

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



**ESTIMACIÓN DEL CARBONO ALMACENADO EN LA BIOMASA AÉREA EN
UNA PLANTACIÓN DE *Simarouba amara* (MARUPA) USANDO TECNOLOGÍA
ELECTRÓNICA EN PUCALLPA, UCAYALI.**

Tesis

Para optar el título profesional de:

INGENIERO FORESTAL

PRESENTADO POR:

DELIA MARÍA LEÓN ARRIETA

Tingo María – Perú

2025



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 056-2025-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 06 de mayo de 2025, a horas 11:00 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“ESTIMACIÓN DEL CARBONO ALMACENADO EN LA BIOMASA AÉREA EN UNA PLANTACIÓN DE *Simarouba amara* (MARUPA) USANDO TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA EN PUCALLPA, UCAYALI.”

Presentado por la Bachiller: **LEÓN ARRIETA, DELIA MARÍA**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“EXCELENTE”**.

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, 08 de mayo de 2025


Ing. MSc. RAÚL ARAUJO TORRES
PRESIDENTE


Dr. DAVID PRUDENCIO QUISPE JANAMPA
MIEMBRO


Ing. MSc. MARIBEL F. ROCA CAPCHA
MIEMBRO


Ing. MSc. BRAYAN A. CALDAS DE LA CRUZ
ASESOR


Ing. GLORIA P. CARDENAS RENGIFO
ASESOR


Ing. MSc. TATIANA M. UCAÑAY AYLLON
ASESOR





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

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 141 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación 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% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería Forestal

Tipo de documento:

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

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
ESTIMACIÓN DEL CARBONO ALMACENADO EN LA BIOMASA AÉREA EN UNA PLANTACIÓN DE Simarouba amara (MARUPA) USANDO TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA EN PUCALLPA, UCAYALI	DELIA MARÍA LEÓN ARRIETA	18 % Dieciocho

Tingo María, 19 de mayo de 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Dr. Tomas Menacho Mallqui
JEFE

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



**ESTIMACIÓN DEL CARBONO ALMACENADO EN LA BIOMASA AÉREA EN
UNA PLANTACIÓN DE *Simarouba amara* (MARUPA) USANDO TECNOLOGÍA
ELECTRÓNICA EN PUCALLPA, UCAYALI.**

Autor : Delia María León Arrieta

Asesor(es) : Ing. MSc. Brayan Andre Caldas de la Cruz
Ing. Gloria Patricia Cardenas Rengifo
Ing. MSc. Tatiana Mildred Ucañay Ayllón

Programa de investigación : Gestión de Bosques y Plantaciones Forestales.

Línea de Investigación : Biomasa y Ecología Forestal.

Eje temático : Biomasa Aérea y Arbórea

Lugar de ejecución : Centro Experimental Los Mangos – INIA, Pucallpa

Duración de trabajo : 7 meses

Financiamiento : S/. 2 514,60

FEDU : No

Propio : Sí

Otros : No

Tingo María - Perú

2025

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía en los momentos de incertidumbre, mi refugio en las dificultades y mi compañía constante en cada paso de la vida.

A mis amados padres, Jorge León y María Arrieta, quienes han sido mi mayor apoyo y constante fuente de inspiración. Les agradezco por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia, por su amor incondicional y por los sabios consejos que siempre me han guiado.

A mis queridas hermanas, Avertina León y Mónica León, por creer en mí incluso en los momentos de duda, por sus palabras de aliento y por el cariño que siempre me han brindado.

A mi mejor amigo y compañero de vida, Alexis J. Panduro Pezo, por ser mi apoyo incondicional, por estar siempre a mi lado, creer en mí y acompañarme con paciencia en cada etapa de este camino.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para enfrentar cada desafío en este trayecto académico.

A mis padres, cuyo amor incondicional y constante apoyo han sido mi principal fuente de inspiración y motivación.

A mis hermanas, por su compañía, aliento y confianza en mí. Su apoyo emocional ha sido esencial para mantenerme enfocada y perseverante en mis objetivos.

A Alexis Panduro, por ser mi complemento, mi fuerza en los momentos difíciles y por compartir conmigo cada logro y desafío con alegría y paciencia.

A mi alma mater, Universidad Nacional Agraria de la Selva, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente, por inculcarme valores, conocimientos y experiencias que han sido fundamentales en mi crecimiento académico y personal.

Al Instituto Nacional de Innovación Agraria, por brindarme el espacio, los recursos y las facilidades necesarias para llevar a cabo esta investigación.

A mis asesores, al ingeniero Brayan Caldas, la ingeniera Patricia Cárdenas y la ingeniera Tatiana Ucañay, por su valiosa orientación, paciencia y dedicación. Su apoyo y experiencia han sido cruciales para el éxito de esta investigación.

A los miembros del jurado de tesis, Msc. Raúl Araujo Torres, Dr. David Prudencio Quispe Janampa y MSc. Maribel Flora Roca Capcha por sus aportes y observaciones pertinentes en la investigación.

