800
<hr/>				
2	5	Cacao	4.9	4.632
2	5	Cacao	8.7	10.466
2	5	Cacao	9.6	12.036
2	5	Cacao	10.4	13.485
2	5	Cacao	5.7	5.741
2	5	Cacao	9.2	11.330
2	5	Cacao	7.4	8.317
2	5	Cacao	7.6	8.638
2	5	Cacao	9.1	11.156

---

**Tabla 18.** Biomasa de hojarasca y herbácea en SAF 2

Nº SAF	Transecto	Biomasa	PFT (g)	PFM (g)	PSM (g)	Biomasa (t/ha)
2	T1	Herbácea	236	152	47	0.7297
2		Hojarasca	59	59	55	2.2000
2	T2	Herbácea	215	151	45	0.6407
2		Hojarasca	91	91	85	3.4000
2	T3	Herbácea	270	174	49	0.7603
2		Hojarasca	92	92	81	3.2400
2	T4	Herbácea	205	187	54	0.5920
2		Hojarasca	103	103	100	4.0000
2	T5	Herbácea	279	196	55	0.7829
2		Hojarasca	104	104	97	3.8800

**Tabla 19.** Densidad aparente y carbono orgánico del suelo en el SAF 2

Nº SAF	Transecto	Profundidad (cm)	DA (g/cm <sup>3</sup> )	% carbono	COS (t/ha)
2	T1	0-10	1.47	2.09	30.77
2		10-20	1.59	1.39	22.12
2		20-30	1.69	0.93	15.72
2	T2	0-10	1.17	2.09	24.38
2		10-20	1.31	1.39	18.30
2		20-30	1.54	0.93	14.29
2	T3	0-10	1.45	2.09	30.34
2		10-20	1.78	1.39	24.72
2		20-30	1.63	0.93	15.17
2	T4	0-10	1.50	2.09	31.31
2		10-20	1.44	1.39	20.06
2		20-30	1.58	0.93	14.70
2	T5	0-10	1.56	2.09	32.54
2		10-20	1.79	1.39	24.90
2		20-30	1.62	0.93	15.01



**Figura 17.** Delimitación de las parcelas experimentales.



**Figura 18.** Medición de altura del árbol con telémetro digital Forestry Pro II.



**Figura 19.** Medición del diámetro a la altura del pecho



**Figura 20.** Recolección de biomasa herbácea



**Figura 21.** Determinación del peso fresco de la hojarasca



**Figura 22.** Recolección de biomasa de hojarasca



**Figura 23.** Recolección de suelo en tres niveles de profundidad.



**Figura 24.** Muestras de suelo previamente rotuladas y almacenadas para análisis.



**Figura 25.** Recolección de suelo con cilindro muestreador para densidad aparente



**Figura 26.** Medición de la profundidad del suelo



**Figura 27.** Secado de muestras de suelo en estufa



**Figura 28.** Secado de biomasa herbácea y hojarasca



**Figura 29.** Peso seco de herbácea y hojarasca



**Figura 30.** Determinación del peso seco de las muestras de suelo



# ANÁLISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:	GRANDEZ SIFUENTES JOSMELL	FECHA DE REPORTE:	22/10/2025
PROCEDENCIA:	CASERIO SAN MIGUEL DE TULUMAYO	RECIBO N°:	82544923
REFERENCIA:		MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS		ANÁLISIS FÍSICO										ANÁLISIS QUÍMICO											
			Areña	Arcilla	Limo	CE	pH	Materia Orgánica	N	C	P	K <sub>2</sub> O	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	Cice	Bases Cambiables	Acidez Cambiable	Saturación de Aluminio	
			Ao	Arc	Lo									dSm	N.O.	total	Orgánico	disponible	disponible					Calcio
			CODIGO DEL LABORATORIO	REF	%	%	%	1:1	1:1	%	%	%	ppm	ppm	CAMBIABLES					Cmol(+)/kg	%	%	%	
6	1167	SAF 2 - T1	30	36	34	Franco Arcilloso	0.10	4.82	2.59	0.129	1.501	7.485	141.708	----	3.130	0.831	0.127	0.066	1.020	0.085	5.259	78.990	21.010	19.394
7	1168	SAF 2 - T2	44	28	28	Franco Arcilloso	0.20	4.79	3.39	0.169	1.966	7.285	155.532	----	3.760	0.848	0.159	0.062	1.420	0.025	6.274	76.967	23.033	22.627
8	1169	SAF 2 - T3	34	36	30	Franco Arcilloso	0.14	4.69	2.71	0.136	1.573	9.183	161.967	----	2.930	0.773	0.132	0.067	1.590	0.059	5.552	70.300	29.700	28.629
9	1170	SAF 2 - T4	44	28	28	Franco Arcilloso	0.14	4.74	3.82	0.191	2.216	7.585	189.685	----	3.970	0.619	0.193	0.061	1.454	0.017	6.314	76.709	23.291	23.022
10	1171	SAF 2 - T5	44	30	26	Franco Arcilloso	0.14	5.21	3.08	0.154	1.787	7.086	116.237	----	4.865	0.773	0.118	0.091	0.255	0.085	6.187	94.505	5.495	4.122

