

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



**BIOMASA AÉREA EN UNA PLANTACIÓN DE *Cedrelinga cateniformis* (Ducke)
Ducke, Y SU VALORIZACIÓN EN EL BOSQUE RESERVADO DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO FORESTAL

PRESENTADO POR:

SEGUNDO ARTIDORO GUERRERO CIEZA

Tingo María – Perú

2026

V.º B.º.
[Handwritten signatures in blue ink]



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°028-2026-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 18 de febrero de 2026, a horas 04:00 p.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:


“BIOMASA AÉREA EN UNA PLANTACIÓN DE *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke, Y SU VALORIZACIÓN EN EL BOSQUE RESERVADO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA”

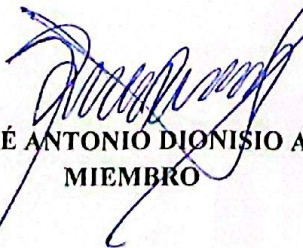
Presentado por el Bachiller: **GUERRERO CIEZA, SEGUNDO ARTIDORO**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de “**MUY BUENA**”.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO FORESTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 27 de febrero de 2026


Ing. M. Sc. RAÚL ARAUJO TORRES
PRESIDENTE


Dr. DAVID PRUDENCIO QUISPE JANAMPA
MIEMBRO


Ing. MSc. JOSÉ ANTONIO DIONISIO ARMAS
MIEMBRO


Ing. MSc. BRAYAN ANDRE CALDAS DE LA CRUZ
ASESOR


Ing. MSc. JHONY FLORES MENDOZA
ASESOR



"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 103 - 2026 - CS-RIDUNAS

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

CERTIFICA QUE:

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

Programa de Estudio:

Ingeniería Forestal

Tipo de documento:

Tesis X Trabajo de Suficiencia Profesional

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
BIOMASA AÉREA EN UNA PLANTACIÓN DE <i>Cedrelinga cateniformis</i> (Ducke) Ducke, Y SU VALORIZACIÓN EN EL BOSQUE RESERVADO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA	SEGUNDO ARTIDORO GUERRERO CIEZA	11 % Once	Menor a 20 %

Tingo María, 26 de marzo de 2026.

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

C.C. Archivo

DEDICATORIA

A Irma Cieza Jimenez y Adriano Guerrero Huaman, por ser el pilar fundamental de mi vida.

Gracias por su amor incondicional, su apoyo constante y sus sacrificios silenciosos.

Esta tesis es el reflejo de todo lo que me enseñaron: a luchar con esfuerzo, a creer en mis sueños y a seguir adelante sin rendirme.

Cada logro mío es también suyo.

.

AGRADECIMIENTOS

- En primer lugar, agradezco profundamente a Dios, fuente de mi fuerza y motivación, por bendecirme con salud, perseverancia y oportunidades a lo largo de este proceso.
- Expreso mi más profundo agradecimiento a la Universidad Nacional Agraria de la Selva por haberme brindado una formación integral y las herramientas necesarias para desarrollarme profesionalmente.
- A mis padres, Irma Cieza Jimenez y Adriano Guerrero Huaman, por su constante apoyo, amor incondicional y ejemplo de perseverancia, pilares fundamentales en la culminación de esta etapa.
- A mis asesores, Ing. Mg. Sc. Jhony Flores Mendoza y al Ing. Mg. Sc. Brayan André Caldas de la Cruz, por su guía académica y compromiso durante el desarrollo de este trabajo.
- Y a mis amigos Efer Ruiz, Gianpool Guillen, Jhon Orizano y Jhamil Izquierdo, por su respaldo, compañerismo y aliento constante a lo largo de este proceso.
- A todos, mi más sincera gratitud.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. General.....	1
1.2. Específicos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Marco teórico	3
2.1.1. Biomasa aérea	3
2.1.2. Funcionalidad.....	4
2.1.3. Métodos de estimación de biomasa aérea	4
2.1.4. Aplicaciones de ecuaciones alométricas en bosques tropicales	5
2.1.5. Plantaciones forestales	5
2.1.6. <i>Cedrelinga cateniformis</i> (Ducke) Ducke	6
2.1.7. Valorización del carbono en sistemas forestales.....	7
2.1.8. Fundamentos biofísicos de la captura y almacenamiento de carbono	7
2.1.9. Conversión de biomasa a carbono: factores de estimación.....	8
2.1.10. Criterios de valorización económica del carbono almacenado	8
2.1.11. Mercados de carbono: regulado y voluntario.....	9
2.1.12. Mecanismos de compensación y REDD+	9
2.1.13. Consideraciones para valorización en plantaciones de pequeña escala	11
2.1.14. Definición y marco legal de los bosques reservados en el Perú	12
2.2. Estado de arte	13
2.2.1. A nivel internacional	13
2.2.2. A nivel nacional	15
III. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1. Lugar de ejecución	18
3.1.1. Ubicación política	18
3.1.2. Ubicación geográfica	18
3.1.3. Clima	18
3.1.4. Fisiografía	19
3.2. Materiales y métodos	19
3.2.1. Materiales y equipos	19
3.2.2. Metodología	20

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
4.1. Biomasa aérea de una plantación de tornillo (<i>Cedrelinga cateniformis</i> (Ducke) Ducke) de 25 años aplicando ecuación alométrica	25
4.2. Valoración del carbono almacenado de una plantación de tornillo (<i>Cedrelinga cateniformis</i> (Ducke) Ducke) de 25 años.....	27
V. CONCLUSIONES.....	31
VI. PROPUESTAS A FUTURO	32
VII. REFERENCIAS	33
ANEXOS	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Coordenadas de los vértices de la parcela de investigación.	18
2. Datos de la plantación de <i>C. cateniformis</i>	19
3. Mercados de bonos de carbono: internacional y nacional.	24
4. Biomasa aérea de una plantación de <i>C. cateniformis</i> de 25 años.	25
5. Carbono fijado total en una plantación de <i>C. cateniformis</i> de 25 años.	27
6. Dióxido de carbono equivalente (CO ₂ e) en una plantación <i>C. cateniformis</i> de 25 años.	27
7. Valoración del dióxido de carbono equivalente (CO ₂ e) en una plantación <i>C. cateniformis</i> de 25 años.	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Medición de azimut de los vértices.	21
2. Croquis de la parcela de investigación.	21
3. Modelo cúbico de predicción de biomasa a partir de DAP.	27
4. Colocación de banner.	43
5. Delimitación de la parcela de investigación.	43
6. Anotación de datos de campo.	44
7. Georreferenciación de individuo de tornillo.	44

RESUMEN

El objetivo fue evaluar y valorizar la biomasa aérea de una plantación de *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke, conocida como tornillo, de 25 años, ubicada en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en Tingo María. Se aplicó un diseño no experimental, evaluando un total de 153 individuos en una parcela de 0,8 ha. Las variables consideradas fueron: el diámetro a la altura del pecho (DAP), altura comercial, diámetro y longitud de ramas. A partir de estas mediciones, se estimó un volumen maderable de 71,387 m³ y una biomasa aérea total de 32,124 toneladas, de las cuales 27,860 toneladas correspondieron al fuste y 4,264 toneladas a las ramas, estas últimas representaron el 15,3 % de la biomasa del fuste. Expresada por unidad de superficie, la biomasa aérea alcanzó 40,155 t/ha. Esta biomasa permitió estimar un contenido de carbono de 15,195 toneladas y un equivalente en dióxido de carbono (CO₂ e) de 55,719 toneladas. La valorización económica del carbono almacenado, según distintos mercados internacionales, fue la siguiente: 3 900,330 euros en el mercado regulado de la Unión Europea, 3 844,611 dólares en el mercado del Reino Unido, 557,190 dólares bajo el estándar Gold Standard, y 434,608 dólares tanto en el mercado voluntario REDD⁺ como en el AirCarbon Exchange. Estos resultados resaltan el potencial de las plantaciones de tornillo como sumideros de carbono y su contribución a los mecanismos de mitigación del cambio climático.

Palabras clave: bono de carbono, Fabaceae, mercado regulado, mercado voluntario.

**ABOVEGROUND BIOMASS IN A *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke
PLANTATION AND ITS VALUATION IN THE RESERVED FOREST OF THE
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

ABSTRACT

This study aimed to evaluate and value the aboveground biomass of a 25-year-old *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke plantation, commonly known as tornillo, located in the Reserved Forest of the Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS) in Tingo María, Peru. A non-experimental design was used, evaluating a total of 153 individuals within a 0.8-hectare plot. The assessed variables included diameter at breast height (DBH), commercial height, branch diameter, and branch length. Based on these measurements, a merchantable wood volume of 71.387 m³ and a total aboveground biomass of 32.124 tonnes were estimated, of which 27.860 tonnes corresponded to the stem and 4.264 tonnes to the branches, with the latter representing 15.3% of the stem biomass. When expressed per unit area, the total aboveground biomass was equivalent to 40.155 t/ha. This biomass allowed for the estimation of a total carbon stock of 15.195 tonnes and 55.719 tonnes of CO₂ equivalent (tCO₂ e). The economic valuation of this carbon stock, according to different international carbon markets, was as follows: €3,900.33 in the European Union Emissions Trading System, \$3,844.611 in the UK market, \$557,190 under the Gold Standard, and \$434,608 in both the AirCarbon Exchange and the REDD⁺ voluntary market. These results highlight the potential of tornillo plantations as carbon sinks and their contribution to climate change mitigation mechanisms.

Keywords: Carbon credit, Fabaceae, Regulated market, Voluntary market.

I. INTRODUCCIÓN

El Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS) cuenta con 217,22 ha (Puerta y Cárdenas, 2012), dentro de ello se encuentra la primera plantación de tornillo (*Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke) a nivel de Latinoamérica, asimismo, cuenta con cinco parcelas en permanente medición, sin embargo, hace 25 años el BRUNAS también presentaba áreas cubiertas por pastizal, por la cual se inició un proyecto de restauración ecológica con la instalación de 1 ha de *C. cateniformis* (Ducke) Ducke distanciadas a 5 x 5 m por el método de plantación cuadrado, los plantones fueron extraídos de la regeneración natural con pan de tierra de las cuales dicha plantación prosperó hasta el día de hoy, sin embargo, poco se conoce hasta la actualidad de esta plantación debido a la diversificación de la composición florística, esto debido a que el BRUNAS es un bosque reservado que alberga una diversidad de especies forestales, por lo tanto, no se permite la limpieza de esta plantación, es por ello que esta plantación fue manejada como un bosque natural.

Por lo tanto, la plantación de tornillo *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke establecida en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS) no cuenta con información científica respecto a su biomasa aérea ni a su valorización económica bajo un sistema en asociación con otras especies forestales. En ese contexto, se formula la siguiente interrogante de investigación ¿Cuál es la biomasa aérea y cuál es su valorización económica en una plantación de tornillo *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke establecida en el BRUNAS bajo asociación con otras especies forestales? Y se plantea la siguiente hipótesis: la plantación de tornillo (*Cedrelinga cateniformis*) establecida en el BRUNAS presenta una biomasa aérea significativa que permite una valorización económica competitiva bajo sistemas forestales asociados.