Al ingeniero Cleide Santos Flores, por su apoyo y guía en la presente tesis. Su conocimiento y disposición para compartir su experiencia fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

A mi familia y amigos, que de una u otra manera me brindaron su compañía, aliento y cariño a lo largo de mi etapa universitaria.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Marco teórico	3
2.1.1. Biomasa.....	3
2.1.2. Métodos para determinar la biomasa	4
2.1.3. Secuestro de carbono en plantaciones.....	4
2.1.4. Plantaciones como sumidero de carbono	5
2.1.5. Carbono almacenado.....	6
2.1.6. Fijación de CO ₂	6
2.1.7. Valor económico del CO ₂	7
2.1.8. Ecuaciones alométricas	7
2.1.9. Análisis de regresión Lineal.....	8
2.1.10. Coeficiente de determinación de R ²	8
2.1.11. Prueba exacta de Fisher (F).....	9
2.1.12. Prueba estadística T-Student (t)	9
2.1.13. Análisis de regresión ponderada	10
2.1.14. Selección de la ecuación con el índice Furnival	10
2.1.15. Análisis de residuos	10
2.1.16. Tecnología Field Map	11
2.1.17. <i>Simarouba amara</i> Aubl.....	12
2.2. Estado del arte.....	13
2.2.1. A nivel internacional	13
2.2.2. A nivel nacional	13
2.2.3. A nivel local	15
III. MATERIALES Y MÉTODOS	16
3.1. Lugar de ejecución.....	16
3.1.1. Ubicación política	17
3.1.2. Ubicación geográfica	17
3.1.3. Zona de vida.....	17
3.1.4. Clima.....	17
3.1.5. Datos de la plantación	17

3.2. Material y métodos	18
3.2.1. Material vegetativo	18
3.2.2. Materiales y equipos	18
3.2.3. Metodología	18
3.3. Criterios de la investigación.....	25
3.3.1. Tipo de investigación.....	25
3.3.2. Nivel de investigación.....	26
3.3.3. Diseño de investigación	26
3.4. Variables en estudio	26
3.4.1. Variable independiente	26
3.4.2. Variable dependiente.....	26
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	27
4.1. Construcción de una ecuación alométrica para estimar biomasa aérea en la plantación de <i>S. amara</i>	27
4.1.1. Análisis de regresión.....	28
4.1.2. Prueba exacta de Fisher (F).....	29
4.1.3. Prueba estadística t – student (t)	30
4.1.4. Análisis de regresión ponderada	31
4.1.5. Selección de la mejor ecuación.....	32
4.1.6. Obtención de los coeficientes para la creación de la ecuación alométrica	34
4.1.7. Análisis de residuos	35
4.1.8. Estimación de la biomasa aérea	36
4.2. Estimación del carbono almacenado en la plantación de <i>S. amara</i>	37
4.3. Estimación del secuestro de dióxido de carbono (CO ₂) en la plantación de <i>S.</i> <i>amara</i>	38
4.4. Estimación del valor económico del secuestro de CO ₂ de la plantación de <i>S.</i> <i>amara</i>	39
V. CONCLUSIONES.....	40
VI. PROPUESTAS A FUTURO	41
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
ANEXOS	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Ubicación geográfica de la zona en estudio	17
2. Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea	22
3. Precio del CO ₂ por tonelada en el mercado.....	25
4. Resultado del análisis de regresión (R ²).	29
5. Resultados de la prueba exacta de Fisher (F).	30
6. Resultados de la prueba estadística t-student (t).....	31
7. Coeficiente de determinación para los modelos ponderados.....	32
8. Índice de Furnival para la selección de la mejor ecuación.	33
9. Coeficientes para la ecuación	34
10. Biomasa aérea real y biomasa aérea predicha.	36
11. Carbono almacenado en la plantación de <i>S. amara</i>	37
12. Secuestro de CO ₂ en la plantación de <i>S. amara</i>	38
13. Valor económico de la plantación de <i>S. amara</i>	39
14. Georreferenciación de <i>S. amara</i> de 15 años.	49
15. Biomasa aérea de <i>S. amara</i> de 15 años.	50
16. Carbono aéreo, secuestro de CO ₂ y valoración económica del secuestro de CO ₂ de <i>S. amara</i> de 15 años.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Modos de medición de altura.	12
2. Ubicación de la plantación de <i>S. amara</i>	16
3. Secuencia metodológica.	17
4. Diseño del Proyecto en el Software Field – Map Project Manager.....	18
5. Calibración del Trupulse 360R.....	19
6. Localización espacial de los árboles.....	20
7. Visualización del árbol localizado en campo en tiempo real.	20
8. Relación entre la biomasa aérea total y el dap de <i>S. amara</i>	27
9. Relación entre la biomasa aérea total y la altura de <i>S. amara</i>	28
10. Comparación de los modelos.....	33
11. Distribución de los residuos para la ecuación seleccionada.	35
12. Comparación de la biomasa aérea predicha y biomasa aérea real.....	36
13. Mapa de ubicación de la plantación de <i>S. amara</i>	55
14. Mapa de dispersión de la plantación de <i>S. amara</i>	56
15. Plantación de <i>S. amara</i> de 15 años.	57
16. Codificación de los árboles de <i>S. amara</i>	57
17. Posicionamiento del trípode.	58
18. Colocación del Trupulse 360R al braket.	58
19. Calibración del Trupulse 360R.....	59
20. Georeferenciación y medición de altura total de los árboles de <i>S. amara</i>	59
21. Medición de diámetros de los árboles de <i>S. amara</i>	60
22. Visita del presidente de los miembros del jurado a la plantación de <i>S. amara</i>	60

