

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA**

**MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL**



**CARBONO EN BIOMASA AÉREA, SUELO Y DIVERSIDAD  
BIOLÓGICA ARBÓREA EN LA COMUNIDAD SANTA ISABEL,  
YUYAPICHIS-HUÁNUCO 2024**

**Tesis**

**Para optar el Grado Académico de**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA,**

**MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL**

**PRESENTADO POR:**

**JUAN PABLO FERREYROS SANCHEZ**

**Asesor**

**Dr. DR. LUIS EDUARDO ORE CIERTO**

**Tingo María – Perú**

**2025**



**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. 010-2025-UPG-FRNR-UNAS**

En la ciudad universitaria, siendo las 07:00 p.m. del viernes 12 de setiembre del 2025, reunidos virtualmente vía Microsoft Teams, se instaló el Jurado Calificador a fin de proceder a la sustentación de la tesis titulada:

**"CARBONO EN BIOMASA AÉREA, SUELO Y DIVERSIDAD BIOLÓGICA  
ARBÓREA EN LA COMUNIDAD SANTA ISABEL, YUYAPICHIS- HUÁNUCO  
2024"**

A cargo del candidato al Grado de Maestro en Ciencias en Agroecología, mención: Gestión Ambiental **FERREYROS SANCHEZ, JUAN PABLO**

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 **09:00 p.m.** el presidente dio por culminada la sustentación; procediéndose a la suscripción de la presente acta por parte de los miembros del jurado, quienes dejan constancia de su firma en señal de conformidad.

.....  
Dr. LADISLAO RUIZ RENGIFO  
Presidente del Jurado

.....  
Ing. M.Sc. FRANKLIN DIONISIO MONTALVO  
Miembro del Jurado

.....  
Dr. DAVID PRUDENCIO QUISPE JANAMPA  
Miembro del Jurado

.....  
Dr. LUIS EDUARDO ORÉ CIERTO  
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 recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 439 - 2025 - 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:

Table with 2 columns: Tipo de documento, and 2 rows: Tesis, Trabajo de Suficiencia Profesional

Table with 4 columns: TÍTULO, AUTOR, SIMILITUD, and CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL. Row 1: CARBONO EN BIOMASA AÉREA, SUELO Y DIVERSIDAD BIOLÓGICA ARBÓREA EN LA COMUNIDAD SANTA ISABEL, YUYAPICHIS-HUÁNUCO 2024, JUAN PABLO FERREYROS SANCHEZ, 10 % Diez, Menor a 20 %

Tingo María, 30 de diciembre de 2025.

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

# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

## ESCUELA DE POSGRADO

### MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA

#### MENCIÓN GESTIÓN AMBIENTAL



## CARBONO EN BIOMASA AÉREA, SUELO Y DIVERSIDAD BIOLÓGICA ARBÓREA EN LA COMUNIDAD SANTA ISABEL, YUYAPICHIS-HUÁNUCO 2024

Ejecutor	: Ing. Ferreyros Sánchez, Juan Pablo
Asesores	: Dr. Luis Eduardo Oré Cierro M. Sc. García Soria, Diego Gonzalo
Programa de Investigación	: Diversidad biológica
Línea de Investigación	: Biodiversidad, ecosistemas
Eje temático de Investigación	: Determinar los diferentes tipos de biodiversidad en los ecosistemas
Lugar de Ejecución	: Comunidad Santa Isabel, Huánuco
Duración del Trabajo	: 6 meses
Financiamiento	: S/. 18 660,00
	FEDU : -
	Propio : S/. 18 660,00
	Otros : -

**Tingo María – Perú**

## DEDICATORIA

A Dios, fuente de sabiduría y fortaleza, quien me ha guiado con su luz en cada paso de este camino. Sin su amor y su gracia infinita, este logro no habría sido posible. Gracias por darme la fuerza, la paciencia y la visión para alcanzar esta meta.

A mi querida esposa Betsy, cuyo amor incondicional, apoyo constante y sacrificios han sido la base de mis logros. Este logro es tan suyo como mío, y siempre estaré agradecido por todo lo que ha hecho por mí.

A mis hijos Mateo, Marco y Dana, mi mayor fuente de inspiración y alegría. Gracias por su amor, por su paciencia y por ser la razón de mi esfuerzo diario. Este logro es también suyo, porque cada paso que doy lo hago con ustedes en mi corazón. Prometo seguir trabajando para ser un ejemplo para ustedes, siempre.

A mis padres Jorge y Lidmer, por enseñarme con su ejemplo que los sueños no se alcanzan solo con inteligencia, sino con esfuerzo, paciencia y corazón. Gracias por ser mi raíz y mi impulso, por darme la fuerza en los momentos difíciles y la calma en los de duda. Este logro es también suyo.

## AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento:

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por haberme dado la oportunidad para forjarme como profesional.
- A los docentes de la Escuela de Posgrado de la Maestría en Agroecología y Gestión Ambiental, quienes con su sabiduría, dedicación y compromiso han sido fuente constante de aprendizaje y crecimiento. Gracias por compartir su conocimiento, por inspirar mi pasión por la agroecología y por guiarme en este proceso académico. Esta tesis es, en gran parte, un reflejo de su esfuerzo y enseñanza.
- Al Dr. Luis Eduardo Ore Cierzo, mi más sincero agradecimiento por su guía, apoyo y confianza a lo largo de este proceso. Su valiosa orientación, paciencia y conocimiento han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.
- Al M.Sc. Diego García, mi agradecimiento por su guía y apoyo a lo largo de este proceso. Gracias por su valiosa orientación y por brindarme siempre los recursos y consejos necesarios para avanzar en esta tesis.
- Al presidente del jurado y a los miembros del jurado, mi más profundo agradecimiento por su tiempo, dedicación y por brindar su valiosa orientación y evaluación a este trabajo. Sus comentarios y recomendaciones han enriquecido enormemente esta investigación, y su contribución ha sido esencial para llevarla a su culminación.
- A los compañeros y amigos que participaron, junto con el equipo de Bari Wesna por la oportunidad de desarrollar este proyecto, siendo un canal de aprendizaje en conjunto y desarrollo profesional.

## ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCION.....	1
1.1. Objetivo general .....	2
1.2. Objetivos específicos .....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Marco teórico .....	3
2.1.1. Carbono .....	3
2.1.2. Ciclo del Carbono.....	4
2.1.3. Carbono orgánico del suelo .....	4
2.1.4. Carbono de biomasa .....	5
2.1.5. Carbono del suelo .....	6
2.1.6. Necromasa .....	7
2.1.7. Estratos vegetales .....	7
2.1.8. Valor económico por captura de carbono .....	8
2.2. Estado del arte.....	9
2.2.1. Nacionales .....	9
2.2.2. Internacionales.....	13
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	18
3.1. Lugar de ejecución.....	18
3.1.1. Ubicación política .....	18
3.2. Material y métodos .....	19
3.2.1. Materiales y equipos.....	19
3.2.2. Metodología .....	20
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	32
4.1. Carbono en la biomasa aérea y suelo en la Comunidad Santa Isabel.....	32
4.2. Diversidad alfa ( $\alpha$ ) y diversidad beta ( $\beta$ ) en los estratos de la comunidad Santa Isabel .....	37
4.2.1. Diversidad alfa .....	37
4.2.2. Diversidad beta.....	40
4.3. Relación entre el carbono presente en la biomasa aérea y la Diversidad alfa ( $\alpha$ ).....	49
4.4. Pago por servicios ambientales generados por la captura de carbono por deforestación evitada en los bosques de la comunidad Santa Isabel .....	51

V. CONCLUSIONES .....54

VI. PROPUESTAS A FUTURO ..... 55

VII. REFERENCIAS .....56

ANEXO ..... 63

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Carbono almacenado en la biomasa aérea de fustales, maduros .....	32
2. Carbono almacenado (t/ha) en la biomasa de hojarasca y herbácea.....	34
3. Medidas de resumen de carbono orgánico almacenado en el suelo (t/ha).....	36
4. Índices de diversidad alfa .....	38
5. Índice de similitud de Jaccard .....	40
6. Índice de similitud de Morisita.....	46
7. Correlación de Spearman del carbono almacenado y diversidad alfa .....	49
8. Carbono almacenado y CO <sub>2</sub> total (t/ha).....	52

## ÍNDICES DE FIGURAS

Figura	Página
1. Carbono almacenado en hojarasca y herbácea .....	35
2. Carbono orgánico en el suelo (t/ha) a tres profundidades .....	37
3. Diversidad alfa en las subparcelas .....	39
4. Análisis de componentes principales .....	42
5. Análisis Clúster de Jaccard .....	45
6. Análisis de clúster de Morisita .....	48
7. Resultados del análisis del carbono orgánico del suelo.....	65
8. Constancia de identificación botánica.....	66
9. Memoria descriptiva de clasificación de coberturas .....	70
10. Mapa de clasificación de cobertura en la Comunidad Santa Isabel .....	71
11. Coordenadas de las muestras de las parcelas del bosque en la Comunidad Santa Isabel.....	72
12. Delimitación de las parcelas de 25 m x 25 m.....	73
13. Establecimientos de los cuadrantes de 1 x 1 m para herbácea y hojarasca .....	73
14. Extracción de muestras de suelos.....	74
15. Medición del DAP de los arboles.....	74
16. Colecta de muestras de hojarasca y herbácea.....	75
17. Pesado de las muestras en estado fresco .....	75
18. Muestras recolectadas en todas las parcelas.....	76
19. Secado en estufa de las muestras.....	76
20. Peso eco de la muestra de hojarasca y herbácea .....	77

## RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el carbono almacenado, la diversidad florística alfa y beta, y la relación entre ambas variables en el bosque de Santa Isabel, Huánuco, Perú. Se establecieron 18 parcelas permanentes de  $25 \times 25$  m (0,0625 ha cada una), en las que se cuantificó la biomasa aérea, hojarasca, biomasa herbácea y carbono orgánico del suelo, así como la composición y abundancia de especies vegetales. El carbono total alcanzó 254,36 tC/ha (equivalentes a 932,74 tCO<sub>2</sub>/ha), distribuido principalmente en biomasa aérea (141,93 tC/ha) y suelo (108,70 tC/ha), mientras que la hojarasca (2,55 tC/ha) y la biomasa herbácea (1,18 tC/ha) representaron fracciones menores. La diversidad alfa mostró valores de Simpson entre 0,77 y 0,98, Shannon entre 1,96 y 3,69, y Margalef entre 2,61 y 8,22, lo que indica diversidad moderada-alta; la diversidad beta presentó, en su mayoría, valores de Jaccard inferiores a 0,30, reflejando baja similitud florística entre parcelas. El análisis de correlación evidenció que las áreas con mayor diversidad tendieron a almacenar más carbono, especialmente en biomasa aérea y suelo. El valor económico estimado del carbono almacenado en los bosques de Santa Isabel fue de USD 7 345,96 por hectárea. Los resultados confirman que el bosque de Santa Isabel es un importante sumidero de carbono, con alta diversidad florística y valor económico significativo, por lo que su conservación y manejo sostenible son esenciales para mantener estos servicios ecosistémicos.

**Palabras claves:** carbono almacenado, diversidad alfa, diversidad beta, valor económico

## ABSTRACT

The present study aimed to evaluate stored carbon, alpha and beta floristic diversity, and their relationship in the Santa Isabel forest, Huánuco, Peru. A total of 18 permanent plots of 25 × 25 m (0.0625 ha each) were established, where aboveground biomass, litter, herbaceous biomass, and soil organic carbon were quantified, along with the composition and abundance of plant species. Total carbon reached 254.36 tC/ha (equivalent to 932.74 tCO<sub>2</sub>/ha), distributed mainly in aboveground biomass (141.93 tC/ha) and soil (108.70 tC/ha), while litter (2.55 tC/ha) and herbaceous biomass (1.18 tC/ha) represented minor fractions. Alpha diversity showed Simpson values between 0.77 and 0.98, Shannon values between 1.96 and 3.69, and Margalef values between 2.61 and 8.22, indicating moderate to high diversity; beta diversity mostly presented Jaccard values below 0.30, reflecting low floristic similarity among plots. Correlation analysis revealed that areas with higher diversity tended to store more carbon, especially in aboveground biomass and soil. The estimated economic value of the carbon stored in the Santa Isabel forests was USD 7,345.96 per hectare. These results confirm that the Santa Isabel forest is an important carbon sink, with high floristic diversity and significant economic value, highlighting the need for its conservation and sustainable management to maintain these ecosystem services.

**Keywords:** stored carbon, alpha diversity, beta diversity, economic value

## I. INTRODUCCION

A nivel internacional los bosques no solo almacenan carbono y conservan biodiversidad, también generan servicios ambientales con un alto valor económico, como la regulación hídrica, la provisión de alimentos, fibras y la captura de carbono. Sin embargo, a nivel mundial, estos servicios suelen ser poco valorados económicamente, lo que provoca que se subestime su importancia frente a actividades extractivas de mayor rentabilidad inmediata. Esta falta de valoración limita la inversión en conservación y dificulta la integración de los bosques en las estrategias de desarrollo sostenible.

En el Perú, los bosques amazónicos representan una de las principales reservas de carbono y de diversidad biológica del planeta. Sin embargo, el país enfrenta serias dificultades para asignar un valor económico justo a los servicios ecosistémicos que proveen, especialmente en lo relacionado al carbono y a la diversidad arbórea. La ausencia de mecanismos claros de valoración y compensación contribuye a que se prioricen actividades como la tala ilegal o la expansión agrícola, en lugar de fortalecer la conservación y el manejo sostenible. A pesar de la existencia de programas de reforestación y proyectos vinculados a REDD+, todavía se carece de información local que permita medir y valorar el carbono y la biodiversidad de manera integrada con la realidad de las comunidades.

En la comunidad de Santa Isabel, la degradación de los bosques ha generado pérdida de carbono, de fertilidad del suelo y de especies arbóreas valiosas, lo que también se traduce en pérdidas económicas para los pobladores. Aunque los comuneros han comenzado procesos de reforestación y sistemas agroforestales, aún no cuentan con información técnica que permita cuantificar y valorar económicamente los beneficios de estas acciones. La falta de una línea base que relacione carbono, suelo, diversidad y valoración económica limita el acceso a incentivos o programas de compensación ambiental, y reduce la posibilidad de que la comunidad obtenga beneficios directos por sus esfuerzos de conservación ¿Cuánto será el contenido de carbono en biomasa aérea, suelo y diversidad biológica arbórea en la Comunidad Santa Isabel, Yuyapichis-Huánuco?

La investigación se justifica porque permitirá conocer la relación entre el carbono en la biomasa aérea, el carbono orgánico del suelo y los diferentes estratos vegetales presentes en la comunidad nativa Santa Isabel. Actualmente resulta imposible proyectar el potencial de reforestación o de regeneración natural sin contar con estudios técnicos previos que generen

información de base. Este levantamiento de información en campo es un requisito fundamental para acceder al mercado de los bonos de carbono, ya que brinda credibilidad y transparencia al cuantificar el stock inicial y monitorear la captura a lo largo del tiempo.

Contar con una línea base sobre el carbono almacenado en la vegetación y el suelo, así como sobre la diversidad arbórea, aportará conocimiento científico aplicable a la gestión local. Este conocimiento no solo permitirá valorar el papel de la comunidad en la mitigación del cambio climático, sino que también fortalecerá su capacidad de acceder a mecanismos de compensación por servicios ambientales. La disponibilidad de datos técnicos dará sustento a los esfuerzos comunitarios de reforestación y sistemas agroforestales, lo que incrementa las oportunidades de generar ingresos mediante la venta de bonos de carbono y, al mismo tiempo, mejora el bienestar social de las familias.

Asimismo, el estudio permitirá identificar cómo la captura de carbono se relaciona con la conservación de la biodiversidad y con el mantenimiento de la fertilidad de los suelos, aspectos claves para la producción agrícola y forestal de la comunidad. Los resultados servirán como insumo para políticas y prácticas de manejo que sean sostenibles en el tiempo, aportando beneficios ambientales, sociales y económicos. De esta manera, la investigación contribuirá no solo al ámbito científico, sino también a la gestión local y a la toma de decisiones comunitarias, con posibilidades de ser replicada en otras áreas forestales con problemáticas similares.

### **1.1. Objetivo general**

- Estudiar el carbono en la biomasa aérea, en el suelo y la diversidad biológica a nivel de flora en la comunidad Santa Isabel, Yuyapichis - Huánuco, 2024

### **1.2. Objetivos específicos**

- Estimar el carbono en la biomasa aérea y suelo en la Comunidad Santa Isabel, Yuyapichis-Huánuco, 2024
- Determinar la diversidad alfa ( $\alpha$ ) y diversidad beta ( $\beta$ ) a nivel de flora de la comunidad Santa Isabel, Yuyapichis-Huánuco, 2024
- Determinar el nivel de relación entre el carbono presente en la biomasa aérea y la Diversidad alfa ( $\alpha$ ).
- Determinar el pago por servicios ambientales generados por la captura de carbono por deforestación evitada en los bosques de la comunidad Santa Isabel, Yuyapichis-Huánuco, 2024.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Marco teórico

#### 2.1.1. Carbono

Según Tacarpo (2018), resulta fundamental no confundir el carbono (C) con el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). El CO<sub>2</sub> está constituido por un átomo de carbono y dos de oxígeno. Dado que el oxígeno posee un peso molecular total de 32 (16 por cada átomo) y el carbono uno de 12, la suma alcanza 44. De este valor, únicamente 12 unidades corresponden al carbono propiamente dicho, mientras que el resto se debe al oxígeno.

La Real Academia Española (2021) describe al carbono como un elemento químico identificado con el símbolo C y número atómico 6. Es uno de los más abundantes en la naturaleza, presente tanto en organismos vivos como en minerales y en la atmósfera. Puede encontrarse en diversas formas, como el diamante o el grafito. Además, constituye el fundamento de la química orgánica y desempeña un papel esencial en los procesos biológicos.

El carbono (C) constituye un elemento esencial en los compuestos orgánicos, ya que se une con otros elementos como nitrógeno, fósforo, azufre, oxígeno e hidrógeno, dando origen a moléculas indispensables para la vida. Sin embargo, al igual que ocurre con cualquier elemento, su disponibilidad en la Tierra es limitada. Por ello, el carbono se mantiene en un ciclo permanente, transitando entre la materia orgánica y el entorno fisicoquímico (Jaramillo, 2004).

Timoteo et al. (2016) reportan que, al finalizar el primer año, la cantidad total de carbono acumulado en la biomasa y necromasa aérea de los sistemas agroforestales alcanzó 9,44 t C ha<sup>-1</sup> en SAF1, 11,40 t C ha<sup>-1</sup> en SAF2 y 11,37 t C ha<sup>-1</sup> en SAF3. Dentro de estos sistemas, el estrato herbáceo y arbustivo fue el que presentó mayor predominio, aportando el 49,7 %, 46,2 % y 50 % del total de biomasa y necromasa aérea en SAF1, SAF2 y SAF3, respectivamente.

Según Timoteo et al. (2016), en el primer muestreo se registraron valores de carbono orgánico en el suelo de 8,90 t C ha<sup>-1</sup> en SAF1, 11,37 t C ha<sup>-1</sup> en SAF2 y 9,78 t C ha<sup>-1</sup> en SAF3. Tras un año de evaluación, estos niveles aumentaron en todos los sistemas, alcanzando 33,42 t C ha<sup>-1</sup>, 36,79 t C ha<sup>-1</sup> y 37,20 t C ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Asimismo, se observó que la concentración de carbono en los primeros 10 cm de suelo fue, en general, inferior a la registrada entre los 10 y 20 cm de profundidad en cada sistema agroforestal.

De acuerdo con Timoteo et al. (2016), en la etapa inicial de los sistemas agroforestales el mayor aporte al almacenamiento de carbono proviene de los componentes herbáceos y arbustivos, mientras que a largo plazo se espera que la biomasa arbórea se convierta en el principal reservorio. Los autores resaltan la necesidad de incluir en las evaluaciones el carbono presente en el suelo, ya que este llega a representar cerca del 60 % del total acumulado durante el primer año de establecimiento. Tales hallazgos constituyen una referencia fundamental para futuras investigaciones sobre captura de carbono en sistemas agroforestales y ofrecen sustento para el desarrollo de proyectos forestales con enfoque en carbono dentro del área de estudio.

### **2.1.2. Ciclo del Carbono**

En un contexto más amplio, el ciclo global del carbono se manifiesta en dos escalas: una bioquímica de corto plazo y otra geoquímica de largo plazo. Las actividades humanas introducen alteraciones constantes en ambos niveles, con emisiones anuales de alrededor de 8,6 Pg de carbono (equivalente a un billón de kilogramos). De esta cantidad, aproximadamente 3,3 Pg permanecen en la atmósfera y 2,2 Pg son absorbidos por los océanos. Como consecuencia, en los últimos 150 años la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico ha aumentado en un 31 %.

Según la FAO (2022), los suelos destinados a la agricultura representan a nivel mundial una de las principales reservas de carbono. Además de su papel actual como almacén, poseen un alto potencial para incrementar el secuestro de carbono, lo que los convierte en una alternativa prometedora para reducir la creciente concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

### **2.1.3. Carbono orgánico del suelo**

De acuerdo con la FAO (2018), el carbono orgánico del suelo (COS) constituye la fracción más importante de la materia orgánica del suelo (MOS), considerada el motor que impulsa la funcionalidad del suelo. La MOS cumple un papel crucial en la estabilización de su estructura, en la regulación de la disponibilidad de nutrientes para las plantas y en los procesos de infiltración y almacenamiento de agua, aspectos fundamentales para mantener la fertilidad, la salud del suelo y, en consecuencia, la producción de alimentos. La disminución de COS, por lo tanto, refleja un nivel de degradación edáfica.

El COS proviene de la descomposición parcial de restos orgánicos generados por organismos vivos y se mantiene en el suelo después de este proceso. Este carbono es un componente central dentro del ciclo global del carbono, el cual involucra la interacción

entre la atmósfera, la vegetación, el suelo, los ríos y los océanos (FAO, 2018).

Huayanay (2018) evidenció en su investigación que el carbono orgánico total, expresado en porcentaje, se concentra principalmente en los primeros 10 cm de suelo bajo la copa de los árboles y entre plantas, alcanzando valores de 0,818 % y 0,777 % de C, respectivamente. No obstante, conforme la profundidad aumenta, este porcentaje disminuye, registrándose 0,261 % y 0,429 % de C entre los 20 y 30 cm de profundidad.

Por su parte, Zavala, Merino y Peláez (2018) concluyeron que la mayor proporción de carbono orgánico en el suelo se localiza en el horizonte superficial (0–10 cm). Además, identificaron que, en sistemas agroforestales de cacao, los menores de 8 años presentan el mayor almacenamiento con 28,36 t C/ha, seguidos por los de más de 16 años con 27,74 t C/ha y, finalmente, los de 8 a 16 años con 27,11 t C/ha.