En tal sentido, ante la carencia de información en biomasa aérea en plantaciones de tornillo *C. cateniformis* establecidos en un bosque reservado, la presente investigación pretende generar dicha información científica, por ello se plantean los siguientes objetivos:

1.1. General

- Evaluar y valorizar la biomasa aérea de una plantación de tornillo (*Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke) de 25 años establecida en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

1.2. Específicos

- Determinar la biomasa aérea de una plantación de tornillo (*Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke) de 25 años, aplicando ecuación alométrica.
- Valorizar el carbono almacenado de una plantación de tornillo (*Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke) de 25 años.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Biomasa aérea

Marrón (1997) define a la biomasa aérea como la cantidad total de materia orgánica viva que existe por arriba del suelo (incluyendo el tronco, el tocón, las ramas, la corteza, semillas y las hojas) expresada como peso anhidro o seco en estufa en toneladas por unidad de superficie. Polzot (2004) menciona que la biomasa representa la cantidad de carbono almacenado por la vegetación forestal y que potencialmente se podría añadir a la atmósfera en forma de dióxido de carbono (CO₂) cuando los árboles se cortan o son quemados. Las estimaciones de biomasa también permiten establecer la cantidad de CO₂ que puede ser removido de la atmósfera mediante la reforestación, ya que con ellos se obtienen tasas de producción de biomasa y los límites superiores para el secuestro de carbono.

2.1.1.1. Clasificación de la biomasa aérea

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático ([IPCC], 2006), define la biomasa aérea como “toda la biomasa de vegetación viva, tanto leñosa como herbácea, ubicada sobre el suelo, incluyendo tallos, tocones, ramas, corteza, semillas y follaje”. Esta definición es fundamental para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, ya que permite diferenciar con claridad la biomasa aérea de la subterránea, facilitando así una estimación más precisa del carbono almacenado.

Por su parte, Kumar et al. (2019), afirman que “la biomasa aérea es la cantidad total de material biológico presente sobre la superficie del suelo en un área determinada”, y añaden que puede clasificarse en compartimentos como troncos, ramas, hojas y tocones, los cuales pueden evaluarse de manera individual dependiendo de su función ecológica y su tasa de acumulación de carbono.

2.1.1.2. Importancia ecológica y climática de la biomasa aérea

La biomasa aérea desempeña un papel clave en el ciclo global del carbono, al actuar como un importante sumidero natural. A través de la fotosíntesis, los árboles capturan el CO₂ de la atmósfera y lo almacenan en su estructura viva, contribuyendo significativamente a la mitigación del cambio climático (Kumar et al., 2019).

Según el IPCC (2006), aproximadamente el 44 % del carbono de los ecosistemas forestales se encuentra en la biomasa viva aérea, lo que la convierte en uno de los principales depósitos de carbono terrestre, junto con el carbono del suelo. Esta capacidad de almacenamiento es particularmente relevante en los bosques tropicales, donde la biomasa aérea representa una fracción considerable del carbono total.

Asimismo, estudios como el de Pan et al. (2011), confirman que los bosques del mundo funcionan como sumideros persistentes de carbono, con tasas medias de captura que superan las emisiones por deforestación. En ecosistemas de montaña, como los bosques andinos, la biomasa aérea ha mostrado tasas de acumulación de hasta 0,67 megagramos de carbono por hectárea por año ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), lo que refuerza su relevancia ecológica y climática.

2.1.2. Funcionalidad

Naeem (1998), mencionan que la biodiversidad es clave para la funcionalidad de los ecosistemas, ya que las especies contribuyen de manera complementaria a procesos ecológicos fundamentales, asimismo, añade que la mayor diversidad de especies puede mejorar la productividad del ecosistema, su estabilidad y su capacidad de recuperación frente a perturbaciones, finalmente concluye que la funcionalidad ecológica, entonces, depende directamente de la diversidad de organismos presentes en el sistema.

2.1.3. Métodos de estimación de biomasa aérea

2.1.3.1. Métodos destructivos

Shi y Liu (2017), definen al método destructivo como aquel que consiste en cortar los árboles seleccionados, separar cada componente estructural (tronco, ramas, hojas), secarlos hasta peso constante y luego generar ecuaciones alométricas con base en esas variables. Este método proporciona resultados altamente precisos, pero tiene como principal desventaja el impacto que genera sobre el ecosistema, además del elevado costo económico y logístico.

Este enfoque es comúnmente utilizado para establecer modelos de referencia en bosques naturales o plantaciones, sobre todo cuando se requiere calibrar ecuaciones alométricas locales que luego puedan aplicarse en estimaciones no destructivas (Shi & Liu, 2017).

2.1.3.2. Métodos no destructivos (ecuaciones alométricas)

Los métodos no destructivos, en cambio, utilizan ecuaciones alométricas que permiten estimar la biomasa aérea a partir de variables dendrométricas como el diámetro a la altura de pecho (DAP), la altura total del árbol y la densidad de la madera; Shi y Liu (2017), explican que estas ecuaciones se generan a partir de los datos obtenidos mediante métodos destructivos que luego son aplicadas en campo sin necesidad de talar árboles, permitiendo evaluaciones más sostenibles en el tiempo.

Brede et al. (2022), afirman que este enfoque es no destructivo y se complementa con tecnologías como los escaneos láser terrestre (TLS) además, confirmaron que el DAP es un predictor muy fuerte de Above-Ground Biomass (AGB) que es la biomasa aérea, además, es útil para estimaciones de inventarios en campo. Además, estudios recientes han incorporado nuevas tecnologías como el escaneo láser terrestre (TLS) y el uso de drones con sensores LiDAR, los cuales permiten construir modelos tridimensionales del árbol para estimar volúmenes y biomasa con alta precisión (Brede et al., 2022).

2.1.4. Aplicaciones de ecuaciones alométricas en bosques tropicales

Chave et al. (2014), destacan que “el DAP, la altura del árbol y la densidad de la madera son predictores fundamentales para estimar la biomasa aérea (AGB) en bosques tropicales” (p. 90). En su estudio, estos tres parámetros permitieron obtener ecuaciones con R^2 superiores a 0,83, mostrando alta robustez en regiones tan diversas como la Amazonía y África Central. Además, Avitabile et al. (2016), combinaron datos de campo con teledetección en bosques de Indonesia, confirmando que los modelos que incluyen la altura generan estimaciones más ajustada al evaluar inventarios forestales.

Montero y Kanninen (2005), también subrayan la importancia de validar ecuaciones alométricas regionales debido a las diferencias ecológicas entre especies y sitios, mientras que Overmann et al. (1994), señalaron que los modelos desarrollados localmente pueden reducir hasta un 20 % el error de estimación respecto a modelos de datos agregados.

2.1.5. Plantaciones forestales

Las plantaciones forestales se definen según la Food and Agriculture Organization ([FAO], 2001) como rodales establecidos por plantación o siembra en procesos de forestación

o reforestación, compuestos por una o dos especies, edad uniforme y espaciamiento regular, ya sea de especies introducidas o manejadas intensivamente de especies nativas.

2.1.6. *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke

2.1.6.1. Taxonomía

Reino	: Plantae
División	: Tracheophyta
Clase	: Magnoliopsida
Orden	: Fabales
Familia	: Fabaceae
Género	: <i>Cedrelinga</i>
Especie	: <i>C. cateniformis</i> (Ducke) Ducke

Fuente: Royal Botanic Gardens, Kew (2025).

2.1.6.2. Distribución geográfica y hábitat natural

Conocido vulgarmente como tornillo, se distribuye por toda la región amazónica hasta una altitud de 1 200 m.s.n.m. (Reynel et al., 2003), mientras que Aróstegui (1974), señala que principalmente se encuentran en las regiones: Huánuco, Loreto, Ucayali, San Martín, Cusco, Madre de Dios. Asimismo, por su lado Baluarte y Álvarez (2015), mencionan que también se distribuye por la Amazonía de Brasil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Surinam y Guyana Francesa. En cuanto a exigencias de luz, es una especie con tendencia esciófita, presente en bosques primarios, en suelos arcillosos, usualmente ácidos, en zonas bien drenadas y con pedregosidad baja o nula (Reynel et al., 2003).

2.1.6.3. Características morfofisiológicas

La *C. cateniformis* presenta rasgos morfofisiológicos que la hacen idónea para plantaciones forestales en la Amazonía, por ser de crecimiento rápido y alcanzar altura de hasta 50 m con diámetros superiores a 60 cm en condiciones favorables, mostrando un fuste recto y copa amplia que favorece su productividad maderable. Además, estudio de Angulo et al. (2016),

demuestra el pH varía entre 4,0 y 5,1 e influyen significativamente en su crecimiento en altura y diámetro alcanzando tasas de incremento medio anual de 1,03 cm en diámetro bajo ciertas condiciones edáficas, lo cual refleja su adaptabilidad a diferentes zonas.

2.1.6.4. Experiencias silviculturales en plantaciones de tornillo

Las investigaciones silviculturales han mostrado que los sistemas de plantación con distintos espaciamientos y estrategias de manejo influyen en la productividad del tornillo. Vidaurre (1994), en su tesis para Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), recopiló resultados de más de diez años de ensayos en Pucallpa, Iquitos y Yurimaguas, donde evaluó sistemas de enriquecimiento, regeneración natural y manejo de luz. Con base en datos de casi 2 000 árboles y 19 000 observaciones, se estableció que la regeneración natural y los raleos selectivos son claves para asegurar la supervivencia y uniformidad en plantaciones, especialmente en suelos acrisoles y cambisoles. Asimismo, Angulo et al. (2016), comprobaron que un espaciamiento de 5×5 m y fisiografía ondulada ofrecía la mayor productividad con $141,47 \text{ m}^3/\text{ha}$ de volumen total y $33 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ de incremento medio anual en comparación con otras densidades.

2.1.7. Valorización del carbono en sistemas forestales

La valorización del carbono derivado de plantaciones de *C. cateniformis* se fundamenta en su alta acumulación de biomasa y contenido de CO_2 capturado. Pinto-Cataláo y Cabudivo (2022), analizaron plantaciones de diferentes edades (14–51 años) y cuantificaron el rendimiento de madera tostada (hasta $1\,259,93 \text{ kg}/\text{árbol}$) y producción de carbón ($686,80 \text{ kg}/\text{árbol}$), demostrando correlación significativa entre densidad de madera, biomasa y carbono generado. Estos resultados permiten estimar ingresos bajo esquemas de valorización del carbono en mercados voluntarios o REDD+, ya que cada tonelada de biomasa equivale a una reducción certificable de emisiones de CO_2 . En combinación con sistemas agroforestales, esta valorización podría fortalecer estrategias de restauración productiva y generar beneficios económicos adicionales.

2.1.8. Fundamentos biofísicos de la captura y almacenamiento de carbono

La captación y el almacenamiento del CO_2 constituyen un proceso consistente en la separación del CO_2 emitido por la industria y fuentes relacionadas con la energía, su transporte

a un lugar de almacenamiento y su aislamiento de la atmósfera a largo plazo. Es considerada una de las opciones de medidas de mitigación para la estabilización de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (Pachauri & Reisinger, 2007).