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea en una plantación de 15 años de *Simarouba amara* (marupa) usando tecnología electrónica en Pucallpa, Ucayali. El tipo y nivel de investigación fue aplicada y descriptivo, con un diseño de investigación no experimental. Para llevar a cabo esta estimación, se calculó la biomasa aérea de 78 árboles mediante un método indirecto (no destructivo). Este enfoque consistió en medir el diámetro a la altura del pecho (dap) y la altura comercial (HT) de cada árbol, lo que permitió construir una ecuación alométrica para estimar la biomasa aérea. La metodología empleada para construir la ecuación que estima la biomasa aérea se basó en la regresión lineal, utilizando el método de mínimos cuadrados para ajustar los datos recolectados en el campo. Las ecuaciones alométricas seleccionadas fueron sometidas a rigurosas pruebas estadísticas con el fin de identificar aquel que proporcionara los mejores resultados en términos de precisión y confiabilidad. Los resultados obtenidos en esta investigación revelaron que la plantación de *S. amara* presenta una biomasa aérea de 123,51t/ha. Además, se estimó un almacenamiento de carbono de 55,58tC/ha y un secuestro de dióxido de carbono (CO₂) equivalente a 203,98tCO₂/ha. Asimismo, se realizó una valoración económica del secuestro de CO₂, que alcanzó un valor de 15 318,94\$/tCO₂/ha. En conclusión, esta investigación proporciona información valiosa sobre el potencial de *S. amara* como sumidero de carbono en plantaciones jóvenes.

Palabras clave: *Simarouba amara*, plantación, ecuaciones alométricas, biomasa aérea, carbono almacenado, valoración económica.

**An Estimation of the Stored Carbon in the Aerial Biomass of a Plantation of
Simarouba amara (Paradise Tree) Using Electronic Technology in Pucallpa, Ucayali**

Abstract

The objective of the present research was to estimate the stored carbon in the aerial biomass of a fifteen year old plantation of *Simarouba amara* (paradise tree) using electronic technology in Pucallpa, Ucayali, [Peru]. The type and level of research were applied and descriptive, with a non-experimental research design. In order to carry out this estimation, the aerial biomass of seventy eight trees was calculated using an indirect method (non-destructive). This focus consisted in measuring the diameter at breast height (dbh; dap in Spanish) and the commercial height (HT) of each tree, which allowed for the construction of the equation that estimates the aerial biomass; it was based on the linear regression, using the least minimum squares method to adjust the data collected in the field. The allometric equations that were selected were submitted to rigorous statistical tests with the goal of identifying that which provided the best results in terms of precision and trustworthiness. The results that were obtained in this research revealed that the plantation of *S. amara* presented an aerial biomass of 123.51t/ac. Moreover, it was estimated that there was a stored carbon of 55.58tC/ac and a sequestration of carbon dioxide (CO₂) equivalent to 203.98tCO₂/ac. At the same time, an economic assessment was done of the CO₂ sequestration, which reached a value of \$15,318.94/tCO₂/ac. In conclusion, this research provided valuable information regarding the potential of *S. amara* as a carbon trap on young plantations.

Keywords: *Simarouba amara*, plantation, allometric equations, aerial biomass, stored carbon, economic assessment

I. INTRODUCCIÓN

La deforestación sigue siendo un problema por la tala ilegal y la agricultura migratoria. A nivel global, el cambio climático preocupa por el aumento de la temperatura, causado por el incremento de gases de efecto invernadero. DAR (2022) reporta que entre 2001 y 2020, Perú perdió 2,636,585 hectáreas de bosque, afectando regiones como Loreto, San Martín, Ucayali, Junín, Madre de Dios y Amazonas. Estas zonas representan más del 77% de la pérdida forestal. La acumulación de dióxido de carbono (CO₂) es una preocupación mundial, siendo uno de los principales contribuyentes al efecto invernadero. Según el IPCC (2018), la concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado de 280 a 379 partes por millón (ppm), con un incremento anual superior a 1,5ppm.

La captura de CO₂ a través de la fotosíntesis en la estructura vegetal de las plantas puede contribuir significativamente a mitigar el calentamiento global. Por esta razón, en la actualidad se están estableciendo plantaciones forestales en varios países del mundo, reconocidas por su importancia en la absorción del dióxido de carbono liberado durante las actividades humanas. Además de esta función crucial, estas plantaciones proporcionan materia prima renovable y ayudan a prevenir la degradación de los bosques.