#### **2.1.4. Carbono de biomasa**

Hurtado (2019) señala que la biomasa corresponde a la masa total de organismos vivos que habitan en un espacio o volumen determinado, pudiendo incluirse también el material vegetal muerto, considerado como biomasa muerta. En el caso de la vegetación arbórea, la biomasa constituye un indicador esencial para valorar el estado de los recursos forestales, ya que se encuentra distribuida en troncos, ramas, hojas y otras estructuras de la planta, funcionando como un reservorio natural de carbono. A partir de esta biomasa se puede calcular la cantidad de CO<sub>2</sub> fijado, lo que convierte a las unidades forestales en mecanismos estratégicos para la mitigación y adaptación frente a los impactos del cambio climático (Hurtado, 2019).

De acuerdo con Muñoz y Vásquez (2020), se estima que una tonelada métrica de CO<sub>2</sub> fijada en la biomasa equivale a aproximadamente 0,27 toneladas de carbono. Este proceso, conocido como captura o secuestro de carbono, se reconoce como un servicio ambiental de gran relevancia, ya que contribuye a disminuir la concentración de gases de efecto invernadero.

La fijación ocurre durante el desarrollo de los árboles, cuando a través de la fotosíntesis absorben dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y lo convierten en compuestos como la glucosa, que luego se incorporan a la estructura de la planta. De esta manera, los árboles actúan como sumideros naturales de carbono, almacenándolo en su biomasa y evitando que permanezca en la atmósfera.

En su investigación, Zavala et al. (2018) evidenciaron que la biomasa aérea

en los sistemas agroforestales (SAF) aumenta progresivamente con la edad de establecimiento. Los sistemas con más de 16 años registraron la mayor acumulación con 609,28 t ha<sup>-1</sup> de C, seguidos por los de 8 a 16 años con 225,02 t ha<sup>-1</sup> de C y, finalmente, los menores de 8 años con 170,29 t ha<sup>-1</sup> de C. Este patrón se explica porque, a medida que las especies forestales crecen, desarrollan mayor vigor y, en consecuencia, incrementan la producción de biomasa. Asimismo, las plantas de cacao contribuyen a este incremento en los diferentes estratos de los SAF.

### **2.1.5. Carbono del suelo**

El carbono del suelo es un componente fundamental de los ecosistemas terrestres, ya que los suelos representan el mayor reservorio terrestre de carbono orgánico, superando ampliamente al carbono almacenado en la vegetación y la atmósfera. La dinámica del carbono del suelo (SOC, por sus siglas en inglés) es clave para la fertilidad, la salud del suelo, la mitigación del cambio climático y la provisión de servicios ecosistémicos (Lehmann et al., 2020).

El carbono del suelo se compone principalmente de dos fracciones: carbono orgánico (SOC) y carbono inorgánico. El SOC incluye restos de plantas y animales en diferentes etapas de análisis, biomasa microbiana y sus productos metabólicos. Este carbono es altamente dinámico y su tiempo de residencia depende de mecanismos de protección física, química y biológica dentro de la matriz del suelo, como la formación de agregados y complejos organominerales (Georgiou et al., 2025).

La formación y estabilización del SOC depende de la entrada de materia orgánica (hojarasca, raíces), la actividad microbiana y las interacciones con minerales del suelo. La persistencia del carbono está determinada por la complejidad funcional, que incluye la diversidad molecular, la heterogeneidad espacial y la variabilidad temporal del sistema educativo. Los mecanismos de protección física (encapsulamiento en agregados), química (formación de compuestos recalcitrantes) y biológica (actividad microbiana) permiten que el SOC se almacene durante décadas o milenios (Georgiou et al., 2025).

La formación y estabilización del SOC depende de la entrada de materia orgánica (hojarasca, raíces), la actividad microbiana y las interacciones con minerales del suelo. La persistencia del carbono está determinada por la complejidad funcional, que incluye la diversidad molecular, la heterogeneidad espacial y la variabilidad temporal del sistema educativo. Los mecanismos de protección física (encapsulamiento en agregados), química (formación de compuestos recalcitrantes) y biológica (actividad microbiana) permiten que el

SOC se almacene durante décadas o milenios (Lehmann et al., 2020).

Tradicionalmente, los modelos de carbono del suelo han utilizado compartimentos conceptuales basados en tiempos de recambio. Sin embargo, los enfoques actuales proponen modelos basados en fracciones medibles, como el carbono asociado a minerales y el carbono particulado, para reflejar mejor los procesos biogeoquímicos y reducir la incertidumbre en las predicciones (Abramoff, 2021).

#### **2.1.6. Necromasa**

Pezo (2023) destaca que el suelo constituye una de las principales reservas de carbono, almacenando incluso más que la atmósfera y la vegetación terrestre en conjunto. No obstante, el carbono orgánico presente en él es de naturaleza dinámica, ya que las actividades humanas pueden inducir que funcione tanto como sumidero como fuente de gases de efecto invernadero. En este contexto, la descomposición de la hojarasca puede entenderse como un proceso clave en la formación del carbono orgánico del suelo. Así, los depósitos de este carbono reflejan un equilibrio continuo entre la incorporación de necromasa —material vegetal muerto— y las pérdidas ocasionadas por la mineralización.

#### **2.1.7. Estratos vegetales**

Alegre (2017) señala que la interacción entre cobertura vegetal y uso del suelo constituye una manifestación integrada de la relación entre factores bióticos y abióticos en un espacio determinado. Esta asociación, que resulta tanto de la dinámica natural como del manejo humano, da lugar a diversas formas de aprovechamiento dependientes del suelo. Comprender dicha relación es esencial para identificar conflictos de uso y anticipar problemas ambientales. Entre estos destacan la exposición del suelo a condiciones climáticas adversas, lo que favorece procesos de erosión y, en casos extremos, de desertificación.

##### **2.2.3.1 Tipología de Estratos**

Según Bonells (2021), la organización de una planta puede distinguirse en cuatro estratos principales que permiten clasificar su estructura.

- **El estrato arbóreo (más allá de los 8 m de altura)**

En la estratificación forestal, los árboles adultos conforman el estrato arbóreo, el cual se distingue por individuos de fuste definido y copas bien desarrolladas que sobresalen en la estructura vertical del bosque.

- **El estrato arbustivo (1 m a 8 m)**

Este estrato está conformado por especies leñosas de porte medio que apenas superan esa altura, como el acebo, el cornejo, el viburnum, el peral silvestre o el boj, así como también por individuos arbóreos en estado juvenil.

- **El estrato herbáceo (5 a 80 cm)**

Este nivel de la estratificación está constituido principalmente por especies herbáceas, entre ellas gramíneas (Poaceae), ciperáceas (Cyperaceae), plantas con flores y pteridofitas. También se incluyen pequeños arbustos leñosos conocidos como caméfitos, dentro de los que destacan brezos, arándanos, rododendros o el falso acebo. En este estrato se concentra una notable diversidad de formas biológicas, que abarcan desde especies anuales o terófitas, hasta bienales y perennes. Entre estas últimas se encuentran los geófitos (con bulbos, rizomas o tubérculos) y las hemicriptófitas, caracterizadas por presentar rosetas basales o crecimiento cespitoso.

- **El estrato muscinal (0 a 5 cm)**

Este estrato está integrado por briófitos, como musgos y hepáticas, además de líquenes y plantas de porte enano. También pueden aparecer lianas cuando se desarrollan de forma rastrera, así como diversas especies de hongos.

### **2.1.8. Valor económico por captura de carbono**

El establecimiento de un precio al carbono ha sido durante mucho tiempo considerado por los economistas como una de las alternativas más rentables para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. No obstante, esta medida trasciende una simple propuesta teórica discutida en el ámbito académico. Cada vez más países toman en cuenta las recomendaciones de especialistas y adoptan mecanismos de fijación de precios al carbono, ya sea a través de impuestos sobre las emisiones o mediante sistemas de comercio de permisos. Actualmente, en el mundo se registran 57 iniciativas de este tipo, las cuales abarcan cerca del 20 % de las emisiones globales. La Unión Europea, varios estados de Estados Unidos, junto con naciones como Chile, Colombia y México, ya han puesto en práctica estas políticas. Más recientemente, se han incorporado nuevos esquemas en Argentina, Sudáfrica, Singapur y en distintas provincias y territorios de Canadá (Trinidad & Ortiz, 2019).

El mecanismo REDD+ busca compensar las emisiones de carbono a través de la emisión de bonos. De este modo, los países interesados en disminuir sus emisiones otorgan

incentivos económicos a quienes conservan áreas de bosque tropical y desarrollan prácticas sostenibles en dichos ecosistemas, involucrando además a comunidades locales e indígenas. La dinámica es sencilla: se calcula la cantidad de emisiones generadas y estas son compensadas en territorios forestales, estableciéndose que cada bono representa el equivalente a una tonelada de carbono (Sari, 2017).

## 2.2. Estado del arte

### 2.2.1. Nacionales

Ruiz (2024) analizó la relación entre volumen, biomasa y carbono en un bosque de colina baja dentro de la concesión forestal San Regis S.A.C. (N° 16-IQU/C-J-099-04), en Nauta, región Loreto. Se censaron 4 281 árboles pertenecientes a 75 especies, 61 géneros y 23 familias. El volumen total fue de 104,19 m<sup>3</sup>/ha, destacando *Ecclinusa lanceolata* (8,05 m<sup>3</sup>/ha) y *Parkia nitida* (6,16 m<sup>3</sup>/ha). La biomasa total se estimó en 182 118,38 kg/ha, con mayores aportes de *E. lanceolata* (16 728,11 kg/ha) y *P. nitida* (11 646,52 kg/ha). El carbono acumulado alcanzó 91,06 tC/ha, siendo *E. lanceolata* la especie más representativa (8,36 tC/ha) seguida por *P. nitida* (5,28 tC/ha). El análisis estadístico mostró una correlación perfecta ( $r = 1,000$ ) entre volumen, biomasa y carbono, evidenciando la estrecha relación entre el volumen maderable y el almacenamiento de carbono en este tipo de bosque.

Serna (2024) llevó a cabo una valoración económica del servicio de secuestro de CO<sub>2</sub> en un bosque de colina baja localizado en los distritos de Indiana y Las Amazonas, región Loreto. Con un enfoque cuantitativo y diseño no experimental, se emplearon inventarios forestales para estimar biomasa, carbono almacenado y dióxido de carbono fijado, aplicando ecuaciones alométricas y análisis estadístico. Los resultados señalaron a *Iryanthera elliptica* y *Micropholis madeirensis* como las especies con mayor aporte económico al secuestro de CO<sub>2</sub>, con valores de 19 039,47 USD y 17 851,61 USD, respectivamente. En total, el área evaluada alcanzó un valor económico de 266 522,00 USD, equivalente a 5 693,70 USD/ha. El estudio concluye que la conservación de estos bosques no solo mitiga el cambio climático, sino que también representa una fuente de beneficios económicos para las comunidades, favoreciendo el manejo sostenible y el pago por servicios ambientales.

Ruiz y Alberca (2023) realizaron un estudio en los bosques secos del caserío San Juan de la Pushura Baja, distrito de Bellavista – Jaén, con el propósito de estimar la captura y el almacenamiento de carbono. Para ello, se instalaron 10 parcelas temporales de 100 m x 50 m, donde se recolectó información dasométrica de los árboles (DAP  $\geq$  5 cm y

altura), considerando además la densidad de individuos (baja, media y alta), junto con factores de accesibilidad y relieve. La captura de carbono en biomasa aérea se calculó mediante un método no destructivo, aplicando ecuaciones alométricas y el factor de expansión de biomasa (FEB). Los resultados revelaron que, en promedio, las parcelas evaluadas almacenan 0,925 tC/ha, y que en conjunto el bosque seco de Bellavista alcanza una capacidad de captura y almacenamiento de 45 170,53 tC.

Pilco (2023) investigó la diversidad de la vegetación arbórea en colinas bajas y altas de Tingo María, utilizando 28 parcelas de muestreo (0,14 ha) en el BRUNAS. En las colinas bajas se contabilizaron 269 individuos distribuidos en 18 familias, 30 géneros y 37 especies, mientras que en las colinas altas se registraron 344 individuos pertenecientes a 23 familias, 42 géneros y 49 especies. Los índices de diversidad alfa resultaron más elevados en colina baja ( $D=0,9424$ ;  $H'=3,145$ ;  $J'=0,871$ ) en comparación con colina alta ( $D=0,883$ ;  $H'=2,04$ ;  $J'=0,7461$ ), aunque la riqueza de especies ( $D_{mg}$ ) fue mayor en colina alta (8,218) respecto a colina baja (6,435). La curva de rarefacción mostró niveles similares de riqueza, aunque con menor abundancia en colina baja. En cuanto a la diversidad beta, se identificó una semejanza moderada ( $IJ=0,433$ ;  $QS=0,605$ ;  $BC_{ij}=0,377$ ;  $CMH=0,606$ ), lo que indica que ambas colinas comparten aproximadamente el 60,5 % de sus especies.

Díaz (2023) llevó a cabo un estudio sobre el carbono almacenado en especies forestales comerciales dentro de un bosque de terraza baja en el distrito de Requena, Loreto. La investigación utilizó la información del censo forestal de una parcela de corta (PC1), correspondiente al plan operativo (PO1) de una concesión maderera. La biomasa seca se estimó de forma indirecta empleando la densidad básica y el volumen comercial. Se registraron 927 individuos distribuidos en cinco familias de especies de interés comercial. La biomasa total alcanzó 7 499 856,35 kg (14 122,43 kg/ha), con un almacenamiento promedio de carbono de 8,47 tC/ha. Entre las especies evaluadas, *Maquira coriaceae* destacó como la principal contribuyente con 7,91 tC/ha, seguida por *Calycophyllum spruceanum* (0,39 tC/ha) y *Ceiba pentandra* (0,08 tC/ha), mientras que *Hura crepitans* e *Iryanthera elliptica* registraron los valores más bajos (0,06 y 0,04 tC/ha). El mayor contenido de carbono se concentró en las clases diamétricas superiores a 110 cm (1,91 tC/ha), seguidas por los rangos de 90–99 cm (1,49 tC/ha) y 100–109 cm (1,41 tC/ha).

Ore et al. (2022) realizaron la cuantificación de las reservas de carbono en la biomasa aérea viva de un bosque natural en la provincia de Leoncio Prado, Huánuco. Para ello, establecieron dos parcelas permanentes de muestreo (PPMs) de 1 ha cada una (100 x 100

m), donde se registraron todos los individuos con DAP o POM  $\geq 10$  cm. Los mayores valores de biomasa aérea se encontraron en la “Parcela 4”, ubicada en colina alta, con 287,97 t/ha de biomasa y 143,96 tC/ha almacenados. En segundo lugar, la “Parcela 1” registró 169,17 t/ha de biomasa y 84,59 tC/ha. La distribución de biomasa mostró que las clases diamétricas superiores a 60 cm concentran la mayor acumulación, alcanzando 79,81 t/ha. En cuanto a las familias, las Fabaceae destacaron como las principales aportantes de biomasa aérea (54,12 t/ha), representadas de forma significativa por *Cedrelinga cateniformis*, especie con un diámetro de 127,42 cm y densidad media de 0,504 g/cm<sup>3</sup>, la cual acumuló 18,51 t/ha de biomasa aérea.

Moscol et al. (2022) evaluaron la relación entre características del suelo y la estructura y diversidad arbórea en un bosque seco. Las especies dominantes fueron *Bursera graveolens*, *Caesalpinia paipai*, *Colicodendron scabridum*, *Cynophalla flexuosa*, *Loxopterygium huasango* y *Prosopis pallida*. Se registró una densidad de 47,7 ind/ha y 54 % del suelo bajo cobertura, con distribución diamétrica en “J” invertida. Los índices de diversidad variaron entre 0–1,39 (Shannon-Wiener) y 0–0,75 (Simpson). Factores como humedad, densidad aparente, textura arenosa y materia orgánica influyeron en la presencia de especies. La diversidad beta mostró dos grupos: P3, P9 y P13 (25 % de similitud) y P1, P8 y P12 (50 %). Según el índice de Jaccard, P9, P11 y P13 alcanzaron 93 % de similitud y P2 y P8 un 42 %, indicando mayor abundancia hacia el Este del área de concesión.

Flores (2022) evaluó la composición, estructura y diversidad arbórea del bosque de terraza alta con castaña (*Bertholletia excelsa*) en las provincias Tambopata y Tahuamanu, Madre de Dios. Se instalaron 20 parcelas de 1000 m<sup>2</sup> distribuidas aleatoriamente, evaluando árboles con DAP  $\geq 10$  cm. Se registraron 1104 individuos pertenecientes a 255 especies, 154 géneros y 52 familias, con promedios de 36,4 especies/parcela,  $\alpha$ -Fisher de 105,2 y Shannon-Wiener de 5,061, lo que indica alta diversidad. Se identificaron 8 especies en categoría de amenaza según la legislación nacional. Tambopata presentó 190 especies ( $\alpha = 106,4$ ;  $H' = 4,82$ ) y Tahuamanu 172 especies ( $\alpha = 85,46$ ;  $H' = 4,768$ ), con semejanza florística intermedia (Jaccard = 0,48 entre provincias y 0,24 entre parcelas). Estructuralmente, predominan individuos en clases bajas de altura (10–15 m) y diámetro (10–20 cm). Estos resultados constituyen una base para planes de manejo forestal intermedio y declaraciones de manejo en concesiones no maderables.

Guevara (2022) realizó un estudio en el Área de Conservación Municipal Bosque de Huamantanga (ACM-BH) con el objetivo de estimar la reserva de carbono almacenado en la biomasa proveniente de la parte aérea, hojarasca, necromasa y suelo. La

población evaluada estuvo conformada por 3 840,72 ha, empleándose una muestra de 62 parcelas con dimensiones de  $4 \times 25$  m y  $5 \times 100$  m, determinadas según el diámetro del fuste. En estas parcelas se recolectó información dasométrica de árboles y arbustos, además de establecer subparcelas de  $1 \text{ m}^2$  para la recolección de herbáceas y de  $50 \text{ cm}^2$  para hojarasca. Las muestras fueron pesadas, codificadas y secadas en laboratorio hasta obtener peso seco constante. Para el análisis de suelo, se realizaron calicatas en las subparcelas de hojarasca a profundidades de 30 y 60 cm, determinándose la densidad aparente y el carbono del suelo. Los resultados evidenciaron una biomasa vegetal total de 415,2950 t/ha, con 186,6018 tC/ha acumulados en vegetación y necromasa, y 153,58575 tC/ha en el suelo, lo que representó un stock de carbono total de 340,18755 tC/ha en el ACM-BH.

Flores (2021) evaluó el carbono almacenado en la biomasa arbórea de un bosque de colina baja en el distrito de Tahuanía, región Ucayali. Para ello, se instalaron cuatro parcelas permanentes de medición ( $40 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ ), registrándose los árboles con  $\text{DAP} \geq 10$  cm. La estimación de biomasa se realizó mediante un método indirecto, aplicando ecuaciones alométricas que consideraron el diámetro a la altura del pecho (cm), la altura total (m) y la densidad de la madera o gravedad específica ( $\text{Mg/m}^3$ ). Los resultados mostraron variación de biomasa entre parcelas: 185,25 t/ha (parcela 1), 218,666 t/ha (parcela 2), 204,422 t/ha (parcela 3) y 188,597 t/ha (parcela 4). En cuanto al carbono almacenado en árboles con  $\text{DAP} \geq 10$  cm, se estimaron 92,562 t/ha, 109,333 t/ha, 102,211 t/ha y 94,298 t/ha para cada parcela, respectivamente. A nivel de concesión, el stock de carbono en las parcelas de corta de la Concesión Forestal Anita E.I.R.L. alcanzó 37 004,543 tC en la PC11 y 43 477,742 tC en la PC12.

Alvarez-Montalván et al. (2021) investigaron la estructura, diversidad y composición florística de un bosque amazónico de terrazas en Madre de Dios, Perú. El estudio incluyó cinco bloques de muestreo, cada uno con dos parcelas de  $20 \times 500$  m, en las que se registraron todos los individuos con  $\text{DAP} > 10$  cm. En total se contabilizaron 4429 árboles, distribuidos en 254 especies, 165 géneros y 53 familias. El análisis de los patrones de distribución de diámetros y alturas reveló evidencias de extracción maderera previa. Los índices de diversidad mostraron valores elevados (Shannon-Wiener =  $4.039 \pm 0.16$  y  $\alpha$ -Fisher =  $39.90 \pm 9.23$ ). Entre las especies de mayor relevancia ecológica se destacaron *Tetragastris altissima*, *Iriartea deltoidea* y *Euterpe precatoria*, caracterizadas por su rápido crecimiento y amplia distribución, así como *Tachigali vasquezii*, considerada exclusiva de la región. En contraste, especies como *Ocotea bofo*, *Bertholletia excelsa* y *Eschweilera coriácea* dominaron en

estructura, pero presentaron baja abundancia debido a los cambios en la composición florística derivados del aprovechamiento forestal.

Zavala y Vega (2021), en su obra de investigación, señalan que el sistema agroforestal con más de 16 años presentó la mayor capacidad de almacenamiento de carbono total, alcanzando 344,24 tC/ha. En comparación, los sistemas de entre 8 y 16 años y los menores de 8 años registraron valores de 178,61 tC/ha y 154,91 tC/ha, respectivamente.

### 2.2.2. Internacionales

Namaswa et al. (2025) evaluaron las reservas de carbono y la concentración de nutrientes en la hojarasca de bosques tropicales en Kenia, considerando un gradiente ecológico que incluyó zonas pluviales, bosques húmedos caducifolios y bosques secos. Mediante muestreo estratificado y aleatorio, se establecieron parcelas y subparcelas para estimar la biomasa y el carbono arbóreo mediante ecuaciones alométricas, así como el carbono orgánico del suelo y la concentración de nitrógeno y fósforo en la hojarasca con análisis de laboratorio. Los resultados indicaron que los bosques secos presentaron menores reservas de carbono (73 Mg C/ha) que las selvas tropicales (439,5 Mg C/ha) y los bosques húmedos caducifolios (449 Mg C/ha). El carbono orgánico del suelo fue mayor en las selvas tropicales (3,9%) y menor en bosques secos (1,8%). Además, la hojarasca de selvas tropicales registró mayor nitrógeno (3,4%), mientras que la de bosques secos tuvo más fósforo (0,27%). El estudio evidencia que el gradiente ecológico influye en la capacidad de almacenamiento de carbono y en el ciclo de nutrientes, con implicancias ante el cambio climático.