La captura de carbono se efectúa en los ecosistemas forestales mediante el intercambio de carbono con la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración, llevando al almacenamiento en la biomasa y en el suelo; los procesos de captura y emisión de carbono son parte de un sistema de cuatro reservorios de carbono en el ecosistema boscoso (vegetación aérea y radical; materia en descomposición; suelos; productos forestales), con tiempos de residencia y flujos asociados muy diferentes y estrechamente interrelacionados (Petre et al., 2006).

Las especies arbóreas en un ecosistema forestal son responsables del mayor porcentaje de la biomasa en este ecosistema. Para la estimación de su biomasa se puede utilizar tanto un método destructivo como uno no destructivo Ministerio del Ambiente ([MINAM], 2009).

2.1.9. Conversión de biomasa a carbono: factores de estimación

De acuerdo con el IPCC (2006), un factor generalizado de conversión consiste en asumir que el 47 % del peso seco de la biomasa aérea corresponde a carbono. Este valor es ampliamente utilizado por su simplicidad, fue adoptado en ausencia de datos específicos y representa un promedio global para especies leñosas tropicales. Sin embargo, estudios más detallados han evidenciado que este valor puede variar entre el 45 y 50 %, dependiendo de la especie, tipo de tejido (madera, hojas, ramas) y condiciones del sitio (Thomas & Martin, 2012).

Diversas investigaciones en América Latina también sugieren valores de conversión específicos, por ejemplo, en bosques amazónicos peruanos, algunos estudios han registrado valores de carbono que oscilan entre 0,45 y 0,49 dependiendo del contenido de lignina y densidad de la madera (Gibbs et al., 2007). Por ello, cuando se dispone de datos locales se recomienda usar factores específicos antes que promedios globales para mejorar la precisión de los inventarios forestales y de carbono (Arets et al., 2011).

2.1.10. Criterios de valorización económica del carbono almacenado

Uno de los principales criterios para dicha valorización es el precio de la tonelada de carbono evitada o secuestrada, el cual varía según el tipo de mercado: regulado o voluntario.

Por ejemplo, en el mercado regulado bajo el Protocolo de Kioto, el precio del carbono se determina por mecanismos como el Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS), mientras que en los mercados voluntarios, los precios se ajustan según estándares, certificaciones y co-beneficios asociados (Food and Agriculture Organization [FAO], 2013). En 2023, el precio promedio en mercados voluntarios fue de aproximadamente 6 a 10 dólares por tonelada de CO₂, dependiendo del tipo de proyecto y región (World Bank, 2023).

Otro criterio clave es la adicionalidad, que implica demostrar que el carbono almacenado no se habría capturado en ausencia del proyecto. A esto se suman aspectos como la permanencia (riesgo de pérdida del carbono capturado), la línea base (nivel de emisiones en ausencia de intervención) y el riesgo de fuga, que es el desplazamiento de las emisiones a otras áreas (Pagiola et al., 2005). Todos estos criterios deben ser evaluados para calcular el valor neto y la viabilidad de monetizar el carbono.

2.1.11. Mercados de carbono: regulado y voluntario

El mercado de carbono es un sistema de comercio en donde se compran y venden emisiones reducidas o secuestradas de Gas de Efecto Invernadero (GEI) en forma de créditos de carbono. Los créditos de carbono son la moneda para comerciar las emisiones de carbono. El término proviene del hecho de que el CO₂ es el GEI predominante, y otros gases se miden en unidades llamadas equivalentes de CO₂ (FAO, 2013).

Existen dos mercados de carbono: los de cumplimiento regulado y los voluntarios. El mercado regulado es utilizado por empresas y gobiernos que, por ley, tienen que rendir cuentas de sus emisiones de GEI y está regulado por regímenes obligatorios de reducción de carbono, ya sean internacionales, nacionales o regionales, en el mercado voluntario, en cambio, el comercio de créditos se produce sobre una base facultativa (Seeberg-Elverfeldt, 2010).

2.1.12. Mecanismos de compensación y REDD+

Perú posee aproximadamente 73 millones de hectáreas de bosques, lo que representa cerca del 60 % de su territorio nacional (MINAM, 2013). A pesar de esta vasta cobertura forestal, el país enfrenta un ritmo significativo de pérdida de bosques, con tasas de deforestación que alcanzaron alrededor de 150 000 hectáreas por año a inicios de la década del 2010. Según el Ministerio del Ambiente, entre 2009 y 2011 esta cifra disminuyó a 106 000 hectáreas anuales

(Che & Menton, 2013). Frente a este contexto, el Perú ha iniciado procesos estratégicos para enfrentar la deforestación y degradación forestal a través de mecanismos como Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los bosques, más la conservación, gestión sostenible y aumento de las reservas de carbono forestal (REDD+).

El mecanismo REDD+ constituye una iniciativa global impulsada principalmente en países en desarrollo. Este enfoque busca compensar económicamente a los países que logren reducir las emisiones derivadas del cambio de uso del suelo forestal (UN-REDD, 2011). En palabras de Parker et al. (2009), REDD+ “es una de las estrategias más costo-efectivas para mitigar el cambio climático, al tiempo que ofrece beneficios adicionales en biodiversidad y medios de vida locales” (p. 22).

Perú participa en diversas iniciativas internacionales, como el Mecanismo Cooperativo para el Carbono Forestal (FCPF), el Programa de Inversión Forestal (FIP) y el Programa ONU-REDD. Hasta 2012, se desarrollaban 41 proyectos piloto REDD+ con financiamiento internacional y nacional, incluyendo experiencias de certificación bajo estándares voluntarios (Che & Menton, 2013). No obstante, su implementación enfrenta múltiples desafíos institucionales, territoriales y sociales.

Uno de los principales retos señalados por CIFOR (2013) es la falta de claridad en los derechos de tenencia y el ordenamiento territorial forestal. Esta situación genera conflictos entre comunidades nativas, concesionarios y proyectos extractivos, al superponerse derechos sobre un mismo recurso o territorio. Según Brockhaus & Di Gregorio (2012), “la inseguridad en la tenencia y la débil gobernanza intersectorial amenazan la legitimidad y efectividad de los mecanismos REDD+” (p. 10). A pesar de la aprobación de la Ley de Consulta Previa y los esfuerzos para garantizar el consentimiento libre, previo e informado (CLPI), la implementación plena de estos derechos aún es deficiente.

Además, la expansión de actividades como la agricultura a gran escala, la minería ilegal, las hidroeléctricas y la construcción de carreteras continúan siendo motores clave de la deforestación en la Amazonía peruana (Zelli et al., 2014). Esta realidad tensiona los objetivos de conservación con las políticas de desarrollo económico, haciendo indispensable una mejor articulación entre sectores y niveles de gobierno.

En este marco, los mecanismos de compensación como REDD+ no solo deben enfocarse en reducir emisiones, sino también en asegurar una distribución justa de beneficios, fortalecer la gobernanza forestal y garantizar los derechos territoriales. Como advierte la FAO (2013), “el éxito de REDD+ depende de sistemas de monitoreo, reporte y verificación robustos, pero también del reconocimiento legal del derecho al carbono y la participación efectiva de actores locales” (p. 18).

2.1.13. Consideraciones para valorización en plantaciones de pequeña escala

La valorización del carbono en plantaciones de pequeña escala representa una estrategia emergente en el ámbito de la conservación y la gestión sostenible de los recursos forestales, especialmente en regiones tropicales. Este tipo de plantaciones, por su carácter limitado en superficie y volumen de captura, presentan desafíos técnicos y económicos que deben considerarse para integrarse efectivamente a esquemas de compensación ambiental como REDD+ o los mercados voluntarios de carbono.

Uno de los principales aspectos a considerar es la costeabilidad del monitoreo y verificación, ya que los costos operativos de establecer líneas base, aplicar ecuaciones alométricas, medir biomasa aérea y realizar reportes periódicos pueden ser relativamente altos en relación con los beneficios económicos percibidos en espacios menores a 50 hectáreas (De Pinto et al., 2010). En este sentido, Cacho et al. (2014), indican que “la participación de pequeños productores forestales en proyectos de carbono requiere diseños adaptados a su escala, con metodologías simplificadas y costos de transacción reducidos” (p. 45).

Además, es necesario que la valorización en pequeña escala considere criterios como la permanencia del carbono, el riesgo de fuga (leakage) y la adicionalidad, es decir, demostrar que el carbono almacenado no se hubiera mantenido sin la intervención del proyecto (FAO, 2012). En áreas como el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, donde existen plantaciones de especies nativas como el tornillo (*C. cateniformis*), la adicionalidad puede justificarse a partir del mantenimiento y manejo silvicultural continuo de plantaciones con fines de restauración o captura de carbono.

El acceso a mercados voluntarios es una alternativa más viable para plantaciones de pequeña escala frente a los mercados regulados. Estos permiten mayor flexibilidad en estándares y esquemas de agrupamiento, donde varios pequeños proyectos se integran bajo un

enfoque de “proyecto agrupado” para reducir costos y aumentar la rentabilidad (Plan Vivo Foundation, 2020). La participación en estos mercados exige cumplir con estándares de validación como VCS (Verified Carbon Standard), Gold Standard o Plan Vivo, los cuales han incorporado metodologías simplificadas para pequeños productores.

Por último, se reconoce que las plantaciones de pequeña escala tienen un potencial social relevante, ya que pueden generar beneficios colaterales como la mejora del uso del suelo, fortalecimiento de capacidades locales y restauración de servicios ecosistémicos. Según Karsenty et al. (2017), más allá del carbono, los proyectos pequeños bien gestionados pueden ser una herramienta efectiva para empoderar comunidades y fortalecer la gobernanza ambiental en territorios rurales.

2.1.14. Definición y marco legal de los bosques reservados en el Perú

En el marco del ordenamiento territorial del Perú, los bosques reservados son una categoría especial de protección creada para conservar zonas forestales con alto potencial en biodiversidad, servicios ecosistémicos, investigación científica o interés para futuras áreas naturales protegidas. Según el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR), “los bosques reservados son terrenos de propiedad del Estado, sujetos a estudios complementarios que determinen su destino final y que, mientras tanto, deben conservar su cobertura natural” (SERFOR, 2020).

Esta base legal tiene sustento en la Ley Forestal y de Fauna Silvestre N° 29763, promulgada en 2011, la cual establece que estos espacios forman parte del patrimonio forestal nacional. El Artículo 44 de dicha ley señala que el Estado puede declarar bosques reservados aquellos predios de libre disponibilidad que presenten condiciones especiales de conservación, biodiversidad, conectividad o servicios ecosistémicos claves (Congreso de la República del Perú, 2011). Su gestión corresponde al Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR), en coordinación con gobiernos regionales y locales, priorizando su conservación y uso sostenible.

El Reglamento para la Gestión Forestal, aprobado mediante Decreto Supremo N° 018-2015-MINAGRI, complementa esta disposición al señalar que los bosques reservados son áreas sujetas a un régimen transitorio, cuyo objetivo es permitir la evaluación técnica, legal y

socioeconómica para definir su clasificación definitiva como bosque de protección, bosque de producción permanente u otra modalidad (MINAGRI, 2015).