La provincia de Coronel Portillo no es ajena a esto, ya que a lo largo de los años se han instalado plantaciones forestales, tanto maderables como no maderables, principalmente con fines de investigación, conservación, social y económicos; sin embargo, las investigaciones sobre la biomasa almacenada en estas plantaciones son insuficientes, a pesar de su importancia para evaluar adecuadamente la cantidad de carbono que los árboles almacenan. De acuerdo con la problemática antes mencionada, surge la siguiente interrogante ¿Cuánto será el carbono almacenado en la biomasa aérea en una plantación de *Simarouba amara* (marupa) usando tecnología electrónica en Pucallpa, Ucayali?.

El presente estudio se llevará a cabo en plantaciones de *S. amara* (marupa), con el propósito de obtener resultados precisos sobre la biomasa aérea usando tecnología electrónica. Este enfoque permite la recopilación de datos de manera eficiente y exacta, lo que resulta ideal para determinar ecuaciones alométricas mediante un método no destructivo.

La información generada en este estudio permitirá estimar con precisión la cantidad de carbono almacenado en las plantaciones de *S. amara* en la Pucallpa - Ucayali, proporcionando herramientas fundamentales para la planificación e implementación de proyectos enfocados en la reducción de emisiones y la captura de carbono. Además, estos resultados podrán servir como

base para iniciativas relacionadas con la certificación de bonos de carbono específicamente asociados a esta especie, fomentando su valorización en los mercados ambientales.

1.1. Objetivo general

Estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea en una plantación de *Simarouba amara* (marupa) usando tecnología electrónica en Pucallpa, Ucayali.

1.2. Objetivos específicos

- Construir una ecuación alométrica para estimar la biomasa aérea total en la plantación de *S. amara* en Pucallpa, Ucayali.
- Estimar el carbono almacenado en la plantación de *S. amara* en Pucallpa, Ucayali.
- Estimar el secuestro de dióxido de carbono (CO₂) en la plantación de *S. amara* en Pucallpa, Ucayali.
- Estimar el valor económico del secuestro de CO₂ de la plantación de *S. amara* en Pucallpa, Ucayali.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Biomasa

Brown *et al.* (1997) manifiestan que la biomasa es la medida del volumen completo de materia orgánica presente sobre el suelo, cuantificada en toneladas de peso seco. Esta métrica no solo evalúa la cantidad actual de materia orgánica, sino que también ofrece una perspectiva de la habilidad de los ecosistemas para conservar y almacenar este recurso a lo largo del tiempo.

La biomasa es fundamental para calcular la cantidad de nutrientes en las distintas partes de las plantas y estratos de la vegetación, permite cotejar diferentes tipos de especies o vegetación en diversos lugares y se encuentra conformado por el peso del material orgánico que existe en un ecosistema forestal, tanto materia epigea como subterránea (Fonseca-González *et al.*, 2021). Asimismo, representa los recursos acumulados en un ecosistema y la variación que existe por la dinámica o disturbios antropogénicos, ya que esto ayuda a obtener información de las alteraciones en el “capital” de los recursos del ecosistema (Escobar y Maass, 2008).

La biomasa se determina de acuerdo con el desarrollo de la estructura vegetal, en los ecosistemas forestales es crucial para estimar el carbono que se encuentra retenido y calcular las tasas de fijación anual, estos son temas relevantes por la repercusión directa con el calentamiento global (Cifuentes, 2010).

2.1.1.1. Biomasa aérea

Gayoso (2002) señala que la biomasa aérea de los árboles está compuesta por una combinación variable de sus partes, que incluyen las hojas, ramas y fuste, cuyas proporciones varían según la especie y el tamaño del árbol. Además, destaca que estos componentes no solo constituyen la estructura de los árboles, sino que también pueden servir como importantes almacenes de carbono en el ecosistema.

A lo largo de un extenso período, los árboles poseen la capacidad de acumular carbono en su estructura leñosa, siendo la biomasa una manifestación tangible de este proceso. Este término abarca todo el material orgánico presente en los ecosistemas forestales que contribuye al almacenamiento de carbono (Pons, 2005).

2.1.2. Métodos para determinar la biomasa

Existen dos métodos para calcular la biomasa:

Método indirecto

Se basa en usar factores de expansión y ecuaciones alométricas que puedan vincular ciertas dimensiones de fácil medición que se obtienen durante la evaluación in situ con ciertas particularidades de interés. Se puede hacer uso de ecuaciones alométricas para determinar la cantidad de biomasa total de un árbol obteniendo solo las variables dasométricas (diámetro a la altura del pecho y altura total) y generando un análisis de regresión (Rügnitz *et al.*, 2009).

Método directo

También conocido como método destructivo, se utiliza para construir factores de expansión y ecuaciones alométricas respecto a la biomasa. Este método se basa en cortar de uno a más árboles, la biomasa se determina mediante el peso fresco y seco de cada uno de los componentes de la estructura vegetal (fuste, ramas y hojas) y de acuerdo con los resultados obtenidos se puede deducir la biomasa para el área total de interés (Rügnitz *et al.*, 2009).