González-Arévalo et al. (2025) evaluaron la diversidad, estructura y composición de las cubiertas vegetales en la Zona de Restauración y Protección Ambiental Cañadas del Río Chiquito (Michoacán, México), identificando ocho tipos de cobertura, entre ellas bosques de encino, pino, matorrales subtropicales, pastizales y plantaciones. Se registraron 215 especies (89.7% nativas y 25.1% endémicas), siendo las familias más representativas Asteraceae, Fabaceae y Poaceae. El análisis de rarefacción evidenció una adecuada representatividad de especies, mientras que los índices de Shannon y Simpson mostraron patrones consistentes con la riqueza y uniformidad. En cuanto a la diversidad beta, el índice de Jaccard señaló mayor similitud entre matorral subtropical cerrado y bosque de encino abierto, y menor entre plantaciones y bosques. El índice de Bray-Curtis confirmó asociaciones florísticas específicas, destacando el papel de ciertos géneros como *Quercus* en la composición compartida. Los resultados evidencian un ecosistema diverso pero con alta perturbación, relevante para la conservación.

Navarro-Martínez et al. (2024) evaluaron el carbono almacenado en la necromasa y el sotobosque de un ecosistema forestal templado en la microcuenca del río Hueyapa, Guerrero, México. El estudio abarcó 2 761,9 ha de bosque templado y se desarrolló bajo la metodología del Inventario Nacional Forestal y de Suelos de México. Se midieron los árboles muertos en pie (AMP), material leñoso caído (MLC), sotobosque (S) y hojarasca del piso forestal (H), registrando además la caída de follaje y otros órganos vegetales en trampas de 1 m<sup>2</sup> entre febrero de 2017 y enero de 2018. El carbono estimado fue de 0,89 Mg/ha en AMP, 1,25 Mg/ha en MLC, 0,61 Mg/ha en S y 4,52 Mg/ha en H, siendo este último el principal reservorio. La caída de follaje y otros órganos vegetales aportó  $4,52 \pm 0,44$  Mg/ha/año de carbono. Los resultados constituyen una línea base para futuras investigaciones sobre mitigación del cambio climático y productividad de bosques templados en Guerrero.

Aguilar-Arias et al. (2023) evaluaron la biomasa seca acumulada en el mantillo, la madera muerta y el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) en cuatro estadios sucesionales de bosque en la Península de Osa, Costa Rica: 5-15 años, 15-30 años, mayores de 30 años y bosque primario. El diseño incluyó cinco parcelas permanentes de muestreo por tratamiento y cuatro muestras por parcela. Los bosques primarios registraron la mayor biomasa de mantillo (9,75 t/ha) y de madera muerta (7,80 t/ha), mientras que el mayor COS se obtuvo en bosques de más de 30 años (109,24 tC/ha). Las tendencias mostraron un incremento en la biomasa de mantillo conforme avanza la sucesión, aunque la biomasa de madera muerta no presentó diferencias significativas. El COS sí mostró diferencias estadísticas entre bosques jóvenes (5-15 años) y bosques mayores de 30 años, lo que evidencia la importancia de la madurez del ecosistema en la acumulación de carbono.

Díaz et al. (2023) llevaron a cabo una investigación en bosques de la Amazonía colombiana con el objetivo de estimar la biomasa y el carbono almacenado. Para ello, en 2021 se implementó una Parcela Permanente de Monitoreo de Biodiversidad y Carbono (PPMBC) de una hectárea, donde se calcularon la biomasa aérea, la biomasa radicular y la tasa de fijación de carbono expresada en CO<sub>2</sub> equivalente. A partir de modelos alométricos aplicados al área de estudio, se determinó una biomasa aérea de 240,17 t ha<sup>-1</sup> y una biomasa de raíces de 44,02 t ha<sup>-1</sup>, alcanzando un total de 284,19 t ha<sup>-1</sup>. Esto representa un almacenamiento de 142,09 t ha<sup>-1</sup> de carbono y la remoción de 521,50 t ha<sup>-1</sup> de dióxido de carbono de la atmósfera. Los resultados evidencian que los bosques amazónicos analizados poseen una elevada capacidad de fijación y almacenamiento de carbono, lo que los convierte en aliados estratégicos para mitigar los impactos del cambio climático. En este sentido, se estima que contribuyen a la remoción de

aproximadamente 9,3 Tg de CO<sub>2</sub> atmosférico asociado a procesos de deforestación y cambios de uso del suelo en la región amazónica del Caquetá.

Díaz y Heyn (2022) evaluaron el contenido de carbono en un bosque secundario de Curuguaty, Paraguay. Se establecieron cuatro parcelas de 50 x 50 m (1 ha) donde se inventariaron individuos con DAP  $\geq$  10 cm, registrando composición florística, área basal y volumen de fuste. Se identificaron 21 familias, 17 géneros, 22 especies y 249 individuos/ha. El área basal promedio fue de 17,1 m<sup>2</sup>/ha y el volumen de fuste de 16,5 m<sup>3</sup>/ha. La biomasa total se estimó en 118,5 t/ha (IPCC) y 74 t/ha (ecuación 2). El carbono almacenado fue de 59,2 tC/ha y 37,3 tC/ha, respectivamente, mostrando diferencias significativas. El CO<sub>2</sub> equivalente alcanzó 219 tCO<sub>2e</sub>/ha (IPCC) y 136,7 tCO<sub>2e</sub>/ha (ecuación 2). Se concluye que este bosque secundario constituye un sumidero relevante de carbono que contribuye a mitigar gases de efecto invernadero.

En su investigación, Suhaili et al. (2021) evaluaron las reservas de carbono en el suelo, la capa orgánica y la hojarasca en bosques tropicales montañosos bajo tres usos de la tierra distintos: bosque intacto, bosque talado y bosque de plantación, en Long Mio, Sabah, Malasia. El estudio incluyó 25 parcelas con muestreo aleatorio de suelo a tres profundidades y recolección mensual de hojarasca durante un año. Los resultados evidenciaron que el suelo corresponde a un Acrisol Gléyico, con pH entre 4,21 y 5,71 y elevados contenidos de materia orgánica. Las mayores reservas totales de carbono se encontraron en el bosque intacto (101,62 Mg C ha<sup>-1</sup>), seguido del bosque talado (95,61 Mg C ha<sup>-1</sup>) y el bosque de plantación (93,30 Mg C ha<sup>-1</sup>). Los autores concluyen que la conservación de bosques intactos es fundamental para optimizar el secuestro de carbono y contribuir a la mitigación del cambio climático.

Leyva-Pablo et al. (2021) analizaron el impacto de dos métodos silvícolas en la Sierra Norte de Oaxaca, 21 años después de la reforestación: el método de desarrollo silvícola (MDS, alta intensidad) y el método mexicano de ordenación de bosques irregulares (MMOBI, baja intensidad). Además, se evaluaron tres bosques no manejados: pino (BP), encino (BE) y pino-encino (BPE). El estudio cuantificó el carbono en suelo (10, 20 y 30 cm), mantillo, madera muerta, raíces y biomasa aérea, aplicando ecuaciones alométricas y un analizador automático. Los resultados mostraron que el MMOBI alcanzó el mayor contenido de carbono en suelo y mantillo (127,89 Mg C ha<sup>-1</sup>), mientras que el bosque pino-encino presentó la mayor reserva arbórea (383,9 Mg C ha<sup>-1</sup>). Se concluye que el MMOBI promueve la acumulación de carbono edáfico y que el bosque pino-encino funciona como un sumidero clave en etapas superiores a 40 años.

Morales-Inocente et al. (2020) estudiaron el carbono almacenado en la biomasa aérea y el suelo de bosques en El Salto, Durango (México), utilizando información dasométrica y muestras de suelo de nueve parcelas permanentes. Se estimó una biomasa aérea de 135,95 Mg/ha, equivalente a 66,42 Mg C/ha, donde el 95 % corresponde a biomasa arbórea y el 5 % a sotobosque (hojarasca, necromasa, arbustos y hierbas). El carbono orgánico del suelo alcanzó 187,06 Mg C/ha, con un 70 % concentrado en los primeros 20 cm de profundidad. Los autores concluyen que estos bosques representan sumideros significativos de carbono y poseen un alto potencial para contribuir a la mitigación del cambio climático.

Cano-Flores et al. (2020) analizaron las concentraciones de carbono orgánico en árboles, mantillo y suelos del Área Natural Protegida El Faro, en Tlalmanalco (Estado de México). Se evaluaron ocho sitios con cuatro tipos de cobertura forestal: Cupressus-Pinus, Pinus-Quercus, Quercus-Pinus y Quercus. En cada sitio se registraron individuos con diámetro normal  $\geq 10$  cm y se recolectaron muestras de mantillo y suelo a 0–20 cm de profundidad. El almacenamiento total de carbono fue en promedio de 185,34 Mg ha<sup>-1</sup>, distribuido en 56,40 Mg ha<sup>-1</sup> en arbolado, 44,91 Mg ha<sup>-1</sup> en mantillo y 84,03 Mg ha<sup>-1</sup> en suelo. La cobertura Pinus-Quercus destacó con el mayor contenido de carbono arbóreo (71,74 Mg ha<sup>-1</sup>), encontrándose además una relación positiva entre la biomasa de Quercus y el carbono orgánico del suelo, atribuida a la rápida descomposición de su hojarasca. En conjunto, se estimaron 9267 Mg de carbono en las 50 ha del ANP, lo que subraya la importancia de su conservación frente a los riesgos de deforestación y emisiones asociadas.

He et al. (2020) señalan que la planificación de la conservación basada únicamente en la diversidad alfa resulta insuficiente para reflejar la complejidad de la biodiversidad en bosques tropicales. En la isla de Hainan, China, analizaron 248,538 árboles de 1,016 especies en 902 parcelas, encontrando que las variables ambientales, especialmente la precipitación media anual, fueron los principales determinantes de la diversidad beta. Los modelos de disimilitud generalizada (GDM) explicaron el 27.65% y el 26.58% de la variación en la diversidad beta a nivel de género y especie, respectivamente. La composición florística presentó un gradiente de este a oeste, identificándose tres regiones diferenciadas. Se evidenció que las áreas protegidas actuales priorizan bosques de montaña, dejando vacíos en los bosques de tierras bajas. Los autores concluyen que incorporar la diversidad beta en el mapeo de biodiversidad es clave para optimizar la representatividad y cobertura de las áreas protegidas.

Sarango y Tenempaguay (2020), en su estudio *Estimación del Carbono Almacenado en la Biomasa Aérea, Necromasa (hojarasca) y en el Suelo en un Bosque de Pino*

*en la Comuna Paquizhapa (Provincia de Loja),* determinaron que la biomasa aérea de la zona evaluada almacena aproximadamente 72,02 toneladas de carbono. Esta estimación corresponde al análisis de 1616 individuos distribuidos en un área de 12 000 m<sup>2</sup>, organizada en 30 parcelas de muestreo.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de ejecución

El estudio se llevó a cabo en la comunidad nativa Santa Isabel del río Pachitea. Antes del ingreso a la comunidad se realizó un proceso de consulta en asamblea comunal, siendo aprobada la actividad se procedió a iniciar las coordinaciones logísticas en campo. Luego de la identificación de las muestras se identificó a los dueños de las parcelas para pedir el permiso respectivo no siendo obligatorio sino sujeto a la voluntad de los propietarios para participar en la investigación y la viabilidad técnica para el establecimiento de las actividades propuestas.

##### 3.1.1. Ubicación política

La comunidad nativa de santa Isabel del río Pachitea se ubica en el departamento de Huánuco, provincia de Puerto Inca, distrito de Yuyapichis.

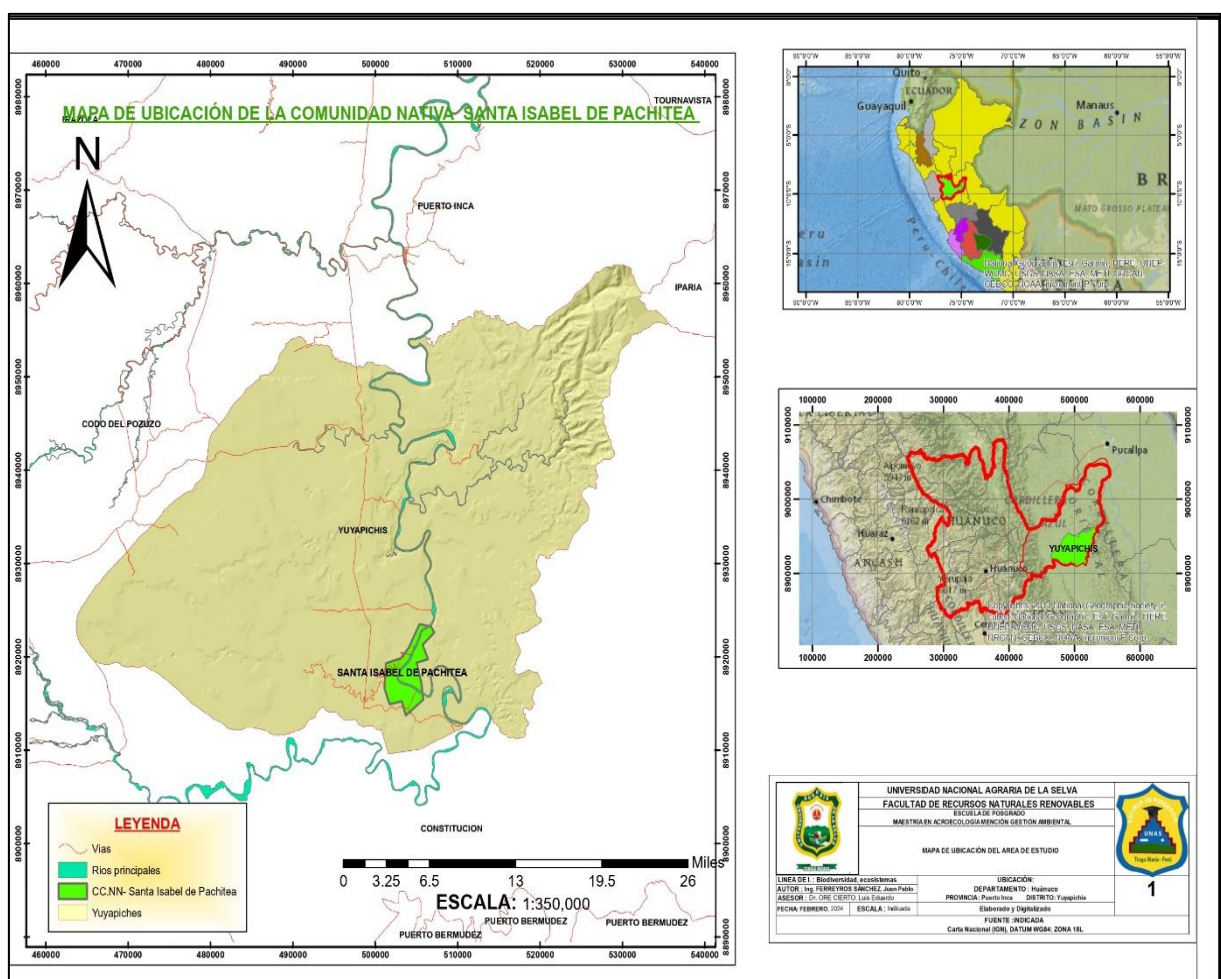


Figura 1. Mapa de ubicación de la CN Santa Isabel del río Pachitea.

## **3.2. Material y métodos**

### **3.2.1. Materiales y equipos**

#### **Materiales**

Papel bond, tijeras de podar, wincha de 50m, tubos de PVC de ½”, tablero de madera, bolsas Ziplop, pilas AA, linterna, botas, machete, libreta de campo, capas para lluvia, impresiones y copias, lima triangular, lápiz, borrador, lapicero, cinta métrica, plumón.

#### **Equipos**

Se contó con una motosierra Stihl con espada de 70 cm, una estufa y una laptop modelo DV 9000 equipada con Windows. Asimismo, se utilizó las cámaras fotográficas de los celulares de los grupos de trabajo y un molino. Para las mediciones se dispuso de diferentes balanzas: una balanza de platillo de 1 kg con precisión de 5 g, otra balanza de platillo de 1 kg con precisión de 2 g, una balanza de laboratorio con sensibilidad de 0,1 g y una balanza de 10 kg con precisión de 50 g. Finalmente, se empleó un hipsómetro para la estimación de alturas.

#### **Instrumentos**

Se empleó una wincha de 30 metros con precisión de 0,5 cm y otra wincha de 3 metros con precisión de 0,1 cm. Para las mediciones se utilizó un vernier digital con exactitud de 0,1 mm. En las labores de campo se contó con herramientas de corte como tijeras de podar marca Bellota, un serrucho tipo segueta y un machete de la misma marca.

#### **Dimensión social**

Para complementar la información ecológica, se recogerán datos de la comunidad mediante entrevistas semiestructuradas a dirigentes y encuestas rápidas a un grupo de familias. El objetivo será identificar el grado de dependencia de los pobladores respecto a los recursos del bosque, su percepción sobre la importancia de la reforestación y el valor que otorgan a los servicios ambientales como la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad. Esta información se analizará de manera descriptiva, integrándose con los resultados de biomasa, suelo y diversidad, a fin de ofrecer una visión integral que combine los aspectos ecológicos y sociales del territorio.

### **3.2.2. Metodología**

#### **3.2.2.1. Tipo y nivel de investigación**

##### **Tipo de investigación**

La investigación se clasificó como de tipo aplicada, dado que recurrió a los enfoques de la ciencia ambiental para analizar la relación entre el carbono y la biomasa aérea de los bosques primarios en la comunidad de Santa Isabel. Como sustento teórico se tomó a Roel Pineda (1997, p. 212), citado por Jacobo et al. (2013, p. 147), quien define la investigación aplicada como aquella orientada a ampliar el conocimiento científico en un ámbito específico de la realidad, a partir de los aportes de la ciencia básica. En este sentido, los hallazgos del estudio permitieron generar información en un contexto particular y, a la vez, demostrar la utilidad práctica del conocimiento científico.

##### **Nivel de investigación**

Descriptivo–correlacional, ya que se enfocó en identificar y analizar la relación entre el carbono y la biomasa aérea presentes de los bosques primarios en la comunidad de Santa Isabel. Este enfoque permitió no solo describir las características de las variables involucradas, sino también establecer el grado de asociación existente entre ellas, sin pretender determinar causalidades. Se sustentó en lo señalado por Scott (1998, p. 121), quien indica que los trabajos de investigación relacional corresponden a investigaciones asociativas, orientadas a identificar la relación entre dos o más variables sin establecer cuál o cuáles constituyen la causa y cuál o cuál el efecto.

#### **3.2.2.2. Población, muestra, tipo de muestreo**

##### **Población**

El área de estudio correspondió a 2 851 ha pertenecientes a la comunidad nativa Santa Isabel, ubicada en la cuenca del río Pachitea. De acuerdo con Jany (1994), citado por Bernal (s.f.), la población se define como el conjunto de elementos o individuos que comparten determinadas características y sobre los cuales se pretende realizar inferencias o establecer la unidad de análisis. Dentro del área se realizó la clasificación de los bosques primarios o densos, siendo la población total de 1 406 hectáreas, sobre los cuales se realizó la investigación.

### Muestra

Se empleó muestreo aleatorio simple (MAS) sobre la población objetivo, siendo la población objetivo las 1 406 hectáreas de bosque denso o bosque primario clasificado previamente con imágenes satelitales, sobre el cual se ha distribuyó una malla de puntos distanciados cada 150 metros, teniendo en total la cantidad de 632 puntos muestrales sobre los cuales se consideró como la población total. Para la determinación del tamaño de la muestra se tomó en cuenta el estudio citado por Yepes (2015) donde el cuadro muestra que el grado de error menor a 20% se encuentran en parcelas de tamaño inferior al 20 m x 20 m.

El tamaño de muestra se determinó con la fórmula para poblaciones finitas, utilizando el coeficiente de variación (CV) de 36% de los parámetros estadísticos del stock de carbono en la biomasa aérea citado por SERFOR et al (2015), teniendo la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} n &= \frac{632 \times 1.96^2 \times 0.36^2}{0.20^2 (632 - 1) + 1.96^2 (0.36)^2} \\ &= 12.2 \\ &= 13 \quad (1) \end{aligned}$$

Donde:

n: Numero de muestras

N: 632 (población)

t<sup>2</sup>: 1.96<sup>2</sup>

CV (%): Coeficiente de variación (36%)

E<sup>2</sup>: error de muestreo (20)

Siendo el número de muestras óptima para el estudio = 13, sin embargo, para efectos de tener suficientes muestras y evitar tener información faltante en alguna de ellas se realizó la instalación de 20 parcelas, quedando finalmente 18 con las que se realizó el análisis de los datos.

### Tipo de muestreo

Probabilístico, sustentado por Hernández et al. (2014), que indica que es necesario definir aleatoriamente las muestras con el fin de inferencias, para dar conclusiones generales o de la población.

### 3.2.2.3. Variables e indicadores

#### *Carbono en la biomasa aérea y suelo*

Carbono en biomasa aérea (t/ha) y carbono orgánico del suelo (t/ha)

#### *Diversidad biológica.*

Diversidad alfa ( $\alpha$ ) de cada estrato y Diversidad beta ( $\beta$ ).

### 3.2.2.4. Diseño de la investigación

#### **Tipo de diseño**

No experimental, transversal correlacional-causal, porque las observaciones se realizaron en un momento determinado; para ello se estratificó el territorio comunal y posteriormente se tomaron muestras de cada estrato para su análisis.

Según Hernández Sampieri (2004, p. 267), la investigación no experimental se caracteriza por no manipular de manera intencional las variables, sino por observar los fenómenos en su contexto natural para luego proceder a su análisis.

#### **Estrategia de diseño**

Se elaboró un mapa de muestreo en el que se ubicaron los puntos de muestreo con coordenadas UTM, seleccionados a criterio del investigador.

### 3.2.2.5. Determinación del nivel de carbono en la biomasa aérea y el carbono orgánico

#### **Cuantificación de las Reservas de Carbono**

Para la estimación de la biomasa y el carbono aéreo se instalaron parcelas de 625 m<sup>2</sup> en campo, siguiendo la metodología de Rüginitz et al. (2009). En cada parcela se evaluaron únicamente árboles con DAP  $\geq$  10 cm, los cuales fueron clasificados en dos categorías: fustales (10–39,9 cm de DAP) y maduros ( $\geq$  40 cm de DAP).

Las mediciones de DAP se realizaron con cinta diamétrica y la altura total de los individuos se obtuvo mediante hipsómetro, de acuerdo con el protocolo de parcelas permanentes de RAINFOR (Phillips & Baker, 2002). La estimación de la biomasa se efectuó aplicando ecuaciones alométricas disponibles en la literatura, y el contenido de carbono se calculó considerando que corresponde al 47,3 % del peso seco de la biomasa (Martin & Thomas, 2011).

### Biomasa de individuos con DAP $\geq 10$ cm

En esta categoría diamétrica se evaluaron únicamente los individuos arbóreos con DAP  $\geq 10$  cm, dentro de la parcela principal de  $25 \times 25$  m ( $625 \text{ m}^2$ ). Las variables registradas incluyeron el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total (h), la altura comercial (hc) y la especie, identificada al menos hasta el nivel de género.