En cuanto a su situación jurídica, estos bosques no pueden ser adjudicados, invadidos ni destinados a otros usos distintos al manejo sostenible, restauración ecológica o investigación científica, salvo que una norma legal posterior lo disponga. En efecto, el Decreto Supremo N.º 010-2009-AG ya señalaba que los bosques reservados “constituyen una categoría de protección transitoria que se mantendrá vigente mientras se evalúe su clasificación definitiva dentro del patrimonio forestal nacional” (MINAG, 2009, p. 6).

2.2. Estado de arte

2.2.1. A nivel internacional

Dávila y Gavilanes (2022), desarrollaron un estudio en la Reserva de Producción Faunística Cuyabeno, Ecuador, con el objetivo de estimar la biomasa aérea de *C. cateniformis* (Ducke). Esta reserva abarca una superficie de 590 112 ha y se encuentra ubicada entre los 177 y 326 m s. n. m; el estudio fue de tipo descriptivo-correlacional y consistió en dos muestreos por conveniencia: el primero en el Recinto Las Mercedes y el segundo en la Precooperativa Marian 10. Se aplicó un método no destructivo, censando a todos los individuos con DAP >10 cm, los cuales fueron clasificados en tres categorías: árboles maduros, fustales y semilleros. Para cada árbol se consideraron variables como el DAP, la altura total y comercial. Como resultado registraron 8 árboles maduros con una biomasa aérea estimada de 11,70 t/ha, 5 fustales con 5,11 t/ha y 1 semillero con 5,77 t/ha. Los diámetros de los árboles oscilaron entre 35 y 85 cm, y la altura total entre 20 y 45 m.

Grefa y Aguinda (2020) determinaron la biomasa, el carbono almacenado y el CO₂ secuestrado en plantaciones de *C. cateniformis*, *Cordia alliodora* y *Tabebuia donnell-smithii* en la hacienda Los Laureles, ubicada en el cantón Archidona (Napo, Ecuador). La población en estudio comprendió 100 ha, de las cuales se muestrearon 1,25 ha por especie, con una intensidad del 5 %. El estudio aplicó un método no destructivo para la estimación de biomasa. Como resultados, se registraron 469 árboles de *C. cateniformis*, con una biomasa aérea de 27,56 t/ha, equivalente a 13,78 tC/ha y 21,91 tCO₂ /ha. Para *C. alliodora* se contabilizaron 400 individuos, con 12,14 t/ha de biomasa aérea, 5,02 tC/ha y 8,67 tCO₂ /ha. En el caso de *T. donnell-smithii*, se reportaron 480 árboles, con una biomasa aérea de 32,68 t/ha, 16,34 tC/ha y 23,31 tCO₂ /ha.

Finalmente, los autores concluyeron que variables como el DAP, la altura, la densidad de individuos y la edad de la plantación influyen directamente en la cantidad de biomasa, carbono almacenado y CO₂ secuestrado.

Ramírez y Chagna (2019) cuantificaron el carbono secuestrado en una plantación de *Eucalyptus grandis* de 48 años, ubicada en la costa ecuatoriana. Para ello evaluaron 32 árboles en una parcela de 0,8 ha, aplicando el método no destructivo. La estimación de biomasa incluyó los componentes de fuste, corteza, ramas y hojas, mediante la relación entre peso fresco y contenido de materia seca. El carbono almacenado se calculó aplicando un factor de conversión de 0,5 a la biomasa total. Como resultado, obtuvieron un promedio de 0,75 toneladas de carbono por árbol y 312,10 tC/ha, siendo el fuste el componente con mayor proporción de almacenamiento (81,20 %). La ecuación alométrica utilizada, basada en la fórmula $DAP^2 \times$ altura total, presentó un coeficiente de determinación del 98 %, lo que evidencia el alto potencial de *E. grandis* como especie eficiente en la captura de carbono y su contribución a la mitigación del cambio climático.

López et al. (2018), estimaron el contenido de carbono almacenado en plantaciones de *Tectona grandis* (teca) de 14 y 15 años, ubicadas en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. Para ello, aplicaron el método destructivo, seleccionando árboles de diferentes clases diamétricas, los cuales fueron seccionados para medir variables como el diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total, diámetro de copa, diámetros mayor y menor de la troza, longitud de troza y peso fresco. El contenido de carbono fue determinado en laboratorio mediante un autoanizador de carbono y nitrógeno. Con estos datos, desarrollaron un modelo de regresión para estimar la biomasa aérea, obteniendo un coeficiente de determinación ajustado (r^2) de 0,89 para el fuste, basado en las variables independientes DAP y altura total. Finalmente, el carbono almacenado fue de 108,36 tC/ha en las plantaciones de 14 años y de 151,37 tC/ha en las de 15 años.

Quiceno & Tangarife (2016), estimaron la biomasa aérea y el contenido de carbono almacenado en el bosque primario del resguardo indígena Piapoco Chigüiro-Chátare, ubicado en el departamento del Guainía (Colombia), utilizando ecuaciones alométricas. El área de estudio abarcó 18 320 ha y se centró en especies maderables como *C. cateniformis*, *Couma* sp. y *Qualea paraensis*. Delimitaron seis parcelas de 50 × 50 m, en las cuales evaluaron el DAP y la altura total de los árboles. Como resultados, registraron 4 individuos de *C. cateniformis* con un DAP promedio de 3,32 m y una altura comercial de 25 m; 6 individuos de *Couma* sp. con

un DAP de 4,17 m y altura comercial de 26 m; y 29 individuos de *Q. paraensis* con un DAP de 11,5 m y altura comercial de 24 m. Concluyeron que la biomasa aérea total estimada para las tres especies fue de 95,21 t/ha, lo que equivale a un almacenamiento de 47,60 tC/ha, asimismo, sugieren que estas especies forestales proporcionan un servicio ambiental relevante al contribuir significativamente a la mitigación del cambio climático.

2.2.2. A nivel nacional

Córdova (2025), realizó un estudio cuantitativo de tipo no experimental, orientado a la valoración económica del carbono almacenado en la biomasa aérea de *C. cateniformis*, en la concesión forestal Hydra Consulting, ubicada en el distrito de Pebas, región Loreto. La concesión posee una superficie de 500 ha, y el estudio se llevó a cabo en las parcelas de corta 15 y 19, donde se censaron todos los individuos con DAP > 60 cm. Los resultados indicaron un volumen de 4 960 m³/ha y una biomasa aérea de 5 022,040 kg/ha, en cuanto al carbono, se reportó un almacenamiento de 2 511,02 tC/ha. La valoración económica de este carbono alcanzó S/. 29 780,45 por hectárea, considerando un precio de 11,86 dólares/tC. Asimismo, identificó una fuerte correlación positiva entre el carbono almacenado por clase diamétrica y su valor económico ($r = 0,98$), lo que evidencia la importancia de conservar y gestionar de forma sostenible los bosques de *C. cateniformis*, tanto por su función como sumideros de carbono como por su potencial económico en el contexto del mercado de servicios ecosistémicos.

Jaime-Huamán et al. (2025), evaluaron la reserva de carbono en la biomasa aérea y su valoración económica en dos tipos de cobertura vegetal (P1 y P2) en el Área de Conservación Regional Bosque Nublado Amaru-Huachocolpa-Chihuana, ubicada en Huancavelica, Perú. El tipo de cobertura P1 correspondió al bosque de montaña altimontano, ubicado a 3 000 ms.n.m., mientras que P2 representó el bosque de montaña montano, a 2 500 ms.n.m. El estudio empleó el método no destructivo, instalando parcelas de 0,5 ha en cada tipo de bosque. Los resultados indicaron que P1 presentó una biomasa aérea de 41,44 toneladas, equivalente a 20,72 tC y 75,84 tCO₂, con un valor económico de 3 226,03 dólares, considerando un precio de 3,66 dólares por tonelada de carbono. Por su parte, P2 registró una biomasa de 73,55 toneladas, correspondiente a 36,78 tC y 134,59 tCO₂, con una valorización económica de 5 725,74 dólares. Las especies registradas en P1 incluyeron *Hedyosmum peruvianum*, *Weinmannia latifolia*, *Weinmannia crassifolia*, *Miconia* sp. y *Piper acutifolium*; mientras que en P2 *Cedrela montana*, *Meliosma arenosa*, *Prumnopitys montana*, *Cecropia tacuna* y epífitas como *Maxillaria bicentenaria*.

Esquivel (2020), evaluó la estructura, densidad poblacional, biomasa aérea y volumen de *C. cateniformis* en los bosques del Santuario Nacional Megantoni, específicamente en la zona de uso turístico-recreativo. El estudio se desarrolló en nueve transectos de 500 m². Para la estimación de biomasa y carbono aplicó ecuaciones alométricas propuestas por Chave et al. (2014), mientras que el volumen de madera fue calculado con la fórmula de Mostacedo y Fredericksen (2000). Los resultados revelaron una baja densidad poblacional en las clases de brinzales y juveniles, pero una alta acumulación de biomasa y carbono en los individuos adultos, con un promedio de 45,64 t/ha de biomasa aérea y 22,82 tC/ha. El volumen total de madera registrado fue de 457,14 m³, con un promedio de 50,79 m³/ha. A pesar de la inestabilidad en la regeneración natural, la especie mostró un alto potencial como sumidero de carbono, atribuible a sus características morfoestructurales.

Dionicio (2019) evaluó las características dasométricas y la biomasa aérea de *C. cateniformis* en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), donde registró un total de 925 árboles en un área de 217,22 ha, obteniendo un volumen total de 3 350,67 m³ rollizos, equivalente a 15,43 m³/ha. Del total censado, 854 árboles se encontraban vivos en pie, 21 fueron clasificados como semilleros, 47 estaban secos en pie y 3 caídos. Considerando el diámetro mínimo de corte (DMC), se identificaron 351 árboles aprovechables, con un volumen comercial de 2 469,86 m³ (11,37 m³/ha). Los promedios dasométricos de los árboles vivos fueron: DAP de 57,13 cm, altura comercial de 15,58 m, altura total de 29,22 m, área basal de 0,33 m² y volumen comercial de 3,68 m³ por árbol. En cuanto a la biomasa aérea total, se estimaron 2 581,37 toneladas (13,43 t/ha), siendo mayor en los árboles maduros (2 541,14 t), seguidos por los semilleros (164,51 t) y los fustales (145,73 t). Estos resultados resaltan la importancia de *C. cateniformis* como especie con alto potencial de almacenamiento de biomasa en ecosistemas tropicales intervenidos.

Núñez (2018), estimó la biomasa aérea de *C. cateniformis* en sistemas agroforestales ubicados en la cuenca del Alto Mayo, región San Martín. El estudio se desarrolló en dos fincas pertenecientes a beneficiarios del proyecto “Caficultura, carbono y conocimiento para REDD en el Perú”. Seleccionó 32 árboles y aplicó un método no destructivo, registrando variables dasométricas como el diámetro a la altura del DAP, altura total, así como los diámetros y longitudes de las ramas principales, utilizando un relascopio de Bitterlich. Los resultados indicaron una biomasa aérea total de 22 269,49 kg, equivalente a 11 134,75 kg de carbono y

40 827,40 kg de CO₂ e. Estos resultados evidencian el aporte significativo de *C. cateniformis* en sistemas agroforestales tanto en términos de biomasa como de captura de carbono.