2.1.3. Secuestro de carbono en plantaciones

El proceso de retención de carbono de manera continua en los diversos tipos de uso del suelo implica la captura y almacenamiento de carbono a lo largo del tiempo, derivado de actividades implementadas en áreas degradadas. Estas actividades, que pueden incluir la agroforestería, la reforestación y el manejo sostenible del suelo, contribuyen a la recuperación mejora del potencial de los ecosistemas para retener carbono. La cantidad de carbono retenido se mide en toneladas de carbono por unidad de superficie anualmente (tC/ha/año), lo que permite evaluar la efectividad de las prácticas de manejo en la disminución de gases que provocan el efecto invernadero y en la reducción del impacto del cambio climático (Arévalo *et al.*, 2003).

Las plantaciones forestales, como ecosistemas artificiales, son el resultado de la intervención humana mediante la introducción controlada de plántulas, semillas o una combinación de ambas. Este proceso puede realizarse a través de prácticas de reforestación, que implican la restauración de áreas previamente deforestadas o degradadas, así

como mediante la forestación planificada en áreas que anteriormente no estaban cubiertas por bosques (Llerena *et al.*, 2007).

Los bosques naturales son reconocidos principalmente por su capacidad para secuestrar dióxido de carbono. Sin embargo, también existen alternativas de uso del suelo, como los sistemas agroforestales y la reforestación planificada, que incluyen prácticas agrosilvopastoriles. Estos sistemas pueden lograr un secuestro promedio de 95 toneladas de carbono por hectárea en un período de quince años. Además, ofrecen una variedad de bienes y servicios que tienen el potencial de prevenir la deforestación de entre 5 y 20 hectáreas que, de otro modo, serían gestionadas con métodos tradicionales Pérez (2014).

2.1.4. Plantaciones como sumidero de carbono

Un sumidero de carbono se define como un sistema que captura y retiene carbono de la atmósfera, un proceso que se observa en los ecosistemas forestales, donde el dióxido de carbono (CO₂) es absorbido durante la fotosíntesis. En términos más amplios, los sumideros de carbono incluyen océanos, bosques y suelos, que extraen y almacenan carbono a través de procesos físicos y biológicos, como la fotosíntesis (Acosta *et al.*, 2001).

Las plantaciones forestales tienen la capacidad de retener carbono incluso hasta más allá del ciclo de vida de un ecosistema. El carbono que retiene la estructura vegetal de la planta mediante la fotosíntesis, sin contar el proceso oxidativo respiratorio es, en cierta parte, retenido en su biomasa, que aumenta durante el proceso de desarrollo del árbol, hasta que sea cortado. En otra cantidad el carbono es liberado hacia el suelo y oxidado por actividad microbiana, retornando cierta porción de carbono a la atmósfera y el resto se acumula en el material orgánico del suelo (Pardos, 1999).

Fonseca-González *et al.* (2021) mencionan que los ecosistemas forestales contribuyen a los servicios ecosistémicos, ayuda a la sobrevivencia de las especies de fauna y sobre todo recupera la biodiversidad. Asimismo, algunas especies forestales maderables tienen un valor económico en el mercado por la calidad de su madera. Realizar plantaciones en general es una buena alternativa, ya que estas actúan como sumideros de carbono y ayudan a reducir los gases de efecto invernadero, que son el principal motivo para el cambio climático.

2.1.5. Carbono almacenado

La capacidad de almacenamiento de biomasa por hectárea en un bosque es un fenómeno complejo influenciado por múltiples factores interrelacionados. Además de las condiciones del suelo y el clima, otros aspectos como la biodiversidad, la densidad vegetal y los ciclos naturales de regeneración juegan un papel crucial. La biodiversidad afecta la estructura del ecosistema, la densidad vegetal determina la competencia por recursos, y los ciclos de regeneración influyen en la capacidad del bosque para mantener y aumentar su biomasa (Baltazar, 2011).

Según Brack y Mendiola (2000), las plantas juegan un papel clave en el ciclo del carbono al absorber dióxido de carbono (CO_2) del suelo, el agua y el aire. A través de la fotosíntesis, producen su propio alimento y materia orgánica, utilizando el CO_2 para formar compuestos que constituyen gran parte de su estructura vegetal. Al concluir este proceso, las plantas liberan oxígeno a la atmósfera, contribuyendo a la renovación del aire. De esta manera, las plantas no solo generan biomasa rica en carbono, sino que también ayudan a mantener el equilibrio de CO_2 en el ambiente.

Gran parte del carbono en el ecosistema se almacena en la madera de árboles maduros aproximadamente un 90% del total, representando el 40% las selvas tropicales. Las selvas jóvenes de crecimiento rápido tienen menos carbono almacenado por unidad de superficie que las selvas maduras de crecimiento lento, es por ello por lo que la tala de selvas maduras en su mayoría significará una pérdida neta de carbono (Granados y Corner, 2001).