Para el cálculo de la biomasa aérea se utilizó un modelo alométrico propuesto por Chave et al (2015),

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

Donde:

BA : Biomasa arbórea (kg /árbol)

$\delta$  : Densidad de la madera

DAP : Diámetro altura del pecho

H : Altura del árbol

Para el cálculo del carbono se le multiplica por la fracción de carbono de 0.473, posteriormente se sumó el carbono aéreo por parcela y se extrapola a t/ha.

$$CBAT \text{ (kg.)} = CA_1 + CA_2 + \dots + CA_n$$

Dónde:

CBAT = Carbono en la biomasa aérea total en kg

CA = Carbono de árboles

Con el fin de inferir la biomasa a t/ha será a través del siguiente enunciado:

$$CAT \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = CBAT * 0.016$$

Dónde:

CAT = Carbono en la biomasa de árboles vivos en  $\text{t ha}^{-1}$

CBAT = Carbono en la biomasa total de la parcela

### **Biomasa herbácea con diámetros menores a 1.5 cm**

Las herbáceas fueron un componente relevante en la medición del carbono en el bosque, ya que su biomasa contribuyó al total del ecosistema. El procedimiento para la medición de este estrato se desarrolló en las siguientes etapas:

**Paso 1:** En cada lado de la parcela principal de 625 m<sup>2</sup> se establecieron aleatoriamente cuadrantes de 1 × 1 m.

**Paso 2:** La biomasa viva contenida en cada cuadrante fue recolectada mediante el uso de tijeras de podar o cuchillos previamente afilados.

**Paso 3:** El material obtenido se pesó en campo con ayuda de una balanza digital y un trípode construido con recursos disponibles en el lugar.

**Paso 4:** Tras el pesaje total de la biomasa recolectada, se homogenizó el material y se tomó una submuestra, la cual fue pesada, rotulada y luego llevada al laboratorio para su secado hasta peso constante.

Para determinar el carbono en la biomasa de herbácea y hojarasca en toneladas por hectáreas se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{BAH (t/ha)} = ((\text{PSM}/\text{PFM}) \times \text{PFT}) \times 0.01$$

BAH : Biomasa (t/ha)

PSM : Peso seco (g) de la muestra colectada

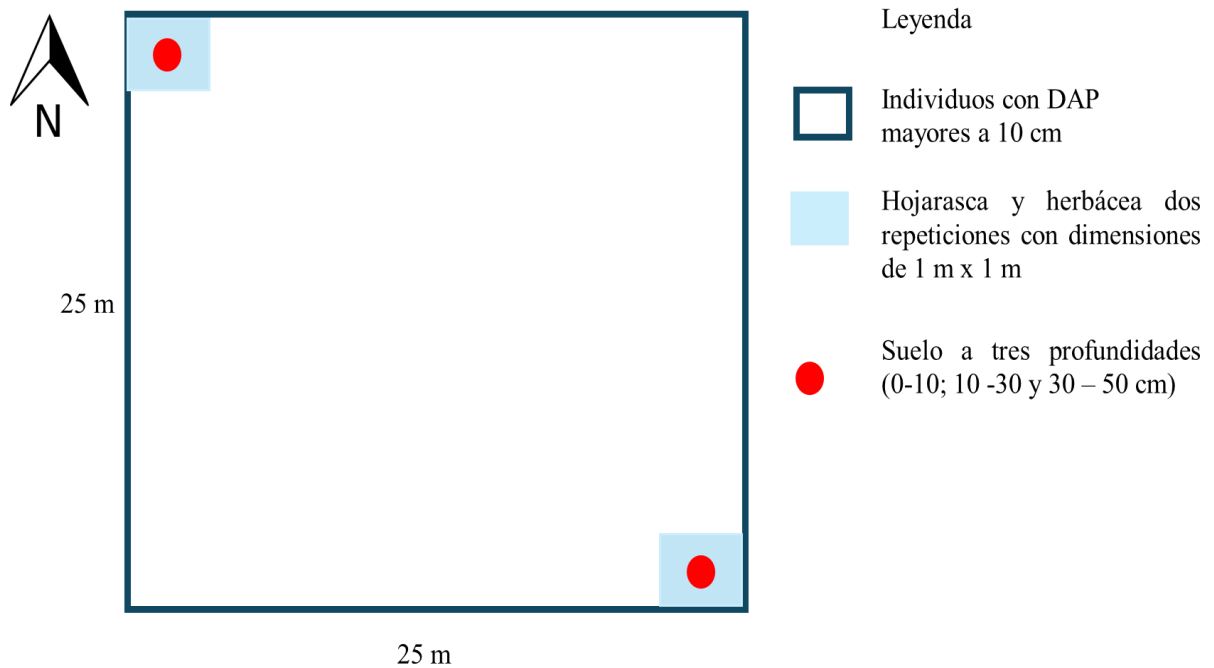
PFM : Peso fresco (g) de la muestra colectada

PFT : Peso fresco total (g) por metro cuadrado

0.01 : Factor de conversión

### **Necromasa de hojarasca con diámetros menores a 1.5 cm**

La recolección de muestras de hojarasca siguió el mismo procedimiento empleado para la colecta de material herbáceo, diferenciándose únicamente en que, en este caso, se obtuvo material muerto.



**Figura 3.** Diseño de parcela de medición de biomasa y carbono.

### Carbono orgánico del suelo

Para el muestreo de carbono orgánico del suelo se evaluaron tres profundidades (0–15 cm, 15–30 cm y 30–50 cm), adaptando al protocolo de Rüginitz et al. (2009) a las condiciones específicas del presente estudio.

Se calculó la densidad aparente, se secaron las muestras a 105 °C y se aplicó el método de Walkley-Black o de combustión seca

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

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

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

Donde:

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

DA = Densidad aparente

Ps = Espesor o profundidad del horizonte del suelo

0.01 = Constante

Para determinar el carbono almacenado en el suelo, se empleó el método de Walkley y Black, a través del cual el porcentaje de materia orgánica (%MO) fue obtenido mediante análisis de laboratorio. La cantidad de carbono almacenado en el suelo se calculó utilizando la siguiente ecuación

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

Donde:

CS : Carbono en el suelo (t/ha)

PVs : Peso del volumen del suelo

%C : Factor de conversión

### 3.2.2.6. Determinación la Diversidad alfa ( $\alpha$ ) y Diversidad beta ( $\beta$ ).

#### 3.2.2.6.1. Diversidad alfa ( $\alpha$ ).

a) Riqueza específica: Especies (s). (N°)

La riqueza específica (S) se define por el simple conteo de especies registradas, sin considerar su valor de importancia dentro del ecosistema (Moreno, 2001). Para estimarla, se emplean índices que permiten medir la riqueza independientemente del tamaño de la muestra, los cuales se fundamentan en la relación entre S y el número total de individuos observados (n), el cual tiende a aumentar conforme se amplía el esfuerzo de muestreo.

b) índice de Margalef (1958)

$$R = \frac{S-1}{\ln(n)} \quad (2)$$

c) Medición de la Estructura:

- Índices de dominancia: Índice de Simpson (S) ó ( $\lambda$ ).

$$D_{Si} = \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (3)$$

El valor de  $p_i$  corresponde a la abundancia proporcional de la  $i$ -ésima especie y expresa la probabilidad de encontrar un individuo de dicha especie dentro de la muestra. En consecuencia, la suma de todos los valores de  $p_i$  es igual a 1.

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad (4)$$

$n_i$  = número de individuos de la especie  $i$

$N$  = número total de individuos para todas las  $S$  especies en la comunidad.

La ecuación de  $D_{Si}$  se utiliza en comunidades finitas, es decir, cuando se ha contabilizado la totalidad de los individuos y, por lo tanto,  $n = N$ . En el caso de comunidades extensas, donde solo se dispone de una muestra de tamaño  $n$ , se emplea un estimador de diversidad más apropiado calculado a partir de dichos datos.

$$D'_{Si} = \sum_{i=1}^S \frac{n_i(n_i-1)}{n(n-1)} \quad (5)$$

El índice de Simpson, fundamentado en la teoría de probabilidades, estima la probabilidad de seleccionar al azar, en dos extracciones consecutivas sin reposición, a dos individuos pertenecientes a la misma especie. Dado que este planteamiento refleja una propiedad inversa a la diversidad, surge la necesidad de aplicar una transformación adecuada que permita expresar el resultado en forma directamente correlacionada con la diversidad.

$$S_{iD} = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 = 1 - D_{Si} \quad (6)$$

El  $S_{iD}$ , o índice de diversidad de Simpson, expresa la probabilidad de que dos individuos seleccionados al azar en extracciones consecutivas sin reposición pertenezcan a especies distintas. Este indicador otorga mayor relevancia a las especies dominantes, lo que implica una subestimación de aquellas de baja frecuencia. Sus valores oscilan entre 0, que refleja baja diversidad, y un máximo de  $[1 - 1/S]$ , asociado a una comunidad más diversa.

- Índices de equidad – Índice de Shannon-Wiener ( $H'$ ), 1949. Este indicador, fundamentado en la teoría de la información, evalúa el contenido de información asociado a un mensaje conformado por  $S$  clases de símbolos discretos, cada uno con una probabilidad de ocurrencia  $p_1 \dots p_S$ . Se trata de uno de los índices más utilizados en ecología de comunidades para medir la equidad en la distribución de las especies.

$$H' = - \sum_{i=1}^S (p_i \times \log_2 p_i) \quad (7)$$

En consecuencia, el valor de  $H'$  es igual a 0 cuando en la muestra se registra únicamente una especie. Por el contrario,  $H'$  alcanza su valor máximo cuando todas las especies presentes ( $S$ ) se encuentran representadas por un número idéntico de individuos ( $ni$ ).

*Diversidad beta ( $\beta$ ) (Índices con datos cualitativos):*

- Coeficiente de similitud de Jaccard ( $C_j$ ) ó ( $I_j$ )

$$I_j = \frac{c}{a+b-c} \quad (8)$$

Donde:

$a$  = número de especies presentes en el sitio A

$b$  = número de especies presentes en el sitio B

$c$  = número de especies presentes en ambos sitios A y B

- Coeficiente de similitud de Morisita ( $I_m$ )

$$I_\delta = q \sum_{i=1}^q n_i \frac{(n_i - 1)}{N(N - 1)} \quad (9)$$

Donde:

$I_\delta$  = índice de distribución espacial.

$q$  = número de transectos.

$n_i$  = número de individuos en el  $i$ -ésimo transecto.

$N$  = número total de individuos en todos los  $q$  transectos.

### 3.2.2.7. Relación entre el carbono presente en los estratos y la diversidad alfa ( $\alpha$ ).

El análisis de los datos se efectuó utilizando la prueba estadística de Shapiro-Wilk en su versión modificada. En los casos donde se verificó el cumplimiento del supuesto de normalidad, la relación entre el carbono presente en los distintos estratos y la diversidad alfa se determinó mediante el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ). Este coeficiente puede oscilar entre -1,00 y +1,00, donde:

-1,00 = correlación negativa perfecta. Esto significa que la relación entre las variables es inversamente proporcional: a medida que X aumenta en una unidad, Y disminuye en una cantidad constante, y viceversa, cuando X se reduce, Y incrementa de forma proporcional.

-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).

Donde el signo indicó la dirección o proyección de la correlación (positiva o negativa) y el valor numérico representó la magnitud de la correlación. El análisis se realizó mediante el programa estadístico Infostat, interpretándose si el coeficiente fue o no significativo:

$r = 0.7831$  (valor del coeficiente)

P-valor = 0.001 (significancia)

En relación con el p-valor, cuando este resultó inferior a 0,05 se consideró que el coeficiente era estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95 %. No obstante, si el valor fue menor a 0,01, la significancia se estableció al 99 %, lo que indica un 99 % de certeza en la existencia de la correlación y apenas un 1 % de probabilidad de error.

### 3.2.2.8. Determinación del pago por servicios ambientales generados por la captura de carbono

Para estimar el valor económico del servicio ambiental de captura de carbono, se consideró la cantidad total de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2e</sub>) almacenado en los diferentes compartimentos evaluados (biomasa aérea, hojarasca, herbácea y carbono del suelo hasta 50 cm de profundidad). El cálculo se realizó multiplicando el total de CO<sub>2e</sub>, expresado en toneladas por hectárea (tCO<sub>2e</sub>/ha), por el precio de mercado vigente para una tonelada de CO<sub>2e</sub>.

La fórmula empleada fue la siguiente:

$$VE = CO_{2e} \times P$$

Donde:

VE : Valor económico del servicio de captura de carbono, expresado en dólares estadounidenses por hectárea (US\$/ha).

CO<sub>2e</sub> : Cantidad total de dióxido de carbono equivalente almacenado, en toneladas por hectárea (tCO<sub>2e</sub>/ha).

P : Precio de mercado de la tonelada de CO<sub>2e</sub> (US\$/tCO<sub>2e</sub>).

El precio de referencia empleado correspondió al valor reportado por la Bolsa Española de Derechos de Emisiones de Dióxido de Carbono (SENDECO<sub>2</sub>), el cual fue de 7,88 US\$/tCO<sub>2</sub>. Este valor se utilizó para estimar el pago por servicio ambiental de captura de carbono en cada componente evaluado y para la totalidad del área con bosque primario de 1 406 hectáreas de la comunidad.

### 3.2.2.9. Técnicas de recolección y procesamiento de la información

#### *Técnicas bibliográficas*

- a) Análisis de contenido: Serán analizados de las fuentes primarias, secundarias y terciarias y redactados según el modelo APA.
- b) Fichaje: Serán redactados según el modelo APA.

#### *Técnicas de campo*

- a) Observación
- b) Evaluación

### ***Técnicas estadísticas***

Descriptiva, porque los resultados fueron expresados en tablas y figuras que mostraron información sobre el carbono y los estratos vegetales. Correlacional, porque se analizaron utilizando el método de correlación de Pearson, el cual mide únicamente relaciones lineales.

De acuerdo con Scott (1998, p. 67), citado por Jacobo et al. (2013, p. 169), la estadística descriptiva proporciona herramientas para organizar y sintetizar la información obtenida de un conjunto de datos. Entre las principales técnicas empleadas para la presentación de dicha información se incluyen las tablas, las representaciones gráficas y los diferentes tipos de medidas de tendencia central.

### **Instrumentos de recolección y procesamiento de la información**

#### *Fichas:*

- a) De resumen.
- b) De transcripción.
- c) De comentario.

#### *Fichas:*

De localización (autor, año de publicación, título, subtítulo, edición, mención de autor secundario, ciudad de publicación, país de publicación, editorial, paginación, (serie) y notas.

#### *Instrumentos de campo*

- a) Tabla Munsell
- b) Ficha de recolección de datos
- c) Guía de laboratorio
- d) Claves taxonómicas a nivel de especies
- e) Guías de campo.
- f) Identificación dendrológica.

#### *Instrumentos estadísticos*

Los datos fueron procesados a través del software Microsoft Excel, utilizando una calculadora de carbono, y el análisis estadístico se realizó aplicando pruebas de estadística descriptiva, análisis de varianza y análisis de componentes principales (ACP). Para el análisis de la composición florística se empleó el software Infostat versión 2020, presentándose los resultados en cuadros.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Carbono en la biomasa aérea y suelo en la Comunidad Santa Isabel

#### 4.1.1. Carbono en el nivel aéreo

En la **Tabla 1** se presentan los resultados del carbono almacenado en la biomasa aérea de dos categorías estructurales del bosque: fustales y maduros. Se observa que la categoría de árboles maduros presentó la mayor acumulación de carbono, con una media de 6 397,87 kg por parcela de 625 m<sup>2</sup>, mientras que los fustales registraron una media de 2 472,81 kg en la misma superficie. Esta diferencia está asociada al mayor tamaño y desarrollo estructural de los individuos maduros, los cuales contribuyen de manera más significativa al almacenamiento de biomasa y, por ende, de carbono.

En cuanto a la variabilidad de los datos, se evidencia una alta dispersión tanto en los fustales (coeficiente de variación de 95,67%) como en los maduros (111,35%), lo cual indica una marcada heterogeneidad en la composición y estructura del bosque evaluado. Esta condición puede atribuirse a factores como el grado de intervención, el historial de uso del suelo, o la regeneración natural desigual en las parcelas estudiadas.

El valor total de carbono almacenado en la biomasa aérea de ambas categorías en la parcela de 625 m<sup>2</sup> fue de 8 870,68 kg, lo que equivale a 141,93 toneladas por hectárea (tC/ha). Este valor representa una estimación del carbono que actualmente se encuentra fijado en los componentes arbóreos del ecosistema, y resalta el papel crucial del bosque en la mitigación del cambio climático a través del secuestro de carbono.

**Tabla 1.** Carbono almacenado en la biomasa aérea de fustales y maduros

Categoría	n	Media	D.E.	CV (%)	Mín	Máx
Fustal	18	2472.81	2365.76	95.67	37.44	7687.75
Maduro	11	6397.87	7123.89	111.35	462.46	22159.69
Carbono total (kg)			8870.68			
Carbono t/ha			141.93088			

El carbono almacenado en la biomasa aérea alcanzó 141,93 tC/ha, siendo superior al reportado por Díaz (2023) en bosques de terraza baja de Loreto (8,47 tC/ha) y al de Ruiz y Alberca (2023) en bosques secos de Jaén (0,925 tC/ha), lo que puede atribuirse a que ambos estudios se desarrollaron en ecosistemas con menor densidad arbórea y estructuras menos

desarrolladas que los bosques evaluados en Santa Isabel. De manera similar, el valor registrado supera al de Diaz y Heyn (2022) en un bosque secundario de Paraguay (59,2 tC/ha), lo que se relaciona con el mayor grado de madurez y menor intervención del bosque estudiado.

En comparación con Ore et al. (2022), quienes registraron 143,96 tC/ha en colina alta y 84,59 tC/ha en colina baja de bosques naturales de Huánuco, el valor obtenido en Santa Isabel es ligeramente inferior al máximo y superior al mínimo, lo que evidencia similitud en la magnitud de captura debido a condiciones ecológicas regionales semejantes, pero con variaciones asociadas a la topografía y composición florística.

En contraste, el valor encontrado es inferior al reportado por Sosa (2014) en bosques de colina alta (142,5 tC/ha), aunque muy cercano, lo que podría deberse a que ambos sitios poseen especies de gran porte y alta densidad de madera. Sin embargo, el presente estudio presenta menor variabilidad en la estructura diamétrica que Sosa, lo que puede influir en la ligera diferencia.

Estas diferencias pueden explicarse principalmente por el estado sucesional del bosque, la composición de especies y la historia de uso del suelo. Bosques primarios o maduros con individuos de gran diámetro y altura, como los presentes en Santa Isabel, tienden a acumular más carbono que bosques secundarios o intervenidos. Asimismo, factores como la precipitación, la fertilidad del suelo y las prácticas de manejo influyen directamente en la acumulación de biomasa aérea.

#### **4.1.2. Carbono en herbácea y hojarasca**

La evaluación del carbono almacenado en la biomasa de hojarasca y vegetación herbácea en la comunidad de Santa Isabel, Yuyapichis-Huánuco, evidencia diferencias en la capacidad de estos dos componentes del estrato inferior para retener carbono (**Tabla 2**).

La hojarasca presentó un valor medio de 2,55 tC/ha, con una desviación estándar (D.E.) de 1,33 tC/ha y un coeficiente de variación (C.V.) de 52,34%, lo que indica una alta heterogeneidad entre parcelas. Este resultado refleja la dinámica propia de la hojarasca, cuya acumulación depende de factores como la fenología de las especies arbóreas, la intensidad de caída foliar, la descomposición microbiana y las condiciones microclimáticas del sotobosque. El valor mínimo registrado fue 0,94 tC/ha y el máximo 5,99 tC/ha, evidenciando desde sitios con escasa cobertura foliar en descomposición hasta áreas con acumulaciones significativas.

Por su parte, la biomasa herbácea mostró un promedio de 1,18 tC/ha, con menor variabilidad relativa (C.V. = 46,8%) respecto a la hojarasca. El intervalo observado (0,39–2,63 tC/ha) sugiere que la contribución de este componente, aunque menor en magnitud, es más estable entre las parcelas evaluadas. La presencia y abundancia de vegetación herbácea en los claros y zonas con mayor penetración de luz puede explicar parte de la variación encontrada.

En términos comparativos, la hojarasca almacena en promedio más del doble de carbono que la vegetación herbácea, lo que resalta su importancia como reservorio transitorio de carbono antes de su incorporación al suelo como materia orgánica. Estos resultados son consistentes con la literatura que reconoce a la hojarasca como un componente clave en el ciclo del carbono en ecosistemas forestales tropicales, al actuar como puente entre la biomasa aérea y el carbono edáfico.

**Tabla 2.** Carbono almacenado (t/ha) en la biomasa de hojarasca y herbácea

Variable	n	Media	D.E.	CV (%)	Mín	Máx
Hojarasca	19	2.55	1.33	52.34	0.94	5.99
Herbácea	19	1.18	0.55	46.8	0.39	2.63

D.E.: Desviación estándar; C.V (%): Coeficiente de variación; Min: Mínimo; Max: Máximo

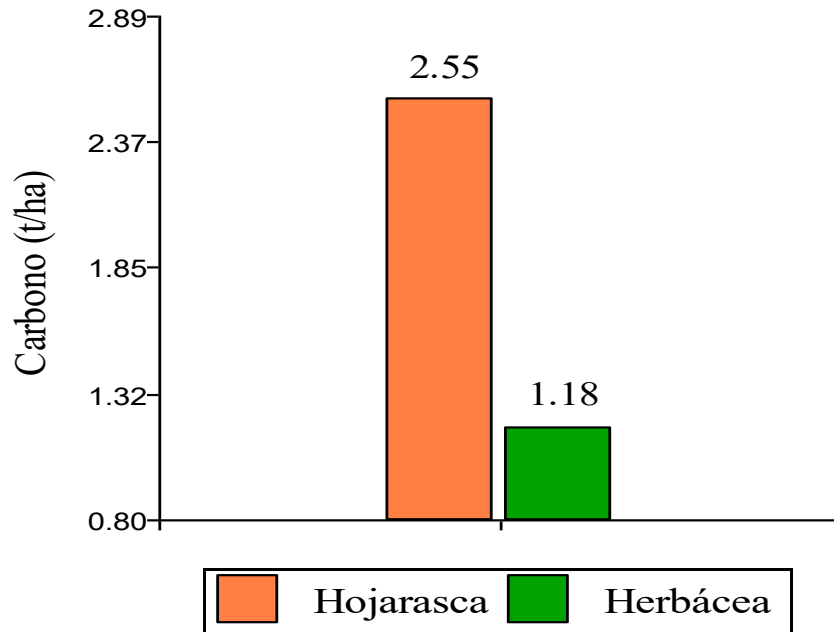
La hojarasca almacenó 2,55 tC/ha, valor inferior al reportado por Navarro-Martínez et al. (2024) en bosques templados de Guerrero (4,52 tC/ha) y al de Aguilar-Arias et al. (2023) en bosques primarios de Costa Rica (9,75 t/ha de mantillo). Esta diferencia podría deberse a que dichos estudios se realizaron en ecosistemas con mayor acumulación anual de hojas y ramas finas, ya sea por la fenología de especies dominantes o por condiciones climáticas que reducen la velocidad de descomposición.