Guerrero y Tejada (2018), realizaron un estudio con el objetivo de determinar el valor económico del servicio ambiental de captura de CO₂ en el bosque del fundo Montana, ubicado en Imaza (Amazonas). Se utilizó la metodología del ICRAF y la guía del Ministerio del Ambiente (2015), enfocada en la cuantificación de biomasa, stock de carbono y CO₂ secuestrado. En una superficie de 45,75 ha se instalaron 22 parcelas de 20 × 50 m, identificándose 1 040 individuos correspondientes a 39 especies forestales. Aunque no se trató de un bosque primario según la distribución diamétrica, se estimó una biomasa de 122,81 t/ha, un stock de carbono de 36,84 tC/ha y un secuestro de carbono equivalente a 135,08 tCO₂ /ha. La valoración económica de este servicio fue de 55 839,75 dólares, lo que demuestra el potencial del predio para incorporarse al mercado de créditos de carbono.

Ribeiro (2013), realizó un estudio en el CIEFOR Puerto Almendra de la UNAP, Iquitos, con el fin de valorar económicamente el secuestro de CO₂ en plantaciones de *C. cateniformis* y *Simarouba amara* de diferentes edades (15 a 40 años), en su estudio consideró árboles con DAP ≥10 cm. Como resultado en las plantaciones de *C. cateniformis* con más de 30 años registró una biomasa de 8 776 t/ha, 5 440 tC/ha y 19 952 tCO₂ /ha, alcanzando un valor económico de US\$ 122 552/ha. Finalmente concluyó que el aumento de la edad de la plantación incrementa significativamente la capacidad de almacenamiento de carbono y su valorización económica, siendo *C. cateniformis* una especie destacada por su potencial en mercados de carbono.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La investigación se desarrolló en una plantación de *C. cateniformis* de 25 años establecida en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), que se encuentra ubicado en la margen izquierda de la carretera central a 1,21 km en el tramo Tingo María - Huánuco.

3.1.1. Ubicación política

- Ciudad : Tingo María
- Distrito : Rupa Rupa
- Provincia : Leoncio Prado
- Región : Huánuco

3.1.2. Ubicación geográfica

Tabla 1. Coordenadas de los vértices de la parcela de investigación.

Vértice	Este	Norte	Altitud	Datum	Zona
V1	390730	8970990	745	WGS 84	18S
V2	390770	8970921	731	WGS 84	18S
V3	390682	8970871	712	WGS 84	18S
V4	390643	8970940	706	WGS 84	18S

Nota: el sistema de proyección fue Universal Transversal de Mercator (UTM).

El área de estudio se ubica a 15 minutos de caminata subiendo por el laboratorio de calidad de aire de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, en el **Anexo B** se detallan el mapa de ubicación y dispersión del *C. cateniformis*.

3.1.3. Clima

La ciudad de Tingo María presenta un clima caracterizado por elevados niveles de precipitación, registrando un promedio anual de 2 775,2 mm, donde las lluvias más intensas se concentran en el periodo comprendido entre septiembre y abril, con un promedio mensual de 483,6 mm. Asimismo, mantiene una humedad relativa promedio del 81,72 % y una temperatura media anual de 25,5 °C (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 2025).

3.1.4. Fisiografía

El área de estudio corresponde a la zona de vida Bosque muy húmedo Premontano Subtropical (bmh - PST), según la clasificación ecológica propuesta por Holdridge (1987). Mientras que por su parte, Puerta (2007) menciona que el BRUNAS se sitúa a una altitud que varía entre los 650 y 1 120 m.s.n.m., y en cuanto a su ubicación fisiográfica, corresponde a una colina alta, además, señala que el 70,74 % del área presenta pendientes superiores al 25%.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Materiales y equipos

3.2.1.1. Material genético

Una plantación de *C. cateniformis* de 25 años, establecida a 5 x 5 m por método cuadrado en 1 ha, esta fue instalada en el año 1999, con el objetivo de reforestar y ampliar la cobertura boscosa de BRUNAS ya que el área era pastizal, para ello extrajeron 400 plántones de regeneración natural de la primera plantación de tornillo establecida en el BRUNAS, la técnica de extracción fue con el pan de tierra (30 x 30 x 30 cm), luego estos plántones fueron llevados de manera directa a establecerse a campo definitivo.

En el 2024 en el área se observa una gran diversidad de especies forestales que crecieron después de establecerse esta plantación, asimismo, cabe mencionar que los únicos tratamientos silviculturales que se realizaron fueron colocar hojas de yarina (*Phytelephas macrocarpa*) para protegerlos del sol y abonamiento con gallinaza durante los seis primeros meses de haberse instalado, en conclusión no tuvo manejo silvicultural permanente. Por otro lado, en el 2024 la plantación solo contó con 0,8 ha, debido a que estudiantes en el año 2002 por desconocimiento cortaron cuatro filas 84 individuos de *C. cateniformis* para colocar como tutor de la *Miconia barbeyana*, además, solo cuenta con 153 individuos, debido a que con el tiempo algunos individuos se secaron, otros fueron dañados con la caída de árboles maduros aledaños.

Tabla 2. Datos de la plantación de *C. cateniformis*.

Especie	Área	Método de plantación	Distancia entre plantas	Nº de plantas
<i>C. cateniformis</i>	0,8 ha	Cuadrado	5 m	153

3.2.1.2. Materiales de campo

Los materiales utilizados en campo fueron: wincha de 50 m para delimitar el área de estudio y corroborar la distancia entre individuos, rafia para delimitar el área de estudio, soporte de 1,30 m para medir el diámetro altura de pecho (dap), cinta diamétrica para medir el diámetro de los individuos, escalera de 3 m para medir la altura total de los individuos, binoculares para observar las ramas, tablero de apuntes, marcadores, formatos de evaluación para los apuntes, pilas Duracell AA para el Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

3.2.1.3. Equipos de campo

GPS marca Garmin modelo Map 65s para georreferenciar los vértices del área, brújula Suunto para medir el azimut de los vértices, cámara fotográfica para el panel fotográfico.

3.2.1.4. Equipos de gabinete

Laptop Lenovo IdeaPad 1 7^{ma} generación para redactar el informe final de tesis, procesar los datos y elaborar los resultados y representar en tablas y figuras estadísticas.

3.2.2. Metodología

Con base en Hernández-Sampieri & Mendoza (2020) esta investigación fue de tipo aplicada porque se utilizaron conocimientos ya existentes, con enfoque cuantitativo ya que las variables fueron numéricas, de nivel descriptivo porque se observó y describió el fenómeno de investigación como tal, y con diseño transversal porque los datos fueron recolectados en un solo momento del tiempo; asimismo, fue una investigación no experimental ya que no hubo manipulación de variables, además, fue de campo (Cohen y Gómez, 2019).

3.2.2.1. Determinación de la biomasa aérea de una plantación de tornillo (*Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke) de 25 años, aplicando ecuación alométrica

En primer lugar se realizó una visita exploratoria al área de estudio con la compañía de los dos asesores, en las cuales se recorrió por el área, se georreferenciaron los vértices de la parcela, se tomaron los azimuts correspondientes de cada vértice, como se muestra en la **Figura 1**. El tiempo de recorrido para llegar al área de estudio fue de aproximadamente 15 minutos, subiendo al BRUNAS por el camino que lleva hacia los laboratorios de calidad de aire de Ingeniería Ambiental como se muestra en la **Figura 2**.



Figura 1. Medición de azimut de los vértices.



Figura 2. Croquis de la parcela de investigación.

Posteriormente, se realizó un censo de todos los individuos en pie, y se encontraron 153 individuos de *C. cateniformis*; seguidamente se midió el diámetro del fuste a 1,30 m sobre el nivel del suelo, luego se midió la altura comercial hasta la primera ramificación. Para el caso de las ramas se consideró el diámetro de la base y se consideró 0,5 el factor de forma por ser cónico, luego se midió la longitud de dicha rama.

Todos los datos recolectados fueron anotados en el formato de campo, para posteriormente ser procesados en el Microsoft Excel 2019. Para estimar la biomasa aérea del fuste y de las ramas de cada individuo se utilizó la ecuación 1 que fue propuesta por Carrera Gambeta *et al.* (2002).

$$B = V \times DB \dots \dots \dots \text{ecuación 1}$$

Donde:

- **B:** biomasa del componente en kilogramos (kg)
- **V:** volumen del componente en m³ (cubicación de árbol en pie)

$$V = 0,7854 \times dap^2 \times hc \times ff \quad \text{ecuación 2}$$

dap: diámetro a altura de pecho (m)

hc: altura comercial (m)

ff: factor de forma (0,75)

- **DB:** densidad básica de la madera kg/m³ (la densidad básica de *C. cateniformis* se consideró 0,45 g/cm³ \approx 450 kg/m³ (Aróstegui, 1982)).

Finalmente la biomasa aérea total se determinó sumando la biomasa aérea del fuste y de las ramas como se detalla en la ecuación 3.

$$BAT \text{ (kg)} = \text{Biomasa del fuste (kg)} + \text{biomasa de las ramas (kg)} \dots \dots \dots \text{ecuación 3}$$

Donde:

- **BAT:** biomasa aérea total (kg)

3.2.2.2. Valoración del carbono almacenado de una plantación de tornillo (*Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke) de 25 años

La biomasa aérea obtenida en el cumplimiento del primer objetivo fue convertida a toneladas, con el fin de multiplicarla por la fracción de carbono correspondiente como se detalla en la ecuación 4; a partir de este valor, se estimó el dióxido de carbono equivalente (CO₂ e), dado que los mercados de carbono nacionales como internacionales, valorizan los créditos en función de toneladas de dióxido de carbono equivalente (t CO₂ e), para este procedimiento se aplicó la ecuación 5.

$$C = \text{BAT (t)} \times 0,473 \dots\dots\dots \text{ecuación 4}$$

Dónde:

- **C:** Carbono total fijado (t)
- **BAT:** biomasa aérea total (t)
- **0,473:** Fracción de carbono (Martin & Thomas, 2011).

$$\text{CO}_2 \text{ e (t)} = C \text{ (t)} \times 3,67 \quad \text{ecuación 5}$$

Donde:

- **CO₂ e (t):** dióxido de carbono equivalente (t)
- **C:** carbono (t)
- **3,67:** constante estequiométrica proveniente de la relación entre la masa molar del CO₂ y el C, que se generó con la ecuación 6, Intergovernmental Panel on Climate Change ([IPCC], 2006).

$$\frac{\text{Masa molar de CO}_2}{\text{Masa molar de C}} = \frac{44\text{g/mol}}{12\text{g/mol}} = 3,6667 \approx 3,67 \quad \text{ecuación 6}$$

Finalmente se cotizó el precio de la tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e) en 10 mercados internacionales, como se muestra en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Mercados de bonos de carbono: internacional y nacional.