2.1.6. Fijación de CO_2

El dióxido de carbono (CO_2) es uno de los gases que más contribuye al efecto invernadero. Por ello, es fundamental entender su comportamiento en la superficie terrestre y su función en la atmósfera. Además, se indica que el ciclo del carbono se compone de cuatro depósitos interrelacionados: la atmósfera, la biosfera terrestre (que incluye los sistemas de agua dulce), los océanos y los sedimentos (incluidos los sedimentos fósiles). Estos depósitos actúan como fuentes que liberan carbono o almacenan el carbono capturado de otras partes del ciclo (Ciesla, 1996).

Los principales mecanismos de intercambio de carbono incluyen la fotosíntesis, la respiración y la oxidación. En términos generales, las plantas verdes capturan el CO_2 de la atmósfera y lo convierten en compuestos esenciales para su crecimiento y desarrollo

mediante la fotosíntesis. El carbono se acumula en las hojas, tallos, raíces y, sobre todo, en el tejido leñoso de los troncos y ramas de los árboles. Por esta razón, los bosques son considerados reguladores clave del nivel de carbono en la atmósfera (Páiz *et al.*, 2002).

En los pasados treinta años, la temperatura promedio de la atmósfera del planeta ha aumentado en 0,5 °C, un fenómeno asociado al "efecto invernadero". Este se debe al incremento de compuestos gaseosos como el carbono en forma de dióxido (CO₂), el metano, el óxido nitroso y clorofluorocarbonos, los cuales atrapan el calor por la superficie del planeta. Desde mediados del siglo XX, las emisiones de estos gases han aumentado debido principalmente a la combustión de fuentes fósiles de energía, al empleo de clorofluorocarbonos, a las prácticas agrícolas y la tala de bosques (Brack y Mendiola, 2000).

2.1.7. Valor económico del CO₂

La estimación económica del medio ambiente busca otorgar un valor monetario a los bienes y servicios ambientales que no se transan en los mercados y, por lo tanto, no poseen un precio definido. Este proceso expresa las preferencias de la sociedad por los beneficios que brinda la naturaleza, aunque no representa el valor absoluto de los recursos biológicos (Figueroa, 2005).

Carranza *et al.* (1996) señalan que el valor económico total de un bosque tropical se compone de valores que se establecen a través del mercado (normalmente percibidos por el propietario o el usuario) y de una variedad de valores relacionados con los servicios ambientales que ofrecen los bosques. Estos últimos, al no poder ser comercializados ni valorados en el mercado, son disfrutados gratuitamente por diversos beneficiarios a nivel local, nacional e internacional.

Asignar un valor monetario a los servicios ambientales permite establecer incentivos y penalizaciones relacionadas con la conservación del medio ambiente. Esta práctica se fundamenta en el principio de "quien contamina, paga", que puede interpretarse también como "quien se beneficia, debe contribuir". En este contexto, varios países han comenzado a implementar mecanismos de "pagos por servicios ambientales", con el objetivo de asegurar la sostenibilidad de estos servicios a lo largo del tiempo (Herrador, 1999).

2.1.8. Ecuaciones alométricas

Para estimar la biomasa aérea de las especies, el uso de ecuaciones alométricas, también conocido como método indirecto, resulta invaluable. No obstante, se

enfrenta a la limitación de disponer de pocas ecuaciones específicas para cada especie debido a diversas complejidades logísticas, operativas y de costos. A pesar de esto, se cuentan con varias ecuaciones genéricas que son aplicables a un determinado ecosistema, lo que proporciona una alternativa viable en la estimación de la biomasa (Aristizábal, 2011).

De acuerdo con Salinas y Hernández (2008), un modelo alométrico es una fórmula matemática que vincula distintas propiedades del árbol, como el diámetro a la altura del pecho, la altura total, el diámetro de copa y la densidad de la madera. Su propósito es evaluar la existencia de una relación entre estas variables y cómo la biomasa depende de las características del árbol. Mientras que ciertos modelos alométricos utilizan únicamente algunas variables, otros requieren una combinación de estas para una aplicación más precisa.

2.1.9. Análisis de regresión Lineal

La regresión lineal es un método estadístico empleado para analizar y representar las relaciones entre distintas variables. Su uso es amplio y se aplica en diversas disciplinas, tales como la ingeniería, las ciencias exactas, la economía, la gestión, las ciencias de la vida y las ciencias sociales. Por otro lado, esta técnica es una de las más empleadas tanto en la investigación como en el ámbito profesional (Montgomery *et al.*, 2006).

Según Chatterjee y Hadi (1977), este método analítico facilita una manera sencilla de definir una relación entre las variables. Estas relaciones se representan a través de una ecuación que involucra una variable dependiente (y) junto con una o más variables explicativas ($x_1, x_2 \dots x_n$), expresándose del siguiente modo:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + e$$

Donde b_0 representa el intercepto o constante del modelo y b_1 corresponde a la estimación de la pendiente en x_1 . El intercepto b_0 indica el valor promedio de "y" cuando "x" es cero, mientras que b_1 cuantifica el cambio en el valor promedio de "y" como consecuencia de una variación unitaria en x_1 . Finalmente, "e" se refiere al residuo del modelo.