En contraste, el valor obtenido es similar al registrado por Cano-Flores et al. (2020) en mantillo de bosques mixtos de México ( $\approx$  2,25 tC/ha considerando el 50% de C en la biomasa), lo que sugiere que la dinámica de acumulación y descomposición en Santa Isabel se asemeja a la de bosques templados de altitud intermedia, donde la descomposición es moderada.

Para la biomasa herbácea, el promedio de 1,18 tC/ha fue superior al registrado por Navarro-Martínez et al. (2024) en sotobosque de bosques templados (0,61 tC/ha), lo cual puede explicarse por la mayor penetración de luz en algunos sectores de las parcelas evaluadas en Santa Isabel, favoreciendo el crecimiento herbáceo. Sin embargo, sigue siendo inferior al de ecosistemas con alta apertura de dosel o sistemas agroforestales jóvenes, donde la

vegetación herbácea es dominante.

Las diferencias detectadas en la hojarasca y el estrato herbáceo se deben principalmente a la estructura del dosel y a la tasa de descomposición. En bosques húmedos tropicales como Santa Isabel, la descomposición es rápida por la alta temperatura y humedad, reduciendo la acumulación visible de hojarasca, mientras que la vegetación herbácea depende de los claros y perturbaciones que permitan mayor entrada de luz.



**Figura 1.** Carbono almacenado en hojarasca y herbácea

#### 4.1.3. Carbono en el suelo

La evaluación del carbono orgánico en el suelo en la comunidad de Santa Isabel, Yuyapichis-Huánuco, evidenció diferencias significativas entre los tres estratos de profundidad muestreados (**Tabla 2**). La capa superficial (0–10 cm) presentó una media de 27 tC/ha, con un coeficiente de variación (C.V.) de 27,76%, reflejando una menor variabilidad relativa en comparación con las capas más profundas. Este menor valor promedio puede estar asociado a procesos de mineralización más intensos en la superficie debido a una mayor exposición a factores climáticos, actividad microbiana y descomposición acelerada de la materia orgánica recientemente incorporada.

En contraste, la capa intermedia (10–30 cm) mostró la mayor acumulación de carbono, con una media de 42,18 tC/ha y un C.V. de 35,29%, lo que sugiere una mayor estabilidad de la materia orgánica en esta zona del perfil. Este patrón podría explicarse por la

incorporación de carbono proveniente de raíces finas y exudados radiculares, junto con una menor perturbación física y oxidativa que en la superficie, favoreciendo su preservación. Además, la amplitud de valores (17,42 a 69,29 tC/ha) indica que, aunque predominan valores intermedios, existen parcelas con altas reservas de carbono en este estrato.

Por su parte, la capa profunda (30–50 cm) registró un promedio de 39,52 tC/ha, ligeramente inferior al de la capa intermedia, pero con un C.V. de 38,75%, lo que indica una dispersión relativamente alta. El contenido de carbono en este estrato podría estar influenciado por el transporte vertical de compuestos orgánicos disueltos, acumulación de raíces profundas y procesos de humificación más avanzados, que otorgan al carbono mayor estabilidad y tiempos de residencia más prolongados.

En conjunto, los resultados muestran que la mayor reserva de carbono se concentra en la capa de 10–30 cm, lo que resalta la importancia de considerar el perfil completo del suelo para estimaciones precisas de carbono orgánico. Limitar la medición únicamente a la capa superficial podría subestimar el potencial de almacenamiento, especialmente en ecosistemas con vegetación perenne y suelos poco disturbados, como los presentes en la comunidad de Santa Isabel.

**Tabla 3.** Medidas de resumen de carbono orgánico almacenado en el suelo (t/ha)

Profundidad	n	Media	D.E.	C.V (%)	Mín.	Max
0 - 10 cm	18	27	7.49	27.76	13.74	43.47
10 - 30 cm	18	42.18	14.88	35.29	17.42	69.29
30 - 50 cm	18	39.52	15.31	38.75	14.09	67.94

D.E: Desviación estándar; C.V (%): Coeficiente de variación; Mín: Mínimo; Max: Máximo

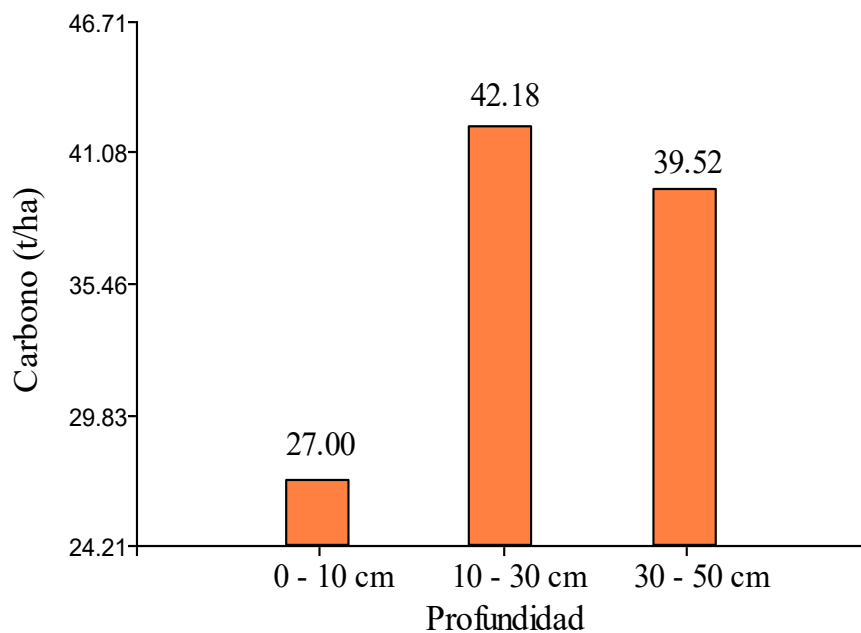
En el estudio, la mayor acumulación de carbono orgánico se registró en la capa de 10–30 cm con 42,18 tC/ha, seguida por la capa de 30–50 cm (39,52 tC/ha) y la superficial de 0–10 cm (27 tC/ha). Este patrón difiere del reportado por Morales-Inocente et al. (2020), quienes encontraron mayor concentración en la capa superficial (70% del total en los primeros 20 cm), posiblemente debido a diferencias en la dinámica de incorporación de materia orgánica y a la bioturbación.

En comparación con Suhaili et al. (2021) en bosques intactos de Malasia (101,62 tC/ha totales en suelo), los valores de Santa Isabel son inferiores, lo que podría deberse a diferencias edafoclimáticas y a la mayor antigüedad y estabilidad de los suelos malayos. Sin embargo, son superiores a los encontrados por Namaswa et al. (2025) en bosques secos de Kenia

(1,8% de COS, equivalente a valores bajos en tC/ha), lo que evidencia la influencia positiva de la humedad y cobertura arbórea densa en Santa Isabel.

Los valores obtenidos en Santa Isabel son también similares a los de Cano-Flores et al. (2020) (84,03 Mg C/ha en 0–20 cm), considerando que la suma de las tres capas evaluadas en este estudio se aproxima a dicho valor. Esta semejanza indica que, a pesar de las diferencias geográficas, los bosques maduros con suelos poco disturbados tienden a acumular cantidades comparables de carbono edáfico.

Las diferencias observadas pueden deberse a la textura del suelo, profundidad efectiva, aporte de raíces finas y grado de perturbación. Suelos con mayor contenido de arcilla y estabilidad estructural, así como aquellos con alta densidad de raíces en profundidad, favorecen la retención de carbono en capas medias y profundas, como se evidenció en Santa Isabel.



**Figura 2.** Carbono orgánico en el suelo (t/ha) a tres profundidades

## 4.2. Diversidad alfa ( $\alpha$ ) y diversidad beta ( $\beta$ ) en los estratos de la comunidad Santa Isabel

### 4.2.1. Diversidad alfa

La diversidad alfa en las 18 parcelas estudiadas se evaluó mediante los índices de Simpson (1-D), Shannon (H) y Margalef, los cuales brindan una perspectiva integral sobre la composición y estructura de la comunidad. El índice de Simpson (1-D) varía entre 0.77 y 0.98, indicando en la mayoría de las parcelas una alta dominancia de especies, lo que sugiere

ecosistemas relativamente diversos con una distribución equitativa de especies. Parcelas como la P12 (0.98) y P14 (0.95) presentan los valores más altos, lo que refleja una baja dominancia de una sola especie y una mayor uniformidad en la abundancia relativa. En contraste, la P16 (0.77) tiene el valor más bajo, lo que indica una mayor desigualdad en la distribución de especies y una posible dominancia de unas pocas especies sobre el resto.

**Tabla 4.** Índices de diversidad alfa

Parcelas	Simpson_1-D	Shannon_H	Margalef
P1	0.92	2.78	3.95
P2	0.93	2.89	4.87
P3	0.94	2.95	4.62
P4	0.82	2.32	3.69
P5	0.88	2.57	3.60
P6	0.92	2.72	3.54
P7	0.90	2.80	5.11
P8	0.94	3.28	7.26
P9	0.91	2.13	2.61
P10	0.94	2.86	4.50
P11	0.88	2.33	2.98
P12	0.98	3.69	8.22
P13	0.94	3.12	6.07
P14	0.95	3.04	5.17
P15	0.96	3.20	5.63
P16	0.77	1.96	2.83
P17	0.86	2.87	6.70
P18	0.90	2.75	4.83

El índice de Shannon (H), que mide la riqueza y equitatividad, oscila entre 1.96 y 3.69. Los valores más altos se presentan en P12 (3.69), P8 (3.28) y P15 (3.20), lo que sugiere que estas parcelas tienen una mayor diversidad de especies con una distribución más equitativa. En cambio, P16 (1.96) y P9 (2.13) tienen los valores más bajos, reflejando ecosistemas menos diversos o con una distribución más desigual de las especies. La mayor diversidad en ciertas parcelas puede estar asociada a factores ambientales como disponibilidad de recursos, variabilidad en microhábitats o menor presión de disturbios ecológicos.

El índice de Margalef, que representa la riqueza de especies ajustada por

el número de individuos, presenta valores entre 2.61 y 8.22. P12 (8.22), P8 (7.26) y P17 (6.70) muestran los valores más elevados, lo que indica que estas parcelas tienen una mayor riqueza de especies en relación con su número total de individuos. En contraste, P9 (2.61) y P11 (2.98) presentan los valores más bajos, lo que sugiere comunidades menos diversas o con menor número de especies presentes. Este patrón sugiere que ciertas parcelas pueden estar ubicadas en áreas con mayor heterogeneidad ambiental o en zonas con menor perturbación (Tabla 1 y Figura 1).

En general, los índices de diversidad alfa reflejan variaciones significativas en la composición de las parcelas, con algunas áreas presentando una mayor riqueza y equitatividad que otras. Esto puede deberse a factores ecológicos como la heterogeneidad del hábitat, la disponibilidad de recursos o la historia de perturbaciones. Las parcelas con mayor diversidad pueden ser clave para la conservación, ya que albergan una mayor variedad de especies y promueven la estabilidad ecológica del ecosistema.

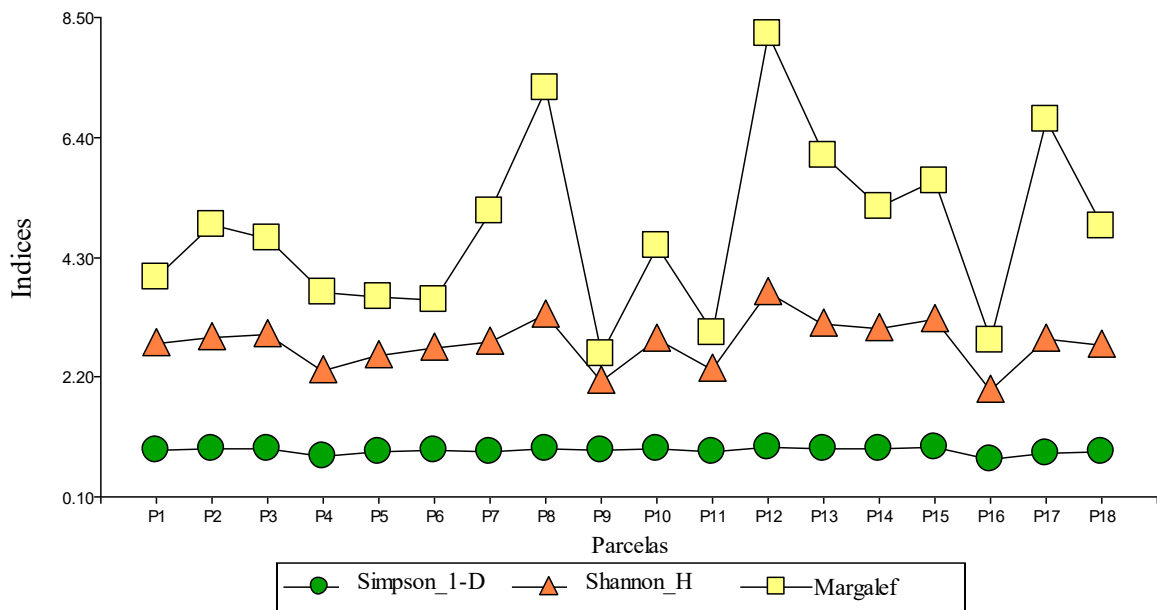


Figura 3. Diversidad alfa en las subparcelas

#### 4.2.2. Diversidad beta

**Tabla 5.** Índice de similitud de Jaccard

Parcelas	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18
P1	1.00	0.11	0.32	0.21	0.38	0.29	0.19	0.25	0.22	0.19	0.22	0.17	0.15	0.19	0.21	0.06	0.06	0.08
P2	0.11	1.00	0.13	0.11	0.11	0.05	0.05	0.06	0.04	0.09	0.10	0.08	0.05	0.13	0.12	0.10	0.11	0.14
P3	0.32	0.13	1.00	0.19	0.23	0.16	0.21	0.23	0.11	0.14	0.13	0.19	0.11	0.21	0.20	0.06	0.08	0.10
P4	0.21	0.11	0.19	1.00	0.15	0.15	0.14	0.20	0.04	0.16	0.07	0.08	0.15	0.17	0.15	0.07	0.09	0.11
P5	0.38	0.11	0.23	0.15	1.00	0.41	0.14	0.26	0.08	0.09	0.11	0.11	0.13	0.14	0.19	0.07	0.09	0.11
P6	0.29	0.05	0.16	0.15	0.41	1.00	0.11	0.33	0.04	0.03	0.07	0.06	0.05	0.05	0.22	0.07	0.04	0.08
P7	0.19	0.05	0.21	0.14	0.14	0.11	1.00	0.40	0.07	0.15	0.10	0.15	0.15	0.16	0.21	0.00	0.04	0.08
P8	0.25	0.06	0.23	0.20	0.26	0.33	0.40	1.00	0.05	0.21	0.12	0.20	0.18	0.22	0.28	0.02	0.12	0.15
P9	0.22	0.04	0.11	0.04	0.08	0.04	0.07	0.05	1.00	0.26	0.19	0.14	0.14	0.16	0.14	0.00	0.00	0.00
P10	0.19	0.09	0.14	0.16	0.09	0.03	0.15	0.21	0.26	1.00	0.26	0.28	0.24	0.56	0.31	0.04	0.09	0.16
P11	0.22	0.10	0.13	0.07	0.11	0.07	0.10	0.12	0.19	0.26	1.00	0.22	0.19	0.31	0.23	0.00	0.11	0.03
P12	0.17	0.08	0.19	0.08	0.11	0.06	0.15	0.20	0.14	0.28	0.22	1.00	0.26	0.28	0.18	0.02	0.15	0.13
P13	0.15	0.05	0.11	0.15	0.13	0.05	0.15	0.18	0.14	0.24	0.19	0.26	1.00	0.27	0.16	0.03	0.08	0.10
P14	0.19	0.13	0.21	0.17	0.14	0.05	0.16	0.22	0.16	0.56	0.31	0.28	0.27	1.00	0.31	0.00	0.16	0.17
P15	0.21	0.12	0.20	0.15	0.19	0.22	0.21	0.28	0.14	0.31	0.23	0.18	0.16	0.31	1.00	0.09	0.08	0.13
P16	0.06	0.10	0.06	0.07	0.07	0.07	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.02	0.03	0.00	0.09	1.00	0.02	0.07
P17	0.06	0.11	0.08	0.09	0.09	0.04	0.04	0.12	0.00	0.09	0.11	0.15	0.08	0.16	0.08	0.02	1.00	0.14
P18	0.08	0.14	0.10	0.11	0.11	0.08	0.08	0.15	0.00	0.16	0.03	0.13	0.10	0.17	0.13	0.07	0.14	1.00

El índice de similitud de Jaccard permite evaluar el grado de similitud en la composición de especies entre las diferentes parcelas estudiadas. En este análisis, se observa que las mayores similitudes se presentan entre la parcela P10 y P14 (0.56), lo que indica que comparten una alta proporción de especies en comparación con el resto de las parcelas. Asimismo, P10 y P12 también muestran un valor relativamente alto (0.28), sugiriendo cierta estabilidad en la composición florística en estas áreas.

Por otro lado, las parcelas P16 y P9, así como P16 y P7, presentan valores cercanos a 0, lo que indica una composición de especies marcadamente diferente entre ellas. Estos resultados sugieren que existen zonas con una gran variabilidad en la estructura y diversidad de especies, lo que podría estar influenciado por factores ambientales, de disturbio o por diferencias en la edad de la vegetación.

En términos generales, los valores de similitud en la mayoría de las comparaciones son bajos, con una tendencia a mantenerse por debajo de 0.30. Esto indica una heterogeneidad significativa en la comunidad de especies dentro del área de estudio. Esta variabilidad puede reflejar distintos grados de sucesión ecológica, diferencias en el tipo de suelo o microhábitats diferenciados dentro del ecosistema.

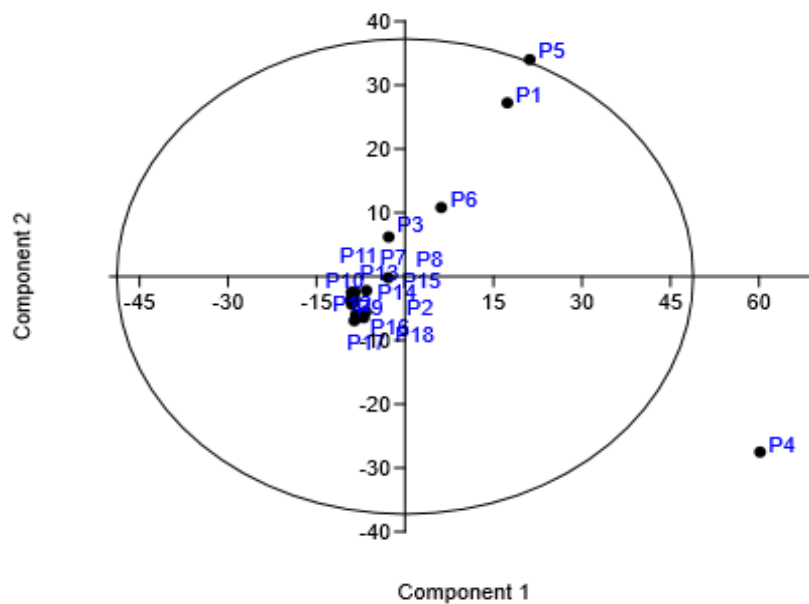
Los resultados obtenidos sugieren la necesidad de un análisis más detallado para identificar los factores que influyen en la diferenciación de las parcelas y su posible impacto en la diversidad beta del área de estudio. Además, estos valores pueden ser útiles para estrategias de conservación y manejo, identificando zonas de alta similitud para posibles corredores ecológicos o de restauración (Tabla 2 y Figura 2).

La Figura 2 muestra un análisis de componentes principales (PCA), que permite visualizar la distribución de las parcelas en función de su composición de especies. Se observa que la mayoría de las parcelas están agrupadas en el centro del gráfico, lo que indica una similitud en su estructura florística. Sin embargo, algunas parcelas, como P4, P5 y P1, se encuentran más alejadas, sugiriendo que presentan una composición distinta en comparación con el resto.

El primer componente (Componente 1) parece capturar la mayor variabilidad en los datos, mientras que el segundo componente (Componente 2) explica una

menor proporción de la variación. La dispersión de los puntos indica diferencias en la estructura de las parcelas, lo que puede estar relacionado con factores ambientales, históricos o de manejo.

En general, este análisis sugiere que existen grupos de parcelas con características similares, mientras que otras son más divergentes. Esto podría ser útil para establecer estrategias de manejo y conservación basadas en la diferenciación de las comunidades de especies.



**Figura 4.** Análisis de componentes principales

El análisis de clúster basado en el coeficiente de Jaccard muestra la similitud entre parcelas según su composición de especies, donde valores cercanos a 1 indican mayor similitud y valores bajos menor relación. Se identifican grupos diferenciados, como P17 y P18 con alta similitud, y otro conformado por P5, P6, P1 y P7, mientras que P16 se distingue como la más diferente. Estos resultados permiten clasificar comunidades vegetales y planificar estrategias de manejo y conservación basadas en la similitud florística entre parcelas.

Los valores de diversidad alfa, medidos con los índices de Simpson (1-D), Shannon (H) y Margalef, evidenciaron una variabilidad considerable entre parcelas, alcanzando máximos de 0,98 (Simpson), 3,69 (Shannon) y 8,22 (Margalef) en las parcelas más diversas, y mínimos de 0,77, 1,96 y 2,61, respectivamente, en las menos diversas. Estos valores son

inferiores a los registrados por Flores (2022) en bosques de terraza alta con castaña en Madre de Dios, donde el índice de Shannon alcanzó 5,06, lo que indica una mayor riqueza y equitatividad en ese ecosistema. La diferencia podría deberse a que los bosques de terraza alta evaluados por dicho autor poseen un mayor número de especies raras y endémicas, así como menor historial de perturbaciones antrópicas.

Sin embargo, los valores obtenidos en Santa Isabel son superiores a los reportados por Moscol et al. (2022) en un bosque seco, donde Shannon osciló entre 0 y 1,39 y Simpson entre 0 y 0,75, lo que se explica por la mayor limitación hídrica y menor heterogeneidad estructural en los bosques secos. Asimismo, en comparación con los resultados de Pilco (2023) en colinas altas y bajas de Tingo María, los valores de Simpson (0,77–0,98) son similares a los de colina baja (0,94) y superiores a los de colina alta (0,88), mientras que el índice de Shannon (1,96–3,69) se encuentra dentro del rango medio, evidenciando una diversidad moderada-alta comparable a ecosistemas amazónicos secundarios y maduros.