Mercado / Sistema	Precio actual	Moneda	Tipo de mercado	Fuente
European Union Emissions Trading System (Unión Europea)	70	EUR/t CO ₂ e	Regulador (cumplimiento)	Reuters (2025)
United Kingdom Emissions Trading Scheme (Reino Unido)	51,50 (≈68.85 USD)	GBP/t CO ₂ e	Regulador (cumplimiento)	Reuters (2025)
California Cap-and-Trade	38	USD/t CO ₂ e	Regulador (cumplimiento)	CarbonCredits.com (2025)
Regional Greenhouse Gas Initiative (EE. UU. noreste)	14	USD/t CO ₂ e	Regulador (cumplimiento)	Regional Greenhouse Gas Initiative ([RGGI], 2025)
China National Emissions Trading System	11,4	USD/t CO ₂ e	Regulador (cumplimiento)	Reccessary.com (2025)
Korea Emissions Trading Scheme	25	USD/t CO ₂ e	Regulador (cumplimiento)	International Carbon Action Partnership ([ICAP], 2025)
Kazakhstan Emissions Trading Scheme	1,2	USD/t CO ₂ e	Regulador (cumplimiento)	World Bank (2024)
AirCarbon Exchange (ACX)	7,8	USD/t CO ₂ e	Voluntario	AirCarbon Exchange (2025)
Gold Standard	8,00 – 12,00	USD/t CO ₂ e	Voluntario	Gold Standard (2025)
Perú (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation [REDD+] y reforestación)	7,8	USD/t CO ₂ e	Voluntario nacional/regional	(Bosques Amazónicos [BAM] y Asociación para la Investigación y el Desarrollo Integral [AIDER], 2025)

Nota: EUR: euro, GBP: Great Britain Pound (libra esterlina), USD: dólar.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Biomasa aérea de una plantación de tornillo (*Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke) de 25 años aplicando ecuación alométrica

Tabla 4. Biomasa aérea de una plantación de *C. cateniformis* de 25 años.

Especie	N° individuos	Volumen fuste (m ³)	Volumen ramas (m ³)	Volumen total (m ³)	Biomasa aérea total (kg)
<i>C. cateniformis</i>	153	61,911	9,476	71,387	32 124,011

Nota: para estimar la biomasa aérea total se consideró 450 kg/m³ la densidad para *C. cateniformis*; área de la parcela en estudio: 0,8 ha.

Con base en la **Tabla 4**, en la investigación se registraron 153 individuos de *C. cateniformis*, clasificados en 143 fustales y 10 árboles maduros, con un volumen de fuste de 61,911 m³ equivalente a 77,389 m³/ha, y un volumen de ramas de 9,476 m³ equivalente a 11,845 m³ lo que representó aproximadamente el 15,3% del volumen del fuste, esta proporción es muy cercana al 20% sugerido por Segura & Kanninem (2005), quienes sugieren considerar dicho porcentaje para estimar indirectamente el volumen de ramas. El volumen total fue 71,387 m³ equivalente a 89,234 m³/ha y la biomasa aérea alcanzó 32 124,011 kg \approx 32,124 t, equivalente a 40,16 t/ha, valor que se encuentra dentro del rango reportado en estudios similares en esta especie y otros ecosistemas.

En comparación con Córdova (2025), en su estudio realizado en dos parcelas de corta en la concesión Hydra Consulting en Loreto, obtuvo un volumen total de *C. cateniformis* de 4 960 m³/ha y 5 022,040 kg/ha de biomasa aérea, valores muy superiores al presente estudio, debido a que el autor censó a todos los árboles con DAP superior a 60 cm, mientras que en nuestro estudio solo 10 árboles fueron maduros con DAP >40 cm y los demás tuvieron DAP de 10 a 40 cm. Mientras que en estudios como el de Jaime-Huamán et al. (2025), aunque realizados en dos ecosistemas montanos con otras especies, en 0,5 ha cada una registraron biomasa de 41,44 t y 73,55 t respectivamente, valores mayores al presente estudio, debido a que los autores trabajaron con otras especies y esto también se puede relacionar con la edad y número de individuos seleccionados.

Por su lado, Dávila y Gavilanes (2022), estimaron una biomasa aérea de *C. cateniformis* de 22,58 t/ha en promedio en la Reserva Cuyabeno (Ecuador), Este valor es considerablemente menor al del presente estudio, porque solo evaluaron 14 individuos en total; asimismo, Esquivel

(2020), reportó un volumen total maderable de 457,14 m³, con un promedio de 50,79 m³/ha, una biomasa promedio de 45,64 t/ha en el Santuario Nacional Megantoni, valor levemente superior al obtenido en el presente estudio, esta diferencia puede atribuirse a condiciones ecológicas más favorables, superficie de estudio, edad de los individuos y números muestreados. En contraste, Grefa y Aguinda (2020), registraron 469 individuos de *C. cateniformis*, con una biomasa aérea de 27,56 t/ha, en una plantación en Napo, Ecuador, resultado inferior al obtenido en este estudio, a pesar de reportar 153 individuos, esto sugiere que la variable edad influye directamente en la biomasa acumulada.

Mientras que Dionicio (2019), en su estudio realizado en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS) reportó 925 árboles de *C. cateniformis* en 217,22 ha, obteniendo un volumen total de 3 350,67 m³, equivalente a 15,43 m³/ha, asimismo, obtuvo una biomasa aérea de 2 581,37 t equivalente a 13,43 t/ha, valores muy superiores en comparación de los resultados en el presente estudio, debido a que en nuestro caso solo se trabajó con 0,8 ha y solo se reportó 153 árboles. Por otro lado, Nuñez (2018), en sistemas agroforestales del Alto Mayo, obtuvo una biomasa de 22,27 t/ha, resultado menor que en este estudio, porque solo trabajó con 32 árboles. Asimismo, Ribeiro (2013), reportó 8 776 t/ha de biomasa en plantaciones de *C. cateniformis* de 15 a 40 años en Iquitos; valores que superan al de este estudio, debido a la edad de los árboles y a la densidad poblacional.

Por lo tanto, los resultados de este estudio respaldan el alto potencial de *C. cateniformis* como especie captadora de carbono, y refuerza su importancia ecológica, económica y su valor estratégico en planes de mitigación del cambio climático y mercados de carbono. Además, las diferencias observadas entre estudios reflejan el efecto combinado de factores como el DAP promedio, la altura total, la densidad poblacional, el tipo de cobertura vegetal, la edad de la plantación, y las condiciones edafoclimáticas locales, estos factores deben ser considerados en el diseño de proyectos REDD+.

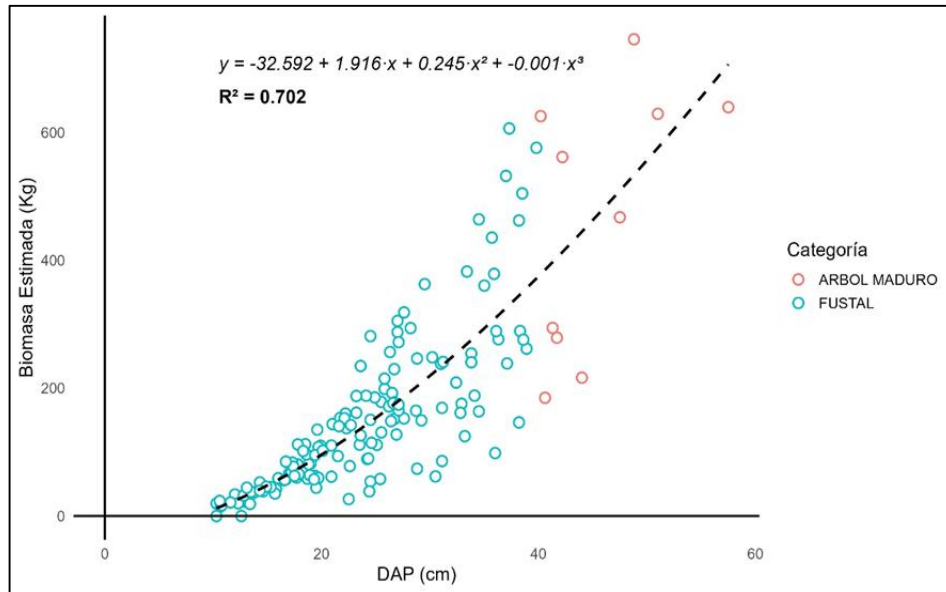


Figura 3. Modelo cúbico de predicción de biomasa a partir de DAP.

La **Figura 3** muestra el modelo cúbico el cual predice la biomasa forestal a partir del DAP, mostrando crecimiento acelerado en árboles maduros, pero con limitaciones. Esta subestima en diámetros pequeño, posible saturación en grandes diámetros siendo útil solo para su rango de calibración (20-60 cm).

4.2. Valoración del carbono almacenado de una plantación de tornillo (*Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke) de 25 años

Tabla 5. Carbono fijado total en una plantación de *C. cateniformis* de 25 años.

Especie	Nº individuos	Biomasa aérea total (kg)	Biomasa aérea total (t)	Fracción de carbono	Carbono fijado total (t)
<i>C. cateniformis</i>	153	32 124,011	32,124	0,473	15,195

Tabla 6. Dióxido de carbono equivalente (CO₂e) en una plantación *C. cateniformis* de 25 años.

Especie	Nº individuos	Carbono total (t)	Constante estequiométrica	CO ₂ e (t)
<i>C. cateniformis</i>	153	15,195	3,667	55,719

Con base en la **Tabla 5** el carbono fijado total en la plantación de *C. cateniformis*, de 25 años fue 15,195 t equivalente a 18,993 tC/ha y con base en la **Tabla 6** el dióxido de carbono equivalente (CO₂e) fue 55,719 equivalente a 69,649 tCO₂ e/ha.

En comparación con Grefa y Aguinda (2020), quienes realizaron un estudio en Napo – Ecuador, registraron 469 individuos de *C. cateniformis*, y estimaron 13,78 tC/ha equivalente a 21,91 tCO₂ /ha, estos valores son inferiores a los resultados obtenidos en la presente investigación, debido a que los autores trabajaron en un área de 1,25 ha, además, puede deberse a variaciones en el DAP, altura y edad de la plantación, asimismo, Esquivel (2020), en su estudio de biomasa y carbono en *C. cateniformis* realizado en el Santuario Nacional Megantoni, encontró 22,82 tC/ha, valor ligeramente mayor a los resultados obtenidos, debido a que el autor trabajó en nueve transectos de 500 m².

Por otro lado, Ramírez y Chagna (2019), en su estudio realizado en la costa ecuatoriana cuantificaron seleccionaron 32 árboles de una plantación de *Eucalyptus grandis* de 48 años en 0,8 ha, y como resultado obtuvieron 0,75 tC/árbol equivalente a 312,10 tC/ha, , de igual manera López et al. (2018), en un estudio en Guatemala estimaron el contenido de carbono almacenado en plantaciones de *Tectona grandis* (teca) de 14 y 15 años, aplicando el método no destructivo, y obtuvieron como resultado 108,36 tC/ha en la plantación de 14 años y de 151,37 tC/ha en las de 15 años, estos valores fueron superiores a nuestro resultado, debido a que son estudios realizados con otras especies, además, influye la edad y densidad poblacional; sin embargo, nuestro resultado es ligeramente superior al de Nuñez (2018), quien en su investigación realizada en San Martín, obtuvo 11,134 tC y 40,827 tCO₂ e a partir de 32 árboles de *C. cateniformis*.