2.1.10. Coeficiente de determinación de R^2

Este valor es fundamental en el estudio de regresión, ya que mide el grado de variabilidad en la variable dependiente "y" que puede ser justificado por la variable independiente "x". Indica el nivel de ajuste del modelo, al reflejar qué tan bien se capturan las relaciones entre las variables. Su cálculo es sencillo y su interpretación clara, lo que lo convierte

en una de las métricas más empleadas y referenciadas en el estudio de regresión (Hanke y Wichern, 2010).

Según Vélez (2003), el coeficiente de determinación (R^2) oscila entre 0 y 1. Un valor de R^2 igual a 1 representa un ajuste perfecto, donde todas las observaciones coinciden con la línea de regresión, lo que implica que el modelo describe por completo la variabilidad de la variable dependiente. Por el contrario, un R^2 próximo a 0 indica un ajuste deficiente, evidenciando que el modelo apenas logra explicar la variabilidad en los datos.

Acuña (2004) afirma que un R^2 superior a 0,75 se considera aceptable. No obstante, en ocasiones, debido a la naturaleza de los datos, es necesario establecer un umbral más alto, como un R^2 mayor a 0,90. Por su parte, Alvarado y Obagi (2008) sugieren que un R^2 superior a 0,64 es necesario para considerar aceptable la relación entre las distintas variables.

2.1.11. Prueba exacta de Fisher (F)

Según Vélez (2003), el estadístico F permite comparar la variabilidad que el modelo logra explicar con aquella que se debe al error. De manera similar, Da Cunha y Guimaraes (2009) señalan que un valor de F más alto indica que el modelo explica una mayor proporción de la variabilidad en los datos y que la influencia del error es menor, lo que sugiere un buen ajuste del modelo.

2.1.12. Prueba estadística T-Student (t)

Vélez (2003) señala que es fundamental establecer si los coeficientes presentan diferencias significativas con respecto a cero. Esta prueba evalúa la siguiente proposición:

$H_0: \beta_1 = 0$. El coeficiente no muestra diferencias significativas con cero.

$H_1: \beta_1 \neq 0$. El coeficiente es significativamente distinto de cero.

Si el valor de t calculado es mayor o igual al valor tabular, se invalida la hipótesis nula (H_0H_0); de lo contrario, se acepta.

Es esencial analizar el "p-valor" de este estadístico, ya que representa la posibilidad de que el resultado obtenido para t se dé de manera fortuita, bajo la hipótesis de que al menos uno de los coeficientes sea equivalente a cero. Un p-valor bajo indica que es poco probable que el coeficiente sea cero, sugiriendo que el efecto observado es significativo. Por el

contrario, un p-valor alto sugiere que no existe evidencia suficiente para descartar la hipótesis nula de que el coeficiente es cero (Vélez, 2003).

2.1.13. Análisis de regresión ponderada

Cunia (1964) sostiene que la premisa de homogeneidad de variaciones es clave en el cálculo del volumen o la cantidad de biomasa en los árboles. Sin embargo, como se ha señalado anteriormente, esta condición no siempre se cumple. Para corregir esta falta de homogeneidad, es preciso modificar las variables utilizando logaritmos o aplicar un ajuste mediante regresión ponderada, basado en la técnica de mínimos cuadrados ponderados.

Según Escobar (2018), la distribución de los factores de ponderación ($1/k$) depende de las variables explicativas de cada ecuación específica, tomándolas como referencia. En otras palabras, si una ecuación incluye un par de variables explicativas, estas se emplean como coeficientes de ponderación, incorporando también sus versiones elevadas a distintos exponentes.

2.1.14. Selección de la ecuación con el índice Furnival

El Índice de Furnival facilita la comparación entre ecuaciones al reflejar tanto la magnitud de los residuos como las violaciones de los supuestos fundamentales del método de mínimos cuadrados, tales como proporcionalidad, distribución normal y constancia de varianza. Este índice ofrece una evaluación integral del ajuste del modelo, proporcionando una medida útil para identificar la ecuación que mejor cumple con estos criterios (Furnival, 1961).

Barrena *et al.* (1986) señalan que el Índice de Furnival se emplea para analizar ecuaciones en la estimación de volúmenes y biomasa, incluso considerando distintas variables dependientes. Dicho indicador mide la precisión del ajuste del modelo al considerar la magnitud de los residuos y el cumplimiento de los supuestos. La ecuación con el valor más bajo del Índice de Furnival es la más adecuada, ya que indica un ajuste más preciso y confiable para estimar el volumen y/o biomasa.