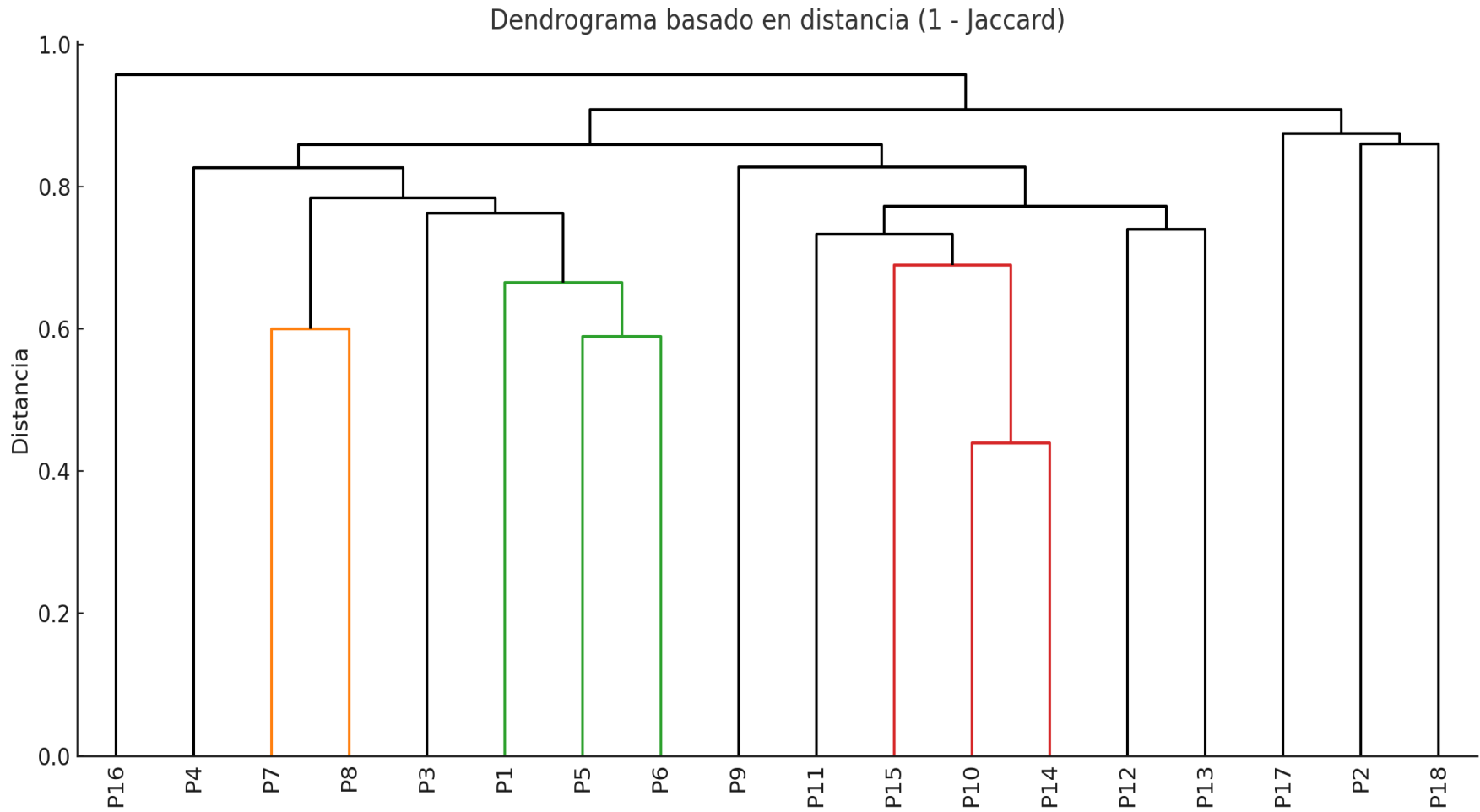
El índice de Margalef en Santa Isabel (2,61–8,22) fue similar al registrado en colina alta por Pilco (8,218) y ligeramente superior al de colina baja (6,435), lo que indica que la riqueza de especies, ajustada al número de individuos, es comparable a la de bosques regionales de características topográficas semejantes. Las diferencias encontradas entre parcelas de Santa Isabel podrían atribuirse a variaciones en la estructura del dosel, la disponibilidad de luz y la heterogeneidad del microhábitat, así como a diferentes niveles de regeneración natural asociados al historial de uso del suelo.

En cuanto a la diversidad beta, los valores del índice de Jaccard fueron en su mayoría inferiores a 0,30, indicando una baja similitud florística entre parcelas. Esto contrasta con González-Arévalo et al. (2025), quienes reportaron mayor similitud (hasta 0,60) entre ciertas coberturas en Michoacán, posiblemente debido a la homogeneidad estructural dentro de cada tipo de cobertura en su área de estudio. No obstante, algunos pares de parcelas en Santa Isabel (P10–P14 = 0,56) alcanzaron niveles de similitud moderados, cercanos a los reportados por Pilco (2023) para colinas bajas y altas (0,43), lo que sugiere que ciertos sectores de la comunidad comparten especies dominantes y condiciones ambientales semejantes.

El patrón de baja similitud general también coincide con lo descrito por He et al. (2020) en bosques tropicales de Hainan, donde la diversidad beta estuvo fuertemente influenciada por gradientes ambientales y la heterogeneidad del paisaje. En Santa Isabel, esta

diferenciación podría deberse a la variabilidad en la topografía, la presencia de microhábitats particulares y diferencias en el grado de intervención.

En síntesis, la diversidad alfa registrada es intermedia-alta en comparación con otros estudios amazónicos y superior a la de ecosistemas más limitantes como los bosques secos, mientras que la diversidad beta refleja una marcada heterogeneidad florística, lo que resalta la importancia de mantener un mosaico de hábitats para conservar el conjunto completo de especies presentes en la comunidad. Esta combinación de valores sugiere que la planificación de conservación en Santa Isabel debería priorizar tanto parcelas de alta diversidad como aquellas con composiciones florísticas únicas, para asegurar la representatividad ecológica y funcional del paisaje.

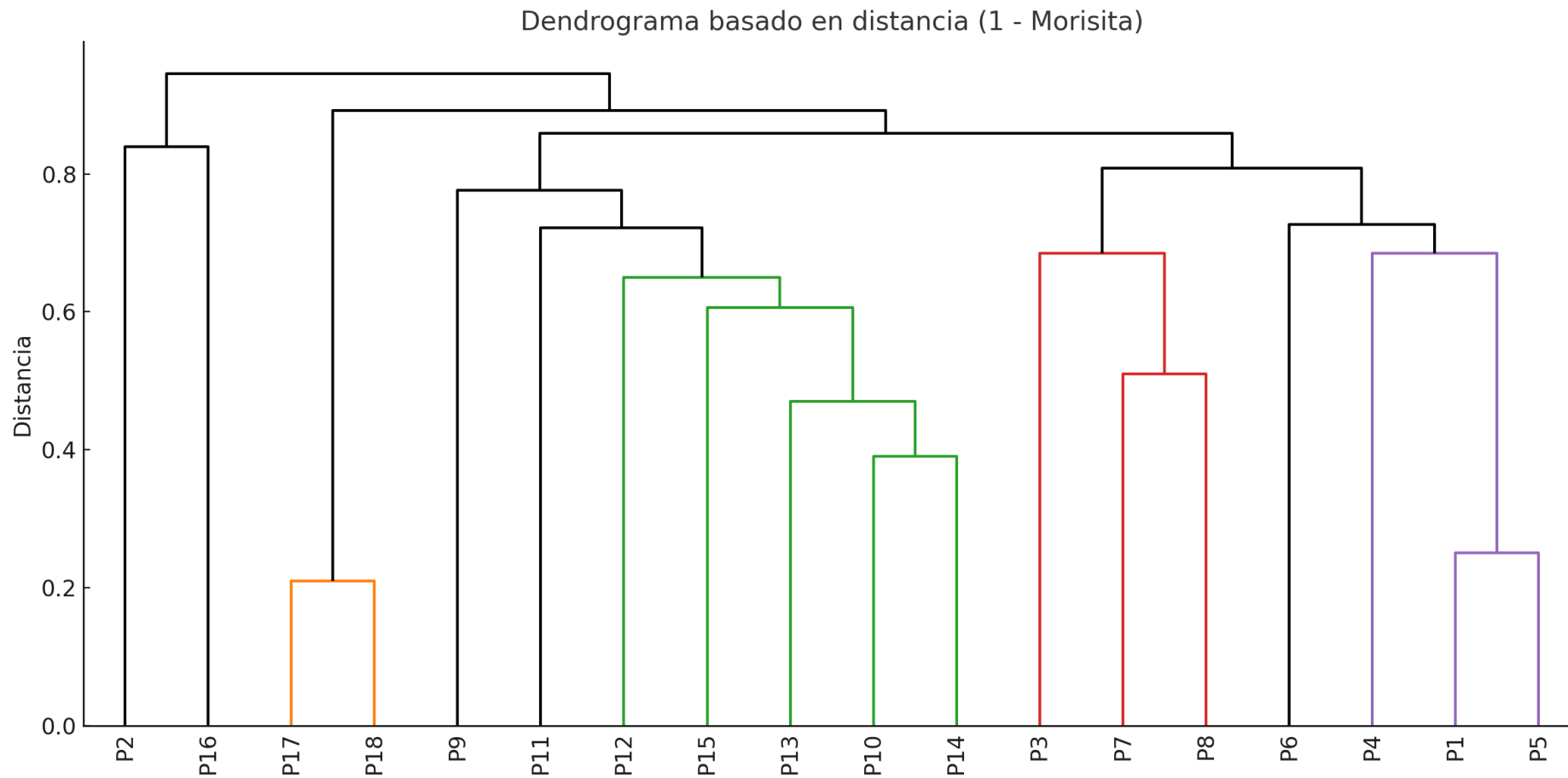


**Figura 5.** Análisis Clúster de Jaccard

**Tabla 6.** Índice de similitud de Morisita

Parcelas	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18
P1	1.00	0.12	0.36	0.32	0.75	0.37	0.12	0.32	0.19	0.27	0.15	0.11	0.25	0.22	0.29	0.03	0.02	0.09
P2	0.12	1.00	0.19	0.17	0.06	0.06	0.02	0.07	0.01	0.04	0.07	0.13	0.02	0.03	0.10	0.16	0.06	0.24
P3	0.36	0.19	1.00	0.12	0.27	0.06	0.30	0.33	0.15	0.27	0.05	0.27	0.11	0.22	0.31	0.02	0.03	0.09
P4	0.32	0.17	0.12	1.00	0.31	0.20	0.05	0.21	0.04	0.03	0.01	0.05	0.05	0.07	0.15	0.07	0.09	0.20
P5	0.75	0.06	0.27	0.31	1.00	0.25	0.09	0.28	0.04	0.06	0.12	0.05	0.09	0.12	0.14	0.03	0.12	0.13
P6	0.37	0.06	0.06	0.20	0.25	1.00	0.23	0.19	0.04	0.02	0.17	0.03	0.05	0.03	0.37	0.02	0.02	0.07
P7	0.12	0.02	0.30	0.05	0.09	0.23	1.00	0.49	0.05	0.17	0.17	0.12	0.14	0.26	0.32	0.00	0.01	0.02
P8	0.32	0.07	0.33	0.21	0.28	0.19	0.49	1.00	0.03	0.18	0.11	0.16	0.12	0.22	0.25	0.02	0.06	0.15
P9	0.19	0.01	0.15	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	1.00	0.36	0.09	0.15	0.30	0.17	0.27	0.00	0.00	0.00
P10	0.27	0.04	0.27	0.03	0.06	0.02	0.17	0.18	0.36	1.00	0.23	0.41	0.59	0.61	0.40	0.01	0.12	0.21
P11	0.15	0.07	0.05	0.01	0.12	0.17	0.17	0.11	0.09	0.23	1.00	0.18	0.34	0.26	0.38	0.00	0.04	0.01
P12	0.11	0.13	0.27	0.05	0.05	0.03	0.12	0.16	0.15	0.41	0.18	1.00	0.29	0.36	0.34	0.00	0.21	0.27
P13	0.25	0.02	0.11	0.05	0.09	0.05	0.14	0.12	0.30	0.59	0.34	0.29	1.00	0.47	0.42	0.01	0.08	0.10
P14	0.22	0.03	0.22	0.07	0.12	0.03	0.26	0.22	0.17	0.61	0.26	0.36	0.47	1.00	0.36	0.00	0.33	0.39
P15	0.29	0.10	0.31	0.15	0.14	0.37	0.32	0.25	0.27	0.40	0.38	0.34	0.42	0.36	1.00	0.06	0.02	0.15
P16	0.03	0.16	0.02	0.07	0.03	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.06	1.00	0.01	0.08
P17	0.02	0.06	0.03	0.09	0.12	0.02	0.01	0.06	0.00	0.12	0.04	0.21	0.08	0.33	0.02	0.01	1.00	0.79
P18	0.09	0.24	0.09	0.20	0.13	0.07	0.02	0.15	0.00	0.21	0.01	0.27	0.10	0.39	0.15	0.08	0.79	1.00

El índice de Morisita mide la similitud en la distribución de especies entre parcelas, donde valores cercanos a 1 indican una alta similitud en la composición y abundancia, mientras que valores bajos reflejan diferencias significativas. En este análisis, las parcelas P17 y P18 presentan una alta similitud (0.79), lo que sugiere que comparten especies con una distribución similar. También se observa una relación moderada entre P1 y P5 (0.75), indicando una cierta correspondencia en la composición. Por otro lado, P16 muestra valores bajos con la mayoría de las parcelas, lo que sugiere que su composición es distinta. Estos resultados ayudan a identificar grupos de parcelas con características similares y pueden servir como base para estrategias de conservación y manejo forestal.



**Figura 6.** Análisis de clúster de Morisita

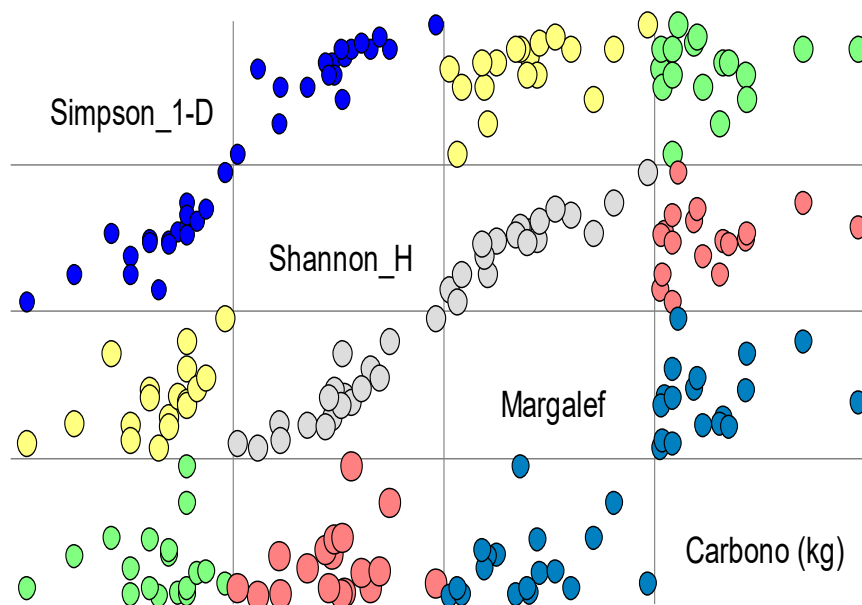
El análisis de conglomerados basado en el índice de similitud de Morisita muestra al menos tres grupos principales de parcelas con composición florística similar, destacándose P17 y P18 como las más parecidas. Parcelas como P9, P10, P14, P13, P15 y P12 también presentan alta similitud, mientras que P16 y P2 se encuentran más distantes, indicando diferencias significativas en su composición. Este patrón sugiere una estructura de distribución diferenciada de especies en el área de estudio, lo que puede ser clave para la planificación del manejo forestal y la conservación de la biodiversidad.

#### 4.3. Relación entre el carbono presente en la biomasa aérea y la Diversidad alfa ( $\alpha$ )

La matriz de correlación entre los índices de diversidad alfa y el carbono aéreo muestra una fuerte correlación positiva entre el índice de Simpson (1-D) y la cantidad de carbono ( $r = 0.95$ ), lo que sugiere que una mayor equitatividad y dominancia de especies está asociada con un mayor almacenamiento de carbono. El índice de Shannon-H presenta una correlación moderada con el carbono ( $r = 0.27$ ), mientras que el índice de Margalef, que mide la riqueza específica, muestra una correlación más baja ( $r = 0.16$ ). Sin embargo, la relación entre el índice de Simpson y el carbono es la más relevante, indicando que ecosistemas con menor dominancia de una sola especie pueden almacenar más carbono.

**Tabla 7.** Correlación de Spearman del carbono almacenado y diversidad alfa

	Simpson_1-D	Shannon_H	Margalef	Carbono (kg)
Simpson_1-D	1	1.40E-05	0.01	0.95
Shannon_H	0.84	1	1.70E-04	0.27
Margalef	0.58	0.91	1	0.16
Carbono (kg)	-0.01	0.27	0.34	1



La gráfica de dispersión muestra la relación entre los índices de diversidad alfa (Simpson\_1-D, Shannon\_H, Margalef) y el carbono aéreo. Se observa que el índice de Simpson\_1-D tiene una tendencia creciente con respecto a los otros índices y al carbono, lo que confirma su alta correlación positiva con el almacenamiento de carbono. El índice de Shannon\_H presenta una relación más dispersa, con una leve tendencia positiva hacia el carbono. En el caso de Margalef, los datos parecen más dispersos, lo que coincide con su menor correlación con el carbono. La distribución de los puntos y sus colores pueden representar diferentes agrupaciones ecológicas o tipos de comunidades forestales, reflejando variabilidad en la relación entre diversidad y carbono almacenado.

Los valores de diversidad alfa, medidos mediante los índices de Simpson (0,77–0,98), Shannon (1,96–3,69) y Margalef (2,61–8,22), muestran una variabilidad moderada-alta entre las parcelas evaluadas. En general, estos resultados fueron superiores a los reportados por Moscol et al. (2022) en un bosque seco, donde Shannon osciló entre 0 y 1,39 y Simpson entre 0 y 0,75, lo que refleja la influencia positiva de la mayor humedad y complejidad estructural de los bosques amazónicos sobre la riqueza y equitatividad de especies. Sin embargo, fueron inferiores a los obtenidos por Flores (2022) en bosques de terraza alta con castaña en Madre de Dios, donde el índice de Shannon alcanzó 5,06, lo que puede atribuirse a la presencia de un mayor número de especies raras y endémicas, así como a un menor historial de perturbaciones. En comparación con los resultados de Pilco (2023) en colinas altas y bajas de Tingo María, los valores de Simpson encontrados en Santa Isabel son similares a los de colina baja (0,94) y superiores a los de colina alta (0,88), mientras que el índice de Shannon se sitúa en un rango intermedio, evidenciando una diversidad comparable a la de ecosistemas amazónicos de distinta madurez. Por su parte, el índice de Margalef fue semejante al registrado por Pilco en colina alta (8,218) y ligeramente superior al de colina baja (6,435), indicando una riqueza específica ajustada al número de individuos muy similar a la de bosques regionales con características topográficas equivalentes.

En cuanto a la diversidad beta, la mayoría de los valores del índice de Jaccard fueron inferiores a 0,30, evidenciando una baja similitud florística entre parcelas y una elevada heterogeneidad composicional. Este patrón contrasta con lo encontrado por González-Arévalo et al. (2025) en Michoacán, donde se registraron similitudes de hasta 0,60 debido a una mayor homogeneidad estructural dentro de cada cobertura vegetal. No obstante, algunas combinaciones de parcelas en Santa Isabel, como P10–P14 (0,56), presentaron similitud moderada, lo que coincide con lo registrado por Pilco (2023) en colinas bajas y altas (0,43) y

sugiere la existencia de sectores con especies dominantes y condiciones ambientales semejantes. Resultados similares han sido descritos por He et al. (2020) en bosques tropicales de Hainan, donde la diversidad beta estuvo influenciada por gradientes ambientales y la heterogeneidad del paisaje, factores que también parecen determinar la diferenciación florística en Santa Isabel.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que la diversidad alfa en Santa Isabel es intermedia-alta en comparación con otros ecosistemas amazónicos y considerablemente superior a la de ambientes más limitantes como los bosques secos, mientras que la diversidad beta refleja una notable heterogeneidad florística entre parcelas. Este patrón sugiere que las estrategias de conservación en la zona deberían contemplar tanto la protección de las áreas con mayor riqueza y equitatividad de especies como aquellas que albergan comunidades florísticas únicas, garantizando así la conservación de la diversidad biológica y funcional del paisaje.

#### **4.4. Pago por servicios ambientales generados por la captura de carbono por deforestación evitada en los bosques de la comunidad Santa Isabel**

El carbono total almacenado en los distintos componentes del ecosistema de Santa Isabel alcanzó 254,36 tC/ha, equivalente a 932,74 tCO<sub>2</sub>/ha. El mayor aporte correspondió a la biomasa aérea con 141,93 tC/ha (520,46 tCO<sub>2</sub>/ha), seguida por el carbono en el suelo con 108,70 tC/ha (398,60 tCO<sub>2</sub>/ha). La hojarasca (2,55 tC/ha; 9,35 tCO<sub>2</sub>/ha) y la biomasa herbácea (1,18 tC/ha; 4,33 tCO<sub>2</sub>/ha) tuvieron una contribución marginal en comparación con los otros compartimentos.

Desde el punto de vista económico, el carbono capturado equivale a un valor estimado de USD 7 345,96 por hectárea, lo que refleja el potencial del ecosistema como activo ambiental y su relevancia en el marco de los mecanismos de compensación por emisiones de carbono.

Este patrón evidencia que la conservación de la biomasa aérea es fundamental para mantener tanto la capacidad de almacenamiento de carbono como el valor económico asociado. Asimismo, la importancia del carbono presente en el suelo destaca la necesidad de evitar prácticas que aceleren la pérdida de materia orgánica, asegurando la estabilidad de este capital natural a largo plazo.