Mientras que nuestros resultados son superiores a los de Quiceno & Tangarife (2016), quienes obtuvieron 47,60 tC/ha en su estudio de estimación del contenido de carbono almacenado en un bosque primario en Colombia, debido a que solo reportaron 4 individuos de *C. cateniformis*, 6 de *Couma* sp. y 29 de *Qualea paraensis*.

Tabla 7. Valoración del dióxido de carbono equivalente (CO₂ e) en una plantación *C. cateniformis* de 25 años.

Mercado	Precio t CO ₂ e	Tipo de mercado	t CO ₂ e en <i>C. cateniformis</i>	Valorización de CO ₂ e en <i>C. cateniformis</i>
European Union Emissions Trading System (Unión Europea)	70 euros	Regulador	55,719	3 900,330 euros

United Kingdom Emissions Trading Scheme (Reino Unido)	69 dólares	Regulador	55,719	3 844,611 dólares
California Cap-and-Trade	38 dólares	Regulador	55,719	2 117,322 dólares
Korea Emissions Trading Scheme	25 dólares	Regulador	55,719	1 392,975 dólares
Regional Greenhouse Gas Initiative (EE. UU. noreste)	14 dólares	Regulador	55,719	780,066 dólares
China National Emissions Trading System	11,4 dólares	Regulador	55,719	635,197 dólares
Kazakhstan Emissions Trading Scheme	1,2 dólares	Regulador	55,719	66,863 dólares
Gold Standard	10 dólares	Voluntario	55,719	557,190 dólares
AirCarbon Exchange (ACX)	7,8 dólares	Voluntario	55,719	434,608 dólares
Perú (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation [REDD+] y reforestación)	7,8 dólares	Voluntario nacional/regional	55,719	434,608 dólares

Nota: REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation [REDD+] y reforestación).

Para la valoración del CO₂ e de la plantación de *C. cateniformis* de 25 años, se consideraron mercados reguladores y voluntarios que se detallan en la **Tabla 7**, a fin de ilustrar el rango de precios actuales. Los resultados muestran que en el mercado europeo (EU-ETS) presentó uno de los precios más altos (70 euros/tCO₂ e), por lo tanto, la captura de carbono alcanzó un valor de 3 900,330 euros; de forma similar, en Reino Unido, con un precio de 69 dólares/tCO₂ e, la valoración alcanzó los 3 844,611 dólares. En contraste, mercados como el de Kazajistán, con precios significativamente más bajos (1,2 dólares/tCO₂ e), solo permitió una valoración de 66,863 dólares.

En cuanto a los mercados voluntarios, que son más accesibles para proyectos comunitarios o forestales como REDD+, se observa una valoración moderada, como se detalla en el mercado Gold Standard o AirCarbon Exchange (ACX) y REDD + con precios entre 10 y 7,8 dólares/tCO₂ e respectivamente, entonces considerando estos mercados la valorización de la captura de carbono para la plantación fue 557,190 y 434,608 dólares, respectivamente.

Por otro lado, en estudios que incluyeron valoración económica, como el de Córdova (2025), quien valorizó en 29 780,45 dólares/ha el secuestro de 2 511,02 tC/ha en una concesión en Loreto, considerando 11,86 dólares/tC, valor muy superior al resultado obtenido en el presente estudio, sin embargo, nuestro resultado se asemeja al de Jaime-Huamán et al. (2025), quienes en su estudio realizado en un bosque de montaña altoandino de 0,5 ha valorizaron en 3 226,03 dólares el secuestro de 75,84 tCO₂, y en un bosque de montaña montano de 0,5 ha valorizaron en 5 725,74 dólares el secuestro de 134,59 tCO₂, considerando 3,66 dólares/tCO₂.

Por su parte, Guerrero y Tejada (2018), en su estudio de valoración económica de captura de CO₂ en diferentes especies en 45,75 ha realizado en Amazonas, valorizaron en 55 839,75 dólares la captura de 135,08 tCO₂ /ha; mientras que Ribeiro (2013), valorizó en 122 552 dólares/ha, la captura de 19 952 tCO₂ /ha en su estudio realizado en plantaciones de *C. cateniformis* y *Simarouba amara* de diferentes edades (15 a 40 años) en Iquitos, ambos resultados de valoración son superiores al resultado obtenido en la presente investigación, y esto se debe principalmente a la especie, densidad poblacional, edad de plantación y precio de carbono.

Finalmente, estos resultados destacan que la especie *C. cateniformis* posee un alto valor ecosistémico y económico, especialmente cuando se considera su incorporación en mercados de carbono de tipo regulado. No obstante, incluso en esquemas voluntarios de menor precio, su contribución a la mitigación del cambio climático puede representar una fuente complementaria de ingresos para las comunidades o concesiones de conservación comprometidas con la gestión sostenible del bosque.

V. CONCLUSIONES

- La biomasa aérea total estimada en la plantación de *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke (tornillo) de 25 años fue de 32,124 toneladas, de las cuales 27,860 toneladas correspondieron al fuste y 4,264 toneladas a las ramas, representando aproximadamente el 15,3 % de la biomasa del fuste. Asimismo, la biomasa aérea total, expresada por unidad de superficie, fue equivalente a 40,155 t/ha.
- El carbono fijado en la plantación de *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke (tornillo) de 25 años fue de 15,195 toneladas, lo que representa 18,993 tC/ha; este volumen es equivalente a 55,719 toneladas de dióxido de carbono (CO₂ e) el cual representa 69,649 tCO₂ e/ha. La valoración económica de estas 55,719 tCO₂ e, según los precios de distintos mercados internacionales, fue la siguiente: 3 900,330 euros en el mercado regulador de la Unión Europea, 3 844,611 dólares en el mercado del Reino Unido, 2 117,322 dólares en el mercado California Cap-and-Trade, 1 392,975 dólares en el mercado coreano, 780,066 dólares en el mercado del noreste de Estados Unidos (RGGI), 635,197 dólares en el mercado de China, 66,863 dólares en el mercado de Kazajistán, 557,190 dólares bajo el estándar Gold Standard, 434,608 dólares en el AirCarbon Exchange y 434,608 dólares en el programa REDD⁺. Estos resultados evidencian el significativo potencial económico de las plantaciones de *C. cateniformis* como sumideros de carbono ya que la captura de más de 55 mil toneladas de CO₂ e contribuye directamente a mitigar el cambio climático y representa una oportunidad de generar ingresos sostenibles a través de esquemas de compensación de carbono.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

- Continuar con estudios anuales en biomasa aérea y pago por servicio ambiental en esta plantación de *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke.
- Implementar prácticas de manejo silvicultural como liberación de lianas, para optimizar el crecimiento y mejorar la calidad de la madera.
- Establecer parcelas demostrativas de *Cedrelinga cateniformis* en colaboración con Escuela Profesional de Ingeniería Forestal, gobiernos locales, regionales y comunidades.
- Diseñar proyectos de captura de carbono en base a la biomasa acumulada y el CO₂ e fijado, para acceder a financiamiento mediante mercados voluntarios o regulados como Gold Standard y REDD⁺ .
- Incorporar herramientas de teledetección, modelos alométricos específicos y tecnología LiDAR, “Light Detection and Ranging” para estimar biomasa y carbono con mayor precisión.
- Monitorear periódicamente la dinámica de crecimiento (altura y diámetro).

VII. REFERENCIAS

- AirCarbon Exchange. (2025). *Peru REDD+ projects in Tambopata – Carbon credits market data*. <https://www.aircarbon.co>
- Angulo, G., Guerra, R., & Navarro, N. (2016). Influencia de condiciones fisiográficas y espaciamiento en el crecimiento de *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke en plantación pura. *Revista Peruana Forestal*, 38(1), 23–32. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/6440406>
- Arets, E. J. M. M., Berry, N. J., & Phillips, O. L. (2011). *Carbon storage in tropical forests and the potential for REDD+*. Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/196812>
- Aróstegui, A. (1974). *Estudio tecnológico de maderas del Perú (zona Pucallpa)*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Departamento de Industrias Forestales.
- Avitabile, V., Herold, M., Heuvelink, G., Lewis, S., Phillips, O., Asner, G., ... & Willcock, S. (2016). An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. *Global Change Biology*, 22(4), 1406–1420. <https://doi.org/10.1111/gcb.13139>
- Baluart, J., & Álvarez, J. G. (2015). Modelamiento del crecimiento de tornillo *Cedrelinga cateniformis* Ducke en plantaciones en Jenaro Herrera, departamento de Loreto, Perú. *Folia Amazónica*, 24(1), 21–32.
- Bosques Amazónicos (BAM), & Asociación para la Investigación y el Desarrollo Integral (AIDER). (2025). *Proyectos REDD+ en Ucayali, Madre de Dios y otras regiones del Perú: Datos recogidos en CarbonCredits.com*. <https://www.carboncredits.com>
- Brede, B., Terry, L., Barbier, N., Bartholomeus, H. M., Bartolo, R., & Calders, K. (2022). Non-destructive estimation of individual tree biomass: Allometric models, terrestrial and UAV laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113180. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113180>

- Brockhaus, M., & Di Gregorio, M. (2012). *A brief overview: National REDD+ policy processes and the role of forests in climate change mitigation*. CIFOR. <https://doi.org/10.17528/cifor/003832>
- Cacho, O. J., Lipper, L., & Moss, J. (2014). Transaction costs of carbon offset projects: A comparative study. *Ecological Economics*, 88, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.12.002>
- CarbonCredits.com. (2025, junio). *Carbon market prices: California, Gold Standard and more*. <https://www.carboncredits.com>
- Carrera Gambetta, F., Kanninen, M., Kleinn, C., Louman, B., Mejía, A., Morales Hidalgo, D., & Núñez Baltodano, L. A. (2002). *Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., Péliissier, R., Ploton, P., Ryan, C. M., Saldarriaga, J. G., & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Che, H., & Menton, M. (2013). *The context of REDD+ in Peru: Drivers, agents and institutions* (Occasional Paper No. 106). CIFOR. <https://doi.org/10.17528/cifor/004036>
- Center for International Forestry Research (CIFOR). (2013). *El futuro del manejo forestal en América Latina*. https://www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/BCIFOR1302.pdf
- Cohen, N., & Gómez, G. (2019). Metodología de la investigación, ¿para qué? *Revista de Tesopress*, 1(2), 15–19. <https://www.teseopress.com/metodologiadelainvestigacion/>
- Congreso de la República del Perú. (2011). *Ley N.º 29763 – Ley Forestal y de Fauna Silvestre*. <https://www.gob.pe/institucion/serfor/normas-legales/29925-ley-n-29763>