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.  
 Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
 TINGO MARIA  
 LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUA Y ECOTOXICOLOGIA

Mg. JIMMY ALCIDES OCAÑA REYES  
 JEFE



Figura 31. Análisis de suelo del sistema agroforestal con *S. amazonicum*



# ANÁLISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:	GRANDEZ SIFUENTES JOSMELL	FECHA DE REPORTE:	22/10/2025
PROCEDENCIA:	CASERIO SAN GREGORIO LA PLAYA	RECIBO N°	82544923
REFERENCIA:		MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE

N°	DATOS		ANÁLISIS FÍSICO											ANÁLISIS QUÍMICO										
			Arare	Arella	Limo	Clase Textural	CE	pH	Materia Orgánica	N	C	P	K <sub>2</sub> O	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	Cice	Bases Cambiables	Acidez Cambiable	Saturación de Aluminio
			Ao	Arc	Lo		d8/m	M.O.	total	Orgánico	disponible	disponible	Calcio		Magnesio	Potasio	Sodio	Aluminio	Hidrógeno	%		%	%	
			CODIGO DEL LABORATORIO	REF	%	%	%	1:1	1:1	%	%	%	ppm	ppm		CAMBIABLES			Cmol(+)/kg					
1	1162	SAF 1 - T1	36	28	36	Franco Arcilloso	0.38	5.52	2.90	0.145	1.680	6.886	165.683	6.661	5.295	1.033	0.242	0.091	0	0	--	100	0	0
2	1163	SAF 1 - T2	34	36	30	Franco Arcilloso	0.32	5.53	3.20	0.160	1.859	7.585	241.269	6.294	4.965	0.921	0.351	0.056	0	0	--	100	0	0
3	1164	SAF 1 - T3	38	28	34	Franco Arcilloso	0.32	5.53	3.27	0.163	1.894	7.884	251.528	6.780	5.375	0.863	0.445	0.097	0	0	--	100	0	0
4	1165	SAF 1 - T4	44	34	22	Franco Arcilloso	0.33	5.67	4.31	0.216	2.502	5.688	256.061	5.844	4.658	0.819	0.303	0.065	0	0	--	100	0	0
5	1166	SAF 1 - T5	30	38	32	Franco Arcilloso	0.22	5.77	3.27	0.163	1.894	5.189	280.321	6.969	5.705	0.868	0.309	0.086	0	0	--	100	0	0

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE. Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
TINGO MARIA  
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUA Y ECOTOXICOLOGÍA

Mg. JIMMY ALCIDES OCAÑA REYES  
JEFE



Figura 32. Análisis de suelo del sistema agroforestal con *G. crinita*



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA  
CON REGISTRO N° LE - 200



**INFORME DE ENSAYO**  
LABSAF PUCALLPA  
N° 119342 / SU / PC



**III. METODOLOGÍA DE ENSAYO**

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
Carbono Orgánico Total / Materia Orgánica	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.7, AS-07 2002 Determinación de materia orgánica del suelo (AS-07 Método de Walkley y Black).

**IV. CONSIDERACIONES**

- Este informe no puede ser reproducido total, ni parcialmente sin la autorización de LABSAF y del cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo
- Los resultados se aplican a las muestras, tales como se recibieron
- Este documento es válido sólo para el producto mencionado anteriormente.
- El Laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente pueda afectar la validez de los resultados.
- Medición de pH realizada a 25 °C.
- Medición de Conductividad Eléctrica realizada a 25 °C.

(\*\*\*) Este dato ha sido proporcionado por el cliente, por lo que el laboratorio no es responsable de dicha información.

**V. AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO**

- El presente Informe de ensayo ha sido autorizado por: José Quintanilla Rosas - Responsable LABSAF Pucallpa del LABSAF - PUCALLPA



\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
FIN DE INFORME DE ENSAYO



Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliare  
Acreditado con la Norma  
NTP-ISO/IEC 17025:2017  
LABSAF Pucallpa

Dirección: Carretera Federico Basadre km 44, Coronel Portillo, Ucayali  
Email: labsafpucallpa@inia.gob.pe