**Tabla 8.** Carbono almacenado y CO<sub>2</sub> total (t/ha)

Componente	Aéreo	hojarasca	herbácea	Suelo	Total
Carbono	141.93	2.55	1.18	108.70	254.36
CO <sub>2</sub>	520.46	9.35	4.33	398.60	932.74
Valor económico CO <sub>2</sub> por ha				7 345.96	

El valor económico estimado del carbono almacenado en los bosques de Santa Isabel es de USD 7 345,96 por hectárea, considerando un precio de referencia de mercado voluntario de aproximadamente USD 7,88 por tCO<sub>2</sub>. Por ejemplo, Maza Valle (2019) determinó en el Bosque Buenaventura (Ecuador) valores de USD 3 a USD 20 por tCO<sub>2</sub>, con un valor máximo por hectárea implícito inferior al obtenido en Santa Isabel, a pesar de que su estimación consideró una biomasa total significativamente mayor (352 331,36 t en todo el bosque, equivalente a 607 239,54 tCO<sub>2</sub>). La diferencia puede explicarse por el método empleado — centrado en la parte comercial del árbol— y por la estructura y densidad de la masa forestal, mientras que en el presente estudio se consideraron todos los compartimentos de carbono, incluyendo el suelo, hojarasca y herbácea, lo que incrementa el valor potencial.

De manera similar, Serna (2024) registró un valor económico promedio de USD 5 693,70/ha en bosques de colina baja de Loreto, siendo las especies *Iryanthera elliptica* y *Micropholis madeirensis* las de mayor aporte monetario. Este valor es notablemente inferior al rango encontrado en Santa Isabel, lo que puede estar asociado a diferencias en el tipo de bosque, la densidad de biomasa aérea y la inclusión del carbono edáfico en la estimación actual. Cabe resaltar que, mientras Serna centró su análisis en la biomasa arbórea obtenida mediante ecuaciones alométricas, en el presente trabajo la valoración incorpora de manera integral todos los componentes evaluados, lo que otorga una visión más amplia del potencial económico del servicio ambiental.

En el estudio de Sosa (2014), los valores económicos más altos correspondieron al bosque de colina alta (USD 4 116,86/ha), seguidos por colina baja (USD 3 687,09/ha) y terraza baja (USD 2 558,30/ha), todos ellos por debajo de las estimaciones de Santa Isabel incluso bajo el escenario más conservador de precio por tonelada. Las diferencias pueden atribuirse a la mayor proporción de carbono en biomasa aérea (55,8 %) y al alto contenido de carbono orgánico del suelo (42,7 %) en Santa Isabel, lo que, sumado a la proyección del precio en un rango más amplio, genera un mayor valor potencial por hectárea.

En conjunto, al comparar estos resultados con antecedentes en Ecuador y la Amazonía peruana, se confirma que el bosque de Santa Isabel posee un potencial económico superior en términos de secuestro de carbono. Esto se debe tanto a la magnitud de carbono almacenado como a la inclusión de componentes comúnmente no considerados en otras valorizaciones. Además, el valor proyectado a toda el área evaluada (USD 1,19 a 3,56 millones) lo posiciona como un activo ambiental con alta viabilidad para proyectos de pago por servicios ecosistémicos y mecanismos como REDD+, reforzando la necesidad de estrategias de conservación que aseguren la permanencia de este capital natural y sus beneficios económicos para las comunidades locales.

## V. CONCLUSIONES

1. El bosque de Santa Isabel almacena 254,36 tC/ha (equivalentes a 932,74 tCO<sub>2</sub>/ha), distribuidos en biomasa aérea (141,93 tC/ha), carbono orgánico del suelo (108,70 tC/ha), hojarasca (2,55 tC/ha) y biomasa herbácea (1,18 tC/ha), lo que confirma su alta capacidad como sumidero de carbono.
2. La diversidad alfa presentó valores de Simpson entre 0,77 y 0,98, Shannon entre 1,96 y 3,69, y Margalef entre 2,61 y 8,22, evidenciando una diversidad moderada-alta; mientras que la diversidad beta, con valores de Jaccard en su mayoría inferiores a 0,30, mostró baja similitud florística entre parcelas, lo que refleja una alta heterogeneidad espacial de especies.
3. El análisis de correlación mostró que existen relaciones significativas entre la diversidad florística y el carbono almacenado, evidenciando que áreas con mayor diversidad tienden a presentar mayor captura y almacenamiento de carbono, especialmente en la biomasa aérea y el suelo.
4. El valor económico estimado del carbono almacenado en los bosques de Santa Isabel es de USD 7 345,96 por hectárea, lo que confirma su potencial como activo ambiental para proyectos de compensación de emisiones de carbono.

## VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Considerar un mayor número de parcelas y abarcar diferentes tipos de relieve y coberturas vegetales para mejorar la representatividad y reducir el sesgo asociado a la variabilidad espacial del bosque.
2. Implementar un seguimiento periódico (cada 3–5 años) para evaluar cambios en el almacenamiento de carbono y la diversidad florística, permitiendo detectar tendencias y efectos de posibles perturbaciones.
3. La estimación actual se centra principalmente en biomasa aérea, hojarasca, herbácea y carbono del suelo; incluir la biomasa subterránea aportaría una cuantificación más completa del carbono total.
4. Integrar datos de humedad del suelo, nutrientes, textura y microclima para entender mejor las relaciones entre factores ambientales, diversidad y capacidad de captura de carbono.
5. Emplear técnicas complementarias como escaneo LiDAR, fotogrametría con drones o inventarios forestales de alta precisión para reducir la incertidumbre en las estimaciones alométricas.
6. Realizar proyecciones con diferentes precios y mecanismos de pago por servicios ecosistémicos (voluntarios y regulados) para estimar la viabilidad financiera de proyectos REDD+ o similares.

## VII. REFERENCIAS

- Abramoff, R., Guenet, B., Zhang, H., Georgiou, K., Xu, X., Rossel, R., Yuan, W., & Ciais, P. (2021). *Predicciones mejoradas a escala global de las reservas de carbono del suelo con Millennial Version 2. Soil Biology and Biochemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108466>
- Aguilar-Arias, H., Ortiz-Malavassi, E., Vílchez-Alvarado, B., & Chazdon, R. L. (2023). *Biomasa sobre el suelo y carbono orgánico en el suelo en cuatro estadios de sucesión de bosques en la Península de Osa, Costa Rica. Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 9(22). <https://doi.org/10.18845/rfmk.v9i22.6417>
- Alegre, K. (2017). *Cambios en la cobertura vegetal del suelo de la provincia de Yauyos durante el transcurso de los años 1997 al 2017 a partir del comportamiento del desarrollo vegetal* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Universidad César Vallejo.
- Álvarez-Montalván, C. E., Manrique-León, S., Vela-Da Fonseca, M., Cardozo-Soarez, J., Callo-Ccorcca, J., Bravo-Cámara, P., Castañeda-Tinco, I., & Álvarez-Orellana, J. (2021). *Composición florística, estructura y diversidad arbórea de un bosque amazónico en Perú. Scientia Agropecuaria*, 12(1), 73–82. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.01.08>
- Araujo, A., Parada, A., Terán, J., Baker, T., Feldpausch, T., Phillips, O., & Brienen, R. (2011). *Necromasa de los bosques de Madre de Dios, Perú: Una comparación entre bosques de tierra firme y de bajíos. Revista Peruana de Biología*, 18(1), 17–33.
- Bonells, J. E. (2021). *Estratificación vegetal: Estratificación de plantas. Jardines sin Fronteras*. <https://jardinessinfronteras.com/2021/12/01/estratificacion-vegetal-estratificacion-de-plantas/>
- Brown, S., & Iverson, L. (1992). *Estimaciones de biomasa para bosques tropicales. Revisión de los Recursos Mundiales*, 4, 366–384.
- Cano-Flores, O., Vela-Correa, G., Acevedo-Sandoval, O. A., & Valera-Pérez, M. Á. (2020). *Concentraciones de carbono orgánico en el arbolado y suelos del área natural protegida El Faro en Tlalmanalco, Estado de México. Terra Latinoamericana*, 38(4), 895–905. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.683>
- Conservación Internacional. (2013). *Manual de metodologías REDD VCS para desarrolladores de proyectos* (Versión 2.0).

- Díaz, J., Ordoñez, M., Cerón, C., & Velázquez, A. (2023). *Biomasa y carbono almacenado en bosques de la Amazonia colombiana*. *Revista Cadasia*, 45(2), 1–31.
- Díaz Vela, D. A. (2023). *Carbono almacenado en la biomasa de las especies comerciales de un bosque de terraza baja, distrito de Requena, Loreto* [Tesis de pregrado, Universidad Científica del Perú]. Repositorio Institucional UCP. <https://repositorio.ucp.edu.pe/items/9f3ccb2f-ea68-4587-abad-31860eae4fe6>
- Díaz, M., & Heyn, J. (2022). *Estimación del contenido de carbono en la cobertura forestal de un bosque secundario del distrito de Curuguaty, Paraguay*. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 27(2), 55–71.
- FAO. (2018). *Mapa de carbono orgánico del suelo*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Flores, K. (2021). *Estimación del carbono almacenado en la biomasa de los árboles en un bosque de colina baja, distrito Tahuania – Región Ucayali* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ucayali]. Repositorio UNU. [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUNU\\_16ef0ad784d6959912290d4535eaae81](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUNU_16ef0ad784d6959912290d4535eaae81)
- Flores-Casanova, W. (2022). *Composición, estructura y diversidad arbórea del bosque de terraza alta con castaña (Bertholletia excelsa H.B.K.) en las provincias Tambopata y Tahuamanu, departamento Madre de Dios* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio Institucional UNSAAC. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/6953>
- Galicia, L., Saynes, V., & Campo, J. (2015). *Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal*. *Botanical Sciences*, 93(3), 473–484. [https://www.botanicalsciences.com.mx/index.php/botanicalSciences/article/view/66/pdf\\_137](https://www.botanicalsciences.com.mx/index.php/botanicalSciences/article/view/66/pdf_137)
- Georgiou, K., Angers, D., Champiny, R., Cotrufo, M., Craig, M., Doetterl, S., Grandy, A., Lavallee, J., Lin, Y., Lugato, E., Poeplau, C., Rocci, K., Schweizer, S., Six, J., & Wieder, W. (2025). *Saturación de carbono en el suelo: ¿Qué sabemos realmente?* *Biología del Cambio Global*, 31. <https://doi.org/10.1111/gcb.70197>

- Gorbitz Dupuy, G. (2015). *Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones forestales de 8 años de Calycophyllum spruceanum Benth. Xilema*, 28, 53–60.
- González-Arévalo, M. E., Anaya, C., Alvarado Ramos, L. F., Rosete Vergés, F. A., & Martínez Cruz, J. (2025). *Diversidad, estructura y composición de las cubiertas del suelo de la Zona de Restauración y Protección Ambiental Cañadas del Río Chiquito de Morelia, Michoacán, México. Revista de Geografía Norte Grande*, 92, 1–25. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022025000100001>
- Guevara, C. J. (2022). *Estimación de la reserva de carbono almacenado en el Área de Conservación Municipal Bosque de Huamantanga – Jaén* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio Institucional UNJ. <https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/533>
- He, J., Lin, S., Kong, F., Yu, J., Zhu, H., & Jiang, H. (2020). *Determinants of beta diversity of tree species in tropical forests: Implications for biodiversity conservation. Science of the Total Environment*, 704, 135301. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135301>
- Huayanay Yan, A. (2018). *Contenido de carbono en un sistema de producción de palto (Persea americana Mill) en Pillco Marca – Huánuco – 2018. Revista Investigación Agraria*, 1, 39–49. <http://revistas.unheval.edu.pe/index.php/reina/article/view/835/716>
- Hurtado, P. (2019). *Reserva de biomasa y captura del carbono de un sistema agroforestal de Coffea arabica L. y Eucalyptus saligna, Naranjillo, 2018* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Martín]. Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto.
- Jaramillo, V. (2004). *Cambio climático: Una visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Lehmann, J., Hansel, C., Kaiser, C., Kleber, M., Maher, K., Manzoni, S., Nunan, N., Reichstein, M., Schimel, J., Torn, M., Wieder, W., & Kögel-Knabner, I. (2020). *Persistencia del carbono orgánico del suelo causada por complejidad funcional. Nature Geoscience*, 13, 529–534. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0612-3>
- Leyva-Pablo, T., De León-González, F., Etchevers-Barra, J. D., Cortés-Pérez, M., Santiago-García, W., Ponce Mendoza, A., & Fuentes-Ponce, M. H. (2021). *Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal comunitario. Madera y Bosques*, 27(spe), e2732156. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732156>

- Márquez, F., & Julca, A. (2015). *Indicadores para evaluar la sustentabilidad en fincas cafetaleras en Quillabamba, Cusco, Perú*. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la USIL*, 2(1), 128–137. <https://revistas.usil.edu.pe/index.php/syh/article/view/45>
- Maza Valle, W. F. (2019). *Valoración económica del servicio ambiental de secuestro de carbono para garantizar la sostenibilidad del bosque Buenaventura, Ecuador* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. *Cybertesis Repositorio Institucional UNMSM*. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/12047>
- Martin, A., & Thomas, S. (2011). *A reassessment of carbon content in tropical trees*. *PLOS ONE*, 6(8), e23533. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023533>
- Morales-Inocente, M. Á., Nájera-Luna, J. A., Escobedo-Bretado, M. Á., Cruz-Cobos, F., Hernández, F. J., & Vargas-Larreta, B. (2020). *Carbono retenido en biomasa y suelo en bosques de El Salto, Durango, México*. *Investigación y Ciencia*, 28(80), 5–13.
- Moscol, J., Puestas, M., & Herrera, E. (2022). *Estructura y diversidad arbórea y su relación con el suelo forestal en un ecosistema de bosque seco*. *Manglar*, 19(4), 323–330. <https://doi.org/10.57188/manglar.2022.041>
- Muñoz, M., & Vásquez, E. (2020). *Estimación del potencial de captura de carbono en los parques urbanos y emisiones de CO<sub>2</sub> vehicular en Cuenca, Ecuador*.
- Namaswa, T., Mandila, B., Hitimana, J., Kananu, J., Othman, R., Abdullah, N., Zainudin, H., & Abdul Khalil, H. P. S. (2025). *Comparative analysis of carbon stocks and nutrient concentration in litter in tropical forests along the ecological gradient in Kenya*. *Journal of Forestry Research*, 36(31), 2–13. <https://doi.org/10.1007/s11676-025-01824-z>
- Navarro-Martínez, J., Godínez-Jaimes, F., Rosas-Acevedo, J. L., & Méndez-González, J. (2024). *Carbono en necromasa y sotobosque en un ecosistema forestal templado de Guerrero, México*. *Madera y Bosques*, 30(3), 1–13. <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3032683>
- Ore, L., Soto, Y., Loarte, W., Soto, L., Ore, E., Aguirre, C., & Díaz, E. (2022). *Reserva de carbono en la biomasa aérea viva de un bosque natural en la provincia de Leoncio Prado – Huánuco*. *Revista Científica y Tecnológica QANTU YACHAY*, 2(2), 30–43.\*
- Pezo, J. (2023). *Carbono en necromasa y suelo en parcelas I, II, III, IV del arboretum “El Huayo”, Puerto Almendra, Loreto – Perú, 2021* [Tesis de pregrado, Universidad

- Nacional de la Amazonía Peruana]. *Repositorio UNAP*.  
<https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/9607>
- Phillips, O., & Baker, T. (2002). *Manual de campo para la remediación y establecimiento de parcelas permanentes*. RAINFOR – Proyecto Pan-Amazonia, 18 p.
- Pilco Céspedes, D. B. (2023). *Diferencia de la diversidad alfa ( $\alpha$ ) y beta ( $\beta$ ) en la vegetación arbórea de colinas bajas y altas de Tingo María* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. *Repositorio Institucional UNAS*.  
<https://repositorio.unas.edu.pe/items/cb462a34-820a-4029-bfe8-0d8784dced0>
- Rügnitz, M. T., Chacón, M. L., & Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. Lima, Perú: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consorcio Iniciativa Amazónica (IA).
- Ruiz, J., & Alberca, S. (2023). *Estimación de la captura y almacenamiento de carbono en los bosques secos del caserío San Juan de la Pushura Baja, distrito de Bellavista – Jaén* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén]. *Repositorio UNJ*.  
<http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/565>
- Ruiz Dávila, L. C. (2024). *Correlación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de colina baja de la concesión forestal 16-IQU/C-J099-04, distrito de Nauta, Loreto* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. *Repositorio Institucional UNAP*.
- Sarango, F., & Tenempaguay, W. (2020). *Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea, necromasa (hojarasca) y en el suelo en un bosque de pino en la comuna Paquizhapa (provincia de Loja)* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. Cuenca, Ecuador.
- Sari, S. A. (2017). *Valoración económica del servicio ecosistémico de secuestro y almacenamiento de carbono*. UNSA–CienciActiva–CONCYTEC.
- SERFOR, Gobierno Regional de Ucayali, Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana [IIAP], & Instituto Nacional de Innovación Agraria [INIA]. (2015). *Inventario forestal del Bosque de Producción Permanente de Coronel Portillo – Ucayali*. Lima, Perú.
- Serna, J. C. (2024). *Valoración económica del servicio de secuestro de CO<sub>2</sub> de un bosque de colina baja, distritos de Indiana y Las Amazonas, Loreto* [Tesis de licenciatura,

- Universidad Privada del Norte]. *Repositorio Institucional UPN*.  
<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/39773>
- Sosa Castillo, J. O. (2014). *Valoración económica del secuestro de CO<sub>2</sub> en tres tipos de bosque en el distrito del Alto Nanay, Loreto – Perú – 2014* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. *Repositorio Institucional UNAP*.  
<https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/4283>
- Suhaili, N., Othman, R., Abdullah, N., Zainudin, H., & Abdul Khalil, H. P. S. (2021). *Carbon stocks in soil, litter, and aboveground biomass in tropical montane forests of Borneo. Forests*, 12(12), 1621. <https://doi.org/10.3390/f12121621>
- Tacarlo, A. (2018). *Estimación del potencial de captura de carbono de las especies de flora predominante de la parte alta del bosque de la comunidad campesina de Tumpa – provincia de Yungay, 2018* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo].
- Timoteo, K., Valdivia, L., Sales, F., García, D., Abanto, C., & Remuzgo, J. (2016). *Estimación del carbono almacenado en tres sistemas agroforestales durante el primer año de instalación en el departamento de Huánuco. Folia Amazónica*, 25(1), 48–52.
- Trinidad, C., & Ortiz, E. (2019). *Precio al carbono en América Latina: Tendencias y oportunidades*.
- Verhulst, N., François, I., & Govaerts, B. (2015). *Agricultura de conservación y captura de carbono en el suelo: Entre el mito y la realidad del agricultor*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).  
<https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/4409/56986.pdf?sequence=4>
- Yepes, A. P., Herrera, J., Phillips, J., Cabrera, E., Galindo, G., Granados, E., Duque, Á., Barbosa, A., Olarte, C., & Cardona, M. (2015). *Contribución de los bosques tropicales de montaña en el almacenamiento de carbono en Colombia. Revista de Biología Tropical*, 63(1), 69–82. <https://doi.org/10.15517/rbt.v63i1.14679>
- Zavala, J., & Vega, L. (2021). *Captura y almacenamiento de carbono en distintas edades del cultivo de cacao bajo sistemas agroforestales de Tingo María*. Universidad Nacional Hermilio Valdizán. <https://www.unheval.edu.pe/portal/wp-content/uploads/2021/10/Zavala-Vega.-2021.pdf>

Zavala, W., Merino, E., & Peláez, P. (2018). *Influencia de tres sistemas agroforestales del cultivo de cacao en la captura y almacenamiento de carbono*. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 493–501.

**ANEXO**

## INFORME DE ENSAYO

### N° 12506-22/SU/PUCALLPA

#### I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente : ASOCIACION CIVIL ORGANIZACIÓN NO GUBERNAMENTAL INTERCULTURAL BARI WESNA  
 Propietario / Productor : JUAN PABLO FERREYROS SANCHEZ  
 Dirección del cliente : Pucallpa  
 Solicitado por : JUAN PABLO FERREYROS SANCHEZ  
 Muestreado por : Cliente  
 Número de muestra(s) : 6  
 Producto declarado : Suelo agrícola  
 Presentación de las muestras(s) : Bolsa de plástico  
 Referencia del muestreo : Reservado por el cliente  
 Procedencia de muestra(s) : CN. Santa Isabel del Rio Pachitea/ Yuyupichis/ Puerto Inca/ Huánuco  
 Fecha(s) de muestreo : 2022-10-26 (\*)  
 Fecha de recepción de muestra(s) : 2022-11-23  
 Lugar de ensayo : LABSAF Pucallpa  
 Fecha(s) de análisis : del 28/11/2022 al 09/12/2022  
 Cotización del servicio : 151-22-PC  
 Fecha de emisión : 2022-12-19

#### II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM	1	2	3	4	5	6		
Código de Laboratorio	SU1146-PC-22	SU1147-PC-22	SU1148-PC-22	SU1149-PC-22	SU1150-PC-22	SU1151-PC-22		
Matriz Analizada	Suelo agrícola	Suelo agrícola	Suelo agrícola	Suelo agrícola	Suelo agrícola	Suelo agrícola		
Fecha de Muestreo	2022-10-26	2022-10-26	2022-10-26	2022-10-26	2022-10-26	2022-10-26		
Hora de Inicio de Muestreo (h)	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00		
Condición de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada		
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente	P620/0-10/Q	P620/10-30/Q	P620/30-50/Q	P632/0-10/Q	P632/10-30/Q	P632/30-50/Q		
<b>Ensayo</b>	<b>Unidad</b>	<b>LC</b>	<b>Resultados</b>					
Carbono orgánico	%	--	11.19	2.77	2.02	3.07	2.42	1.75



## INFORME DE ENSAYO

### N° 12506-22/SU/PUCALLPA

#### III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
Carbono orgánico	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.7 AS-07. 2000. Contenido de Materia Orgánica por el método de Walkley y Black.

#### IV. CONSIDERACIONES

- Estado en las que ingreso la Muestras: Buenas Condiciones de almacenamiento
- 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

#### V. AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

- El presente Informe de ensayo ha sido autorizado por: Ing. Edinson Eduardo López Galán - Responsable del laboratorio del LABSAF Pucallpa.

**Ing. Edinson Eduardo López Galán**  
**Responsable de Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliarios**  
**Estación Experimental Agraria Pucallpa-Ucayali**

**Figura 7.** Resultados del análisis del carbono orgánico del suelo

## CONSTANCIA DE IDENTIFICACIÓN BOTÁNICA

El que suscribe, **Yahn Carlos Soto Shareva** con DNI N° **43060838**, especialista botánico inscrito a la Dirección de Normalización y Certificación de Competencias Laborales, como: **Evaluador de Competencias Laborales de Identificación de Especies Forestales**; con código de evaluador N° **202100034** y habilitado ante el Ministerio de Trabajo y Promoción de Empleo con Resolución Directoral N° **24-2021-MTPE/3/19.2**, deja constancia:

A solicitud del Ingeniero **Juan Pablo Ferreyros Sánchez**, se proporciona la identificación botánica que corresponden a los nombres científicos siguientes:

N°	Código Asignado	Nombre científico	Familia
01	101	<i>Quiina florida</i> Tul.	Ochnaceae
02	105	<i>Lacmellea arborescens</i> (Müll. Arg.) Markgr. Vel sp. aff.	Apocynaceae
03	COD.X	<i>Croton matourensis</i> Aubl. Vel sp. aff.	Euphorbiaceae
04	COD.Z	<i>Bauhinia tarapotensis</i> Benth.	Fabaceae

De acuerdo con la información entregada las muestras botánicas corresponden al proyecto de Tesis titulado: **“CARBONO EN LOS ESTRATOS VEGETALES Y LA DIVERSIDAD BIOLÓGICA EN LA COMUNIDAD SANTA ISABEL HUANÚCO, 2022”**

Se expide la presente constancia a solicitud del interesado, para fines que considera conveniente.