- Córdova, E. D. (2025). *Valoración económica del carbono almacenado en la biomasa aérea de Cedrelinga cateniformis de la concesión forestal Hydra Consulting, distrito de Pebas, Loreto – 2022* (Tesis de maestría, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana). Repositorio Institucional UNAP. <https://hdl.handle.net/20.500.12737/11018>
- Dávila, M., & Gavilanes, J. A. (2022). *Estimación de biomasa aérea de Cedrelinga cateniformis (Ducke) Ducke de bosques siempreverdes de tierras bajas de la Reserva de Producción Faunística Cuyabeno*.
- De Pinto, A., Magalhaes, M., & Ringler, C. (2010). *Potential of carbon markets for small farmers: A literature review* (IFPRI Discussion Paper 01004). International Food Policy Research Institute (IFPRI). <https://www.ifpri.org/publication/potential-carbon-markets-small-farmers>
- Dionicio, R. H. (2019). *Caracterización de variables dasométricas y estimación de biomasa aérea de Cedrelinga cateniformis (Ducke) Ducke, en el Bosque Reservado UNAS–Tingo María, Huánuco* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva). Repositorio Institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/c1de0887-d796-41fa-9d7b-03e514df86e8/content>
- Esquivel, D. G. (2020). *Estructura poblacional y estimación del carbono en la biomasa aérea de Cedrelinga cateniformis Ducke (Fabaceae) en la zona de uso turístico-recreativo del Santuario Nacional Megantoni, La Convención - Cusco* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco).
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2013). *Guía para la implementación de proyectos REDD+*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/i2907s/i2907s.pdf>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2012). *Tendencias y oportunidades para los pequeños productores forestales en los mercados de servicios ecosistémicos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/i3087s/i3087s.pdf>

- Food and Agriculture Organization (FAO). (2001). *Global Forest Resources Assessment 2000: Main report* (FAO Forestry Paper No. 140). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/y1997e/y1997e00.htm>
- Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. O., & Foley, J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: Making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2(4), 045023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045023>
- Gold Standard. (2025, julio). *Market insights and voluntary carbon prices*. <https://www.goldstandard.org>
- Grefa, I. K., & Aguinda, E. G. (2020). *Estimación de carbono en plantaciones de Cedrelinga catenaeformis D. Duke, Cordia alliodora (Ruíz/Pav.) Oken y Tabebuia donnell-smithii Rose en La Hacienda Los Laureles, Cantón Archidona* (Tesis de pregrado, Universidad Estatal Amazónica). Repositorio Institucional UEA. <https://repositorio.uea.edu.ec/bitstream/123456789/828/1/T.AMB.B.UEA.%20%203267.pdf>
- Guerrero, I., & Tejada, L. A. (2018). *Valoración económica del servicio ambiental de CO₂ del bosque primario del fundo Montana ubicado en el caserío Puerto Pakui del distrito de Imaza, provincia de Bagua, región Amazonas 2017* (Tesis de licenciatura, Universidad Señor de Sipán).
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2020). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-hill.
- Holdridge, L. R. (1987). *Ecología basada en zonas de vida* (N° 83). IICA Biblioteca Venezuela.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use*. Institute for Global Environmental Strategies. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>

- International Carbon Action Partnership (ICAP). (2025). *Emissions Trading Worldwide: Status Report 2025*. <https://icapcarbonaction.com>
- Jaime-Huamán, E., Aponte, H., Damián-Parizaca, A., & La Torre-Cuadros, M. (2025). Reserva de carbono en el bosque nublado Amaru-Huachocolpa-Chihuana Huancavelica, Perú: estimación y valoración económica. *Colombia Forestal*, 28(1), 1–14. <https://doi.org/10.14483/2256201x.21821>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4: Agriculture, forestry and other land use*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES). <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- Karsenty, A., Guéneau, S., Capistrano, D., & Singer, B. (2017). REDD+ and forest governance: Lessons from Brazil, Indonesia and the Democratic Republic of Congo. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 26–27, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.01.005>
- Kumar, D., Sharma, S., & Choudhary, M. (2019). Aboveground biomass and soil carbon: Stock and stability under global change. En M. Choudhary, A. Kumar, & D. Kumar (Eds.), *Soil-plant interactions* (87–106). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76735>
- López, H. G., Vaides, E. E., & Alvarado, A. (2018). Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía Costarricense*, 42(1), 115–123. <https://doi.org/10.15517/rac.v42i1.32201>
- Marrón, S. (1997). *Estimación de la biomasa y el cambio de biomasa de los bosques tropicales: una introducción* (Vol. 134). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Martin, A. R., & Thomas, S. C. (2011). A reassessment of carbon content in tropical trees. *PLOS ONE*, 6(8), e23533. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023533>
- Ministerio de Agricultura (MINAG). (2009). *Decreto Supremo N.º 010-2009-AG – Lineamientos sobre el uso de bosques del Estado*.

- Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). (2015). *Decreto Supremo N.º 018-2015-MINAGRI – Reglamento para la Gestión Forestal*.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2013). *Mapa del patrimonio forestal nacional 2010–2011*. Gobierno del Perú. <https://www.minam.gob.pe>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2009). *Identificación de metodologías existentes para determinar stock de carbono en ecosistemas forestales*. Documento institucional, Gobierno del Perú.
- Montero, M., & Kanninen, M. (2002). Biomasa y carbono en plantaciones de *Terminalia amazonia* (Gmel.) Excell en la zona sur de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, (39–40), 50–55.
- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal* (pp. 20–92). Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR). <http://www.bio-nica.info/biblioteca/mostacedo2000ecologiavegetal.pdf>
- Naeem, S. (1998). Redundancia de especies y fiabilidad de los ecosistemas. *Biología de la Conservación*, 12(1), 39–45.
- Núñez, A. D. (2018). *Estimación de biomasa aérea de Cedrelinga cateniformis Ducke en el Alto Mayo, San Martín* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Repositorio Institucional UNALM. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/182c0551-ffdc-4c18-9800-6873884082d1>
- Overman, J. P. M., Witte, H. J. L., & Saldarriaga, J. G. (1994). Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforest. *Journal of Tropical Ecology*, 10(2), 207–218. <https://doi.org/10.1017/S0266467400007891>
- Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. IPCC.

- Pagiola, S., Bishop, J., & Landell-Mills, N. (2005). *Selling forest environmental services: Market-based mechanisms for conservation and development*. Earthscan.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Hayes, D., et al. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Parker, C., Mitchell, A., Trivedi, M., & Mardas, N. (2009). *The Little REDD+ Book*. Global Canopy Programme. <https://www.globalcanopy.org/publications/little-redd-book>
- Petre, A., Ola, U., Ali, S., & Reynero, A. (2006). *Alternativas de sustentabilidad del bosque nativo del Espinal, Área Captura de Carbono* (Proyecto de Investigación Aplicada a los Recursos Forestales Nativos N4085-AR). Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, Argentina.
- Pinto-Cataláo, C., & Cabudivo, W. (2022). Rendimiento en madera y carbón de *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke. *Revista Peruana Agroforestal*, 44(2), 55–66. <https://agris.fao.org/search/en/providers/125045/records/6798f564d6a63682f0464515>
- Plan Vivo Foundation. (2020). *The Plan Vivo Standard*. <https://www.planvivo.org/plan-vivo-standard>
- Polzot, C. L. (2004). *Carbon storage in coffee agroecosystems of southern Costa Rica: Potential applications for the clean development mechanism* [Master's thesis, York University]. <https://lasnubes.info.yorku.ca/files/2019/08/ChristinaPolzot.pdf>
- Puerta, R. H., & Cárdenas, P. (2012). El bosque reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS). *Xilema*, 25(1), 18-21.
- Puerta, R. H. (2007). *Modelo digital de elevación del bosque reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María–Perú* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva). Repositorio Institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/80678075-47e5-4b29-810f-36a8897de5b4>

- Quiceno, N. J., & Tangarife, G. M. (2016). *Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena Piapoco Chiguiro-Chatare de Barrancominas, departamento del Guainía* (Tesis de pregrado, Universidad de Manizales). DOI: [10.17151/luaz.2016.43.9](https://doi.org/10.17151/luaz.2016.43.9)
- Ramírez, J. L., & Chagna, E. J. (2019). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Eucalyptus grandis* W. Hill. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 7(1), 31–42.
- Recessary. (2025, junio). *Carbon market update: China ETS price movements*. <https://www.recessary.com>
- Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI). (2025, junio). *Quarterly Market Monitor Report*. <https://www.rggi.org>
- Reuters. (2025, julio). *Carbon price data: EU ETS and UK ETS*. <https://www.reuters.com>
- Reynel, C., Pennington, T. D., Pennington, R. T., Flores, C., & Daza, A. (2003). *Árboles útiles de la Amazonía peruana y sus usos: Manual de identificación ecológica y propagación de las especies*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Ribeiro, S. J. G. (2013). *Valoración económica del secuestro de CO₂ en plantaciones de Simarouba amara (Aublet) “marupa” y Cedrelinga cateniformis (Ducke) “tornillo” en el CIEFOR, Puerto Almendra, Iquitos - Perú* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana). Repositorio Institucional UNAP. <http://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/4921>
- Royal Botanic Gardens, Kew. (2025). *Cedrelinga cateniformis (Ducke) Ducke*. *Plants of the World Online*. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:495771-1>
- Seeberg-Elverfeldt, C. (2010). *Las posibilidades de financiación del carbono para la agricultura, la actividad forestal y otros proyectos de uso de la tierra en el contexto del pequeño agricultor*. FAO. <https://www.fao.org/4/i1632s/i1632s.pdf>

- Segura, M., & Kanninen, M. (2005). Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica*, 37(1), 2–8. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.02027.x>
- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). (2020). *Manual de categorización de predios forestales y de fauna silvestre*. <https://www.serfor.gob.pe>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2025). *Datos hidrometeorológicos a nivel nacional*. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>
- Shi, L., & Liu, S. (2017). Métodos de estimación de la biomasa forestal: una revisión. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/65733>
- Thomas, S. C., & Martin, A. R. (2012). Carbon content of tree tissues: A synthesis. *Forest Science*, 58(5), 447–454. <https://doi.org/10.5849/forsci.11-000>
- UN-REDD Programme. (2011). *The UN-REDD Programme Strategy 2011–2015*. <https://www.un-redd.org>
- Vidaurre, H. A. (1994). *Bases silviculturales para el manejo de Cedrelinga cateniformis (Ducke) Ducke en la Amazonía peruana* (Tesis de maestría, CATIE). <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/4534>
- World Bank. (2024). *Carbon Pricing Dashboard*. <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org>
- World Bank. (2023). *State and Trends of Carbon Pricing 2023*. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/39555>
- Zelli, F., Erler, D., Frank, S., Hein, J.-I., Hotz, H., & Santa Cruz Melgarejo, A. M. (2014). *Reducing Emissions from Deforestation and Degradation in Peru: a challenge to social inclusion and multi-level governance*. German Development Institute. https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/36042006/Zelli_et_al_2014_REDD_in_Peru.pdf

ANEXOS

Anexo A. Panel fotográfico.



Figura 4. Colocación de banner.



Figura 5. Delimitación de la parcela de investigación.



Figura 6. Anotación de datos de campo.



Figura 7. Georreferenciación de individuo de tornillo.

Anexo B. Mapa de dispersión de *C. cateniformis*.

Se muestra en la página siguiente a escala 1:600 en tamaño A3.