Determinado por:

\_\_\_\_\_ *Firmado Digitalmente* \_\_\_\_\_  
**Yahn Carlos Soto Shareva**  
 Especialista Botánico  
 CIP N° 192243

Palcazú, 31 de julio del 2024

Domicilio: Av. Fernando Westreicher s/n, Mz. P. Lote 10, Iscozacín-Palcazú, Oxapampa, Pasco.  
 Teléfono: +51 997 685 208 E-mail: [yahncarlos@gmail.com](mailto:yahncarlos@gmail.com); [yahncarlos\\_24@yahoo.es](mailto:yahncarlos_24@yahoo.es)

**Figura 8.** Constancia de identificación botánica

**MEMORIA DESCRIPTIVA**

1. **PROYECTO** : CLASIFICACION DE COBERTURAS
2. **SOLICITANTE** : Juan Pablo Ferreyros
3. **METADATA** : L1C-T18LWQ-A038017-20221002

**UBICACIÓN**

- Distrito: Yuyapichis
- Provincia: Puerto Inca
- Dpto.: Huánuco

4. **CUADRO DE DATOS TECNICOS.****CUADRO TECNICO DE COORDENADA**

ID	CENTROIDE X	CENTROIDE Y	ÁREA (ha)
1	503953	8918292	2851.099639

**DATUM:** WGS 84 **Sistema de proyección:** UTM **Hemisferio:** SUR **Zona:**18

5. **CLASIFICACION:** A continuación, se describen solo aquellas coberturas que fueron identificadas en la comunidad nativa Santa Isabel con el presente estudio, para lo cual la metodología de cobertura y uso actual de la tierra presentada responde a la leyenda de CORINE LAND COVER.
- **Área Arenosa Natural** : Hacen referencia a espacios conformados por suelos arenosos por una textura granular hasta 50 cm de profundidad y a consecuencia retienen pocos nutrientes así como la capacidad de retención hídrica.  
En la Comunidad Nativa Santa Isabel esta clase está representada por 59.9088 hectáreas (ha).
  - **Rio** : Es una corriente natural de agua que fluye con continuidad, posee un caudal considerable y desemboca en el mar, en un lago o en otro río. Se considera como unidad mínima cartografiada aquellos ríos que presente un ancho del cauce mayor o igual a 50 metros.  
En la clasificación de la comunidad nativa Santa Isabel se determinó 203.4028 hectáreas (ha) de esta cobertura.
  - **Red Vial** : Es aquella que por su grado de articulación, conexión, magnitud interrelacionan los grandes sectores de la ciudad entre sí. Perteneciente a la misma clasificación funcional, nacional, departamental y vecina.  
En la comunidad nativa Santa Isabel se determinó un total de 5.9071 hectáreas (ha).
  - **Tierra Desnuda** : Aquel área que no permite el crecimiento de plantas o cobertura vegetal, debido al tener bajo contenidos de materia orgánica, son más densos y compactos y tienden a formar sellos y costras, lo cual afecta en la retención de agua e incrementan la aridez del suelo.  
En la comunidad nativa Santa Isabel se logró determinar un total de 73.1193 hectáreas (ha).
  - **Áreas Agrícolas Heterogéneo** : Son aquellas unidades que reúnen dos o más clases de coberturas agrícolas y/o pecuarias. Están dispuestas en un patrón intrincado de mosaicos geométricos que hace difícil su separación en coberturas individuales; los arreglos geométricos están relacionados con el tamaño reducido de los predios, las condiciones locales de los suelos, las prácticas de manejo utilizadas y las formas locales de tenencia de la tierra.  
Se determinó en la zona de interés un total de 693.7456 hectáreas (ha) de la cobertura de Áreas Agrícolas Heterogéneo.
  - **Bosque Denso Alto** : Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) más o menos continuo cuya área de cobertura arbórea representa más de 70% del área total de la unidad, y que en promedio presentan una altura del dosel superior a los 15 metros (IGAC, 1999).  
Según el análisis realizado se obtuvo que el área de esta clasificación en la zona de interés es de 1406.3059 hectáreas (ha).

“AÑO DEL FORTALECIMIENTO DE LA SOBERANÍA NACIONAL”

- **Bosque Fragmentado** : Comprende los territorios cubiertos por bosques naturales densos o abiertos cuya continuidad horizontal está afectada por la inclusión de otros tipos de coberturas como pasto, cultivos o vegetación en transición.  
En la Comunidad Nativa Santa Isabel, se identificaron 408.7102 hectáreas (ha) de este tipo de cobertura.

**6. AREA Y PERIMETRO:**

Área: 2851.0996 ha.  
Perímetro: 27755.0777 m.

**7. LOCALIZACION Y ACCESIBILIDAD.**

La comunidad nativa Santa Isabel (Área de Estudio) se encuentra Políticamente en el Distrito de Yuyapichis, Provincia de Puerto Inca, Departamento de Huánuco. El cual cuenta con una superficie de 2851.0996 ha. Para llegar al área de interés se usa como vía de acceso principal la Ruta Nacional PE- 5N, teniendo en cuenta la primera Ruta HU – 1013 que es el trayecto desde la Ruta Principal PE-5N (Las Palmas) - San Juan de Pachitea (Río Pachitea). La segunda Ruta HU – 1014 que conforma el trayecto PE – 5N – Nuevo Perú margen izquierdo conectándose a la Ruta HU – 1014 que conecta hasta el Puerto Santa Isabel.

**8. DESCRIPCION DEL ÁREA DE INTERES.**

Datos consignados de Sentinel 2 con código T18LWQ del 02 de octubre del 2022, para la clasificación, en el cual el área de interés cuenta con un área de 2851.0996 hectáreas (ha) y un perímetro de 27755.0777m, en el cual se determinó tipos de cobertura como: área arenosa natural, áreas agrícolas heterogéneo, bosque denso alto, bosque fragmentado, red vial, ríos y tierra desnuda.

**9. METODOLOGIA**

La clasificación de coberturas de la comunidad nativa Santa Isabel se desarrolló bajo la metodología de CORINE LANDCOVER adaptada para Perú, con la finalidad de poder estandarizar un sistema de clasificación, con categorías jerárquica definidas de acuerdo a la información que se pueden obtener de las imágenes satelitales.

Entre los métodos probados para la determinación de los diferentes tipos de cobertura están los métodos no supervisados, supervisados e interpretación visual. Los métodos no supervisados buscan recuperar la información contenida en la imagen. Estos métodos buscan criterios de separabilidad de la información que hay en ella misma para identificar patrones que luego son analizados por el intérprete. Los sistemas de clasificación supervisada buscan incorporar la experiencia del intérprete en la definición de las clases a ser representadas en el mapa. En cualquiera de estos casos, las unidades a clasificarse pueden ser tanto píxeles como segmentos y los algoritmos pueden incorporar sólo los datos de la imagen o también información complementaria. Finalmente, en el caso de la clasificación visual, el intérprete emplea su conocimiento para desarrollar el proceso de mapeo. (ARNILLAS, C.A; et al. 2012).

Para determinar el tipo de coberturas se empleó el método de clasificación supervisada debido a que incorpora la información conocida del área de interés y de esa manera obtener una clasificación que no solo está basada en la información proporcionada en la imagen satelital, sino también la información por parte del intérprete. Es por ello que se trabajo con la herramienta de "clasificación supervisada interactiva" debido a una mejor respuesta en el proceso de clasificación de probabilidad máxima que se ejecuta de la misma manera que la herramienta de clasificación de máxima verosimilitud con parámetros predeterminados, sin embargo, la herramienta de clasificación supervisada interactiva utiliza todas las bandas de la capa de imagen seleccionada para la clasificación de coberturas

  
-----  
Ing. DENNIS FRANCIS VERDE GARCIA  
VERIFICADOR CATASTRAL  
009527 VCPZRVI

Pucallpa, octubre del 2022

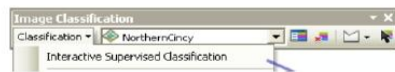
## "AÑO DEL FORTALECIMIENTO DE LA SOBERANÍA NACIONAL"

## ANEXOS

Cuadro 1. Unidades de Uso Actual de la Tierra para la leyenda, de acuerdo con la Metodología CORINE LAND COVER

NIVEL	I	II	III	IV	V										
1. Áreas Artificiales	1.1. Áreas Urbanizadas	1.1.1. Tejido urbano continuo (AA-Au-Tuc)	1.1.2. Tejido urbano discontinuo (AA-Au-Tud)	1.2.4.1. Aeropuerto con Infraestructura Asociada (AA-Aii-Ae-Aeia)											
2. Áreas Agrícolas	2.1. Cultivos Transitorios	2.1.2. Cereales (Aa-Ct-Ce)	2.1.3. Oleaginosas y leguminosas (Aa-Ct-Ol)	2.1.5. Tubérculos (Aa-Ct-Tb)											
					2.2. Cultivos Permanentes	2.2.1. Cultivos Permanentes Herbáceos	2.2.1.3. Plátano (Aa-Cp-Cpher-Pl)								
								2.2.2. Cultivos Permanentes Arbustivos (Aa-Cp-Cpar)	2.2.2.5. Coca (Aa-Cp-Cpar-Co)						
										2.2.4. Cultivos Agroforestales	2.2.4.2. Café (Aa-Cp-Cagrof-Cf)	2.2.4.3. Cacao (Aa-Cp-Cagrof-Cc)			
					2.4. Áreas Agrícola Heterogéneas	2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (Aa-Aah-Mcpen)									
	3. Bosques y Áreas Mayormente Naturales	3.1. Bosques	3.1.1. Bosque denso bajo (Bamn-B-Bdb)	3.1.3. Bosque denso alto (Bamn-B-Bda)			3.1.3.2. Bosque denso alto inundable	3.1.3.2.1. Aguajales (Bamn-B-Bdat-Ag)							
									3.1.4. Bosque de galería y ripario (Bamn-B-Bgr)	3.1.5. Bosque fragmentado	3.1.5.1. Bosque fragmentado con vegetación secundaria (Bamn-B-Bf-Bfs)				
												3.3. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustivo	3.3.1. Herbazal abierto (Bamn-Avher/ar-Herab)	3.3.4.2. Vegetación arbustiva / herbácea abierta (Bamn-Avher/ar-Var/her-Var/herab)	
															3.4. Áreas Abiertas, sin o con poca Vegetación
					4. Áreas Húmedas	4.1. Áreas Húmedas continentales			4.1.2. Turberas (Ah-Ahc-Tr)						
5. Superficies de Aguas		5.1. Aguas Continentales	5.1.1. Ríos (Sa-Ac-Ri)	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales permanentes (Sa-Ac-Lg)											
					TOTAL										

Figura 1. Herramienta de Interactive Supervised Classification para la determinación de Coberturas.



Cuadro 2. Clasificación de coberturas de suelo en la comunidad nativa Santa Isabel.

ID	SÍMBOLO	CLASIFICACIÓN	ÁREA (Ha)
0		AREA ARENOSA NATURAL	59.9088
1		AREAS AGRICOLAS HETEROGENEO	693.7456
2		BOSQUE DENSO ALTO	1406.3059
3		BOSQUE FRAGMENTADO	408.7102
4		RED VIAL	5.9071
5		RIOS	203.4028
6		TIERRA DESNUDA	73.1193

Figura 1. Topology rules poster

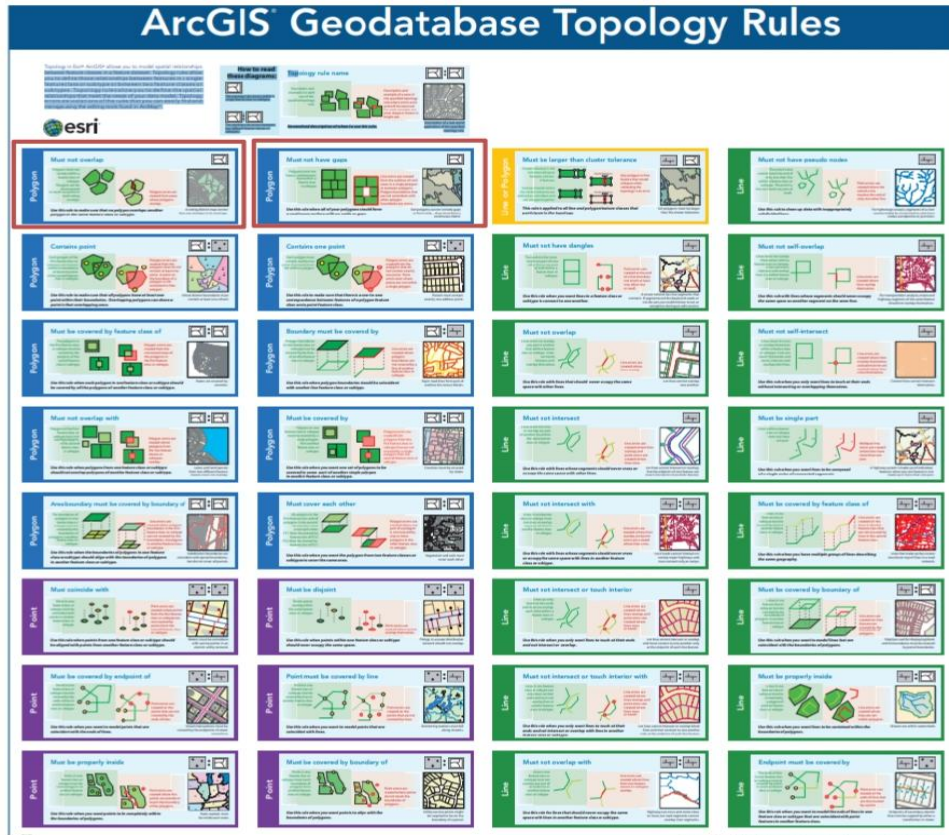


Figura 9. Memoria descriptiva de clasificación de coberturas

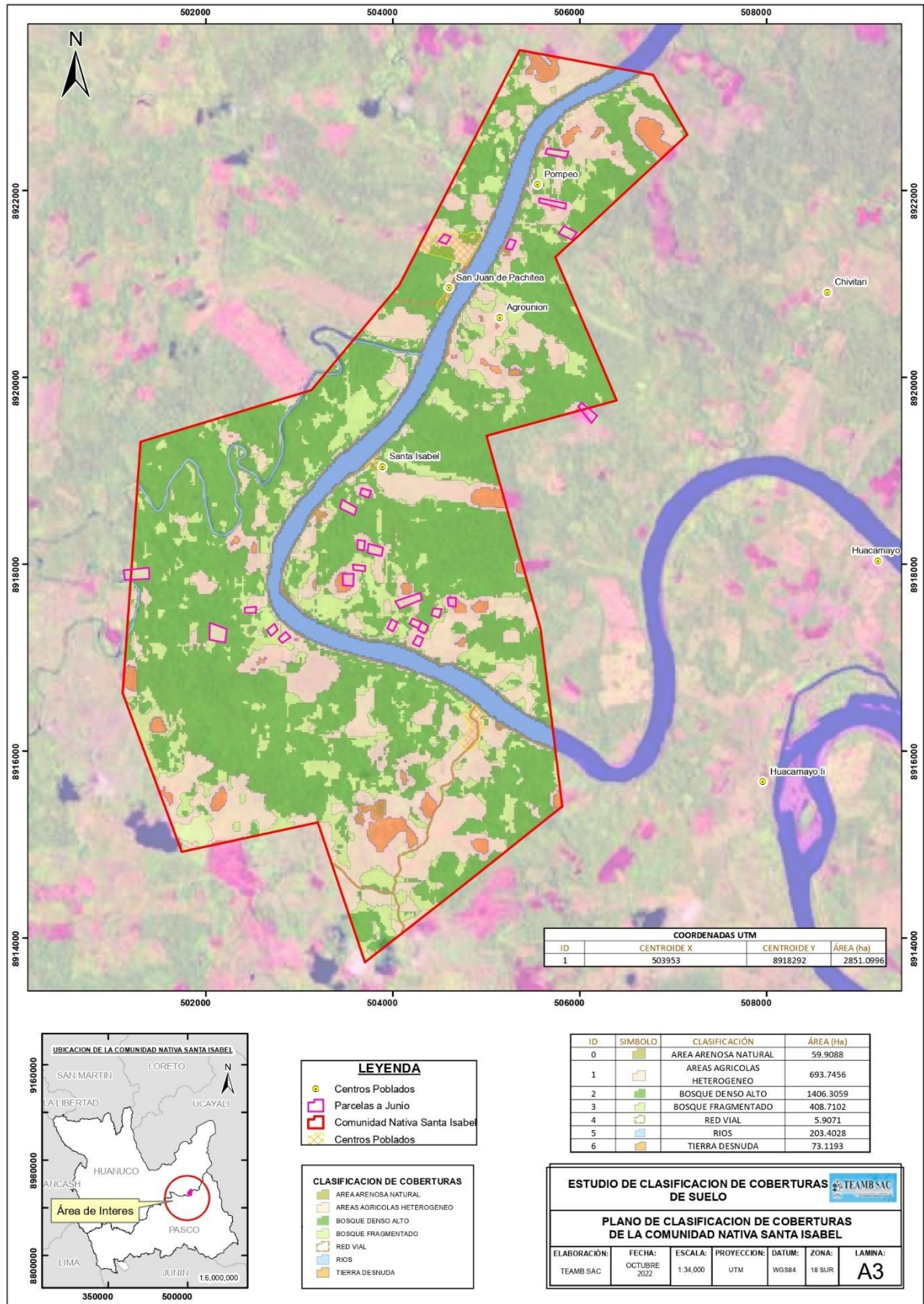
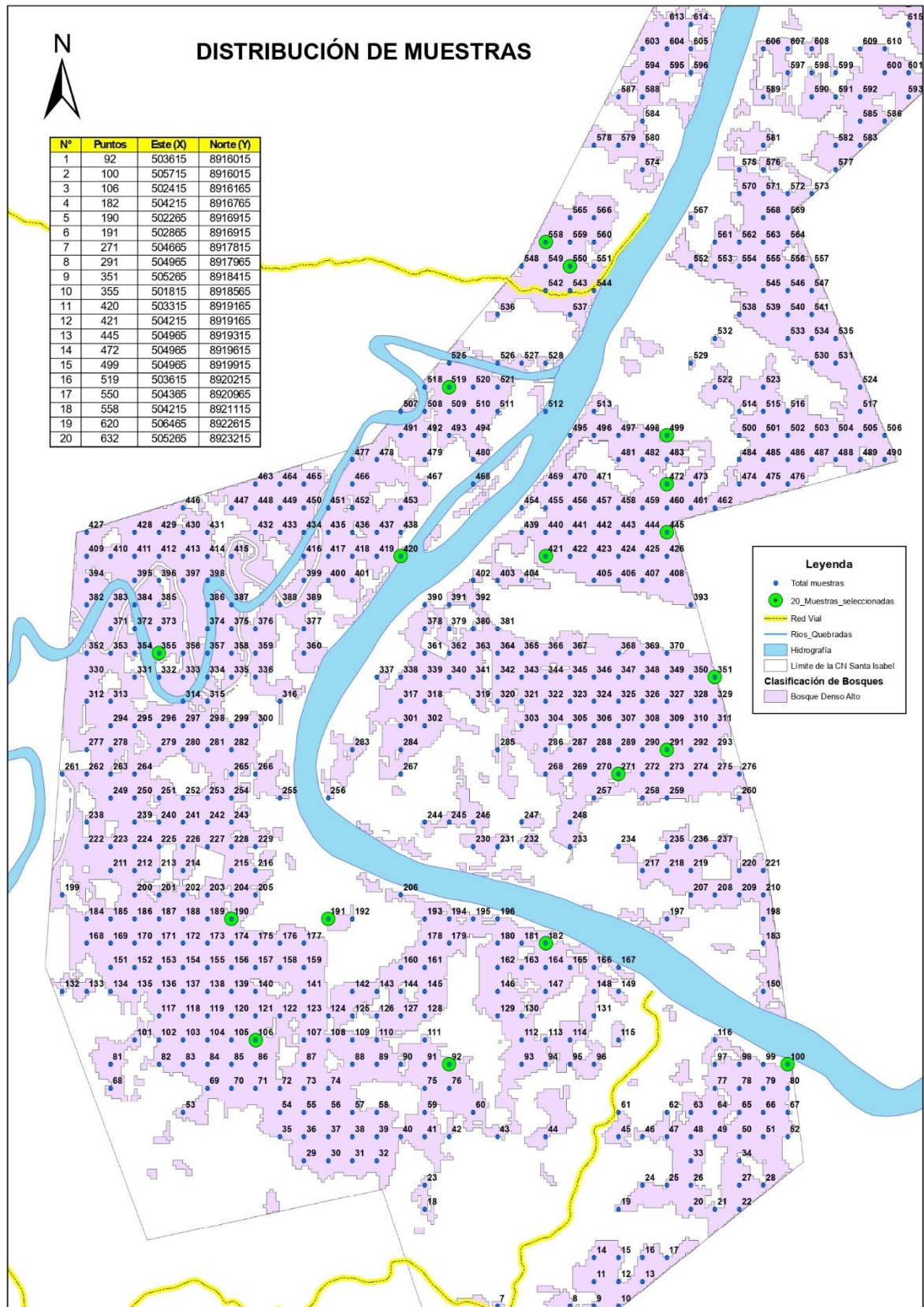


Figura 10. Mapa de clasificación de cobertura en la Comunidad Santa Isabel



**Figura 11.** Coordenadas de las muestras de las parcelas del bosque en la Comunidad Santa Isabel



**Figura 12.** Delimitación de las parcelas de 25 m x 25 m



**Figura 13.** Establecimientos de los cuadrantes de 1 x 1 m para herbácea y hojarasca



**Figura 14.** Extracción de muestras de suelos



**Figura 15.** Medición del DAP de los arboles



**Figura 16.** Colecta de muestras de hojarasca y herbácea



**Figura 17.** Pesado de las muestras en estado fresco



**Figura 18.** Muestras recolectadas en todas las parcelas



**Figura 19.** Secado en estufa de las muestras



**Figura 20.** Peso eco de la muestra de hojarasca y herbácea