2.1.15. Análisis de residuos

Escobar (2018) señala que los residuos representan una estimación de las perturbaciones aleatorias en cada observación. Por otro lado, Montgomery *et al.* (2006) recomienda que los residuos se grafiquen en relación con los valores estimados de volumen y/o

biomasa, en lugar de los valores reales. Esto se debe a que los residuos no presentan evaluación con las estimaciones, pero sí pueden estar relacionados con los valores reales.

2.1.16. Tecnología Field Map

2.1.16.1. Características generales y descripción del sistema

El Centro de Investigación de Ecosistemas Forestales, Ltd. (IFER) de la República Checa es un referente en la investigación forestal y sus diversas aplicaciones. Sus proyectos, tanto en regiones boreales como tropicales, abarcan un amplio espectro de actividades. Además de su destacada labor investigativa y consultora, el IFER desarrolla y ofrece una gama de productos propios, especialmente programas informáticos diseñados para mejorar la recopilación de información en el terreno, el procesamiento posterior, la cartografía, la simulación del crecimiento forestal, la evaluación de captura de CO₂ y las evaluaciones estadísticas de censos forestales nacionales, entre otros (IFER, 2009).

2.1.16.2. Medición de altura de los árboles

Field-Map se ha desarrollado específicamente para aplicaciones forestales, con un conjunto de funciones especializadas para la medición de árboles. Este software ofrece cinco modos distintos para la medición de alturas (figura 1):

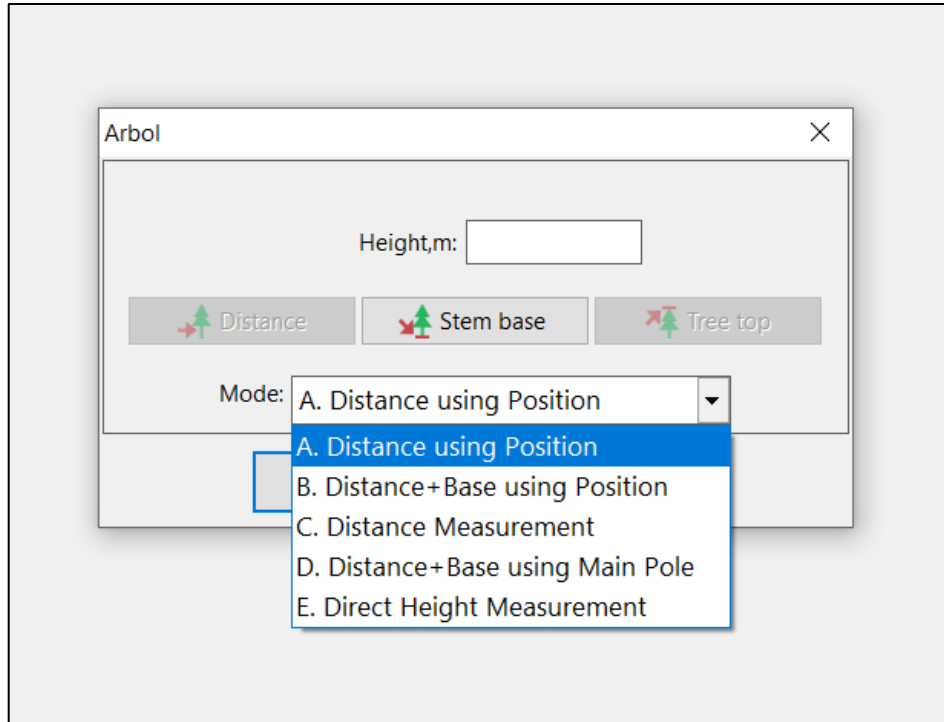
A. Medición de distancia usando la posición: Calcula la distancia al árbol utilizando la posición conocida del equipo y la posición del árbol.

B. Medición de distancia + base usando la posición: Similar al modo anterior, pero además calcula la inclinación a la base del fuste utilizando las coordenadas Z conocidas de la posición del árbol y del equipo.

C. Medición de distancias: Toma medidas de distancias y todas las inclinaciones relevantes.

D. Medición de distancia + base usando el jalón principal: Funciona como el modo C, pero la distancia y la inclinación a la base del árbol se miden utilizando un bastón de medición equipado con un reflector.

E. Medición directa de altura: Utiliza el asistente de medición LTI Forest PRO para una medición precisa. Este modo es similar al modo 3 pero ofrece una metodología específica.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Modos de medición de altura.

2.1.17. *Simarouba amara* Aubl.

2.1.17.1. Aspectos taxonómicos (Cronquist, 1984)

Reyno	: Vegetal
División	: Magnoliophyta
Clase	: Magnoliopsida
Familia	: Simaroubaceae
Género	: Simarouba
Nombre científico	: <i>Simarouba amara</i> Aubl.
Nombre común	: Hualaja, marupa

2.1.17.2. Distribución

S. amara se encuentra en distintos países, entre ellos Cuba, Trinidad y Tobago, Panamá, Brasil, Paraguay, Venezuela y Perú. En la región amazónica, su distribución se da mayormente en zonas con altitudes menores a 700 metros sobre el nivel del mar, en las cuales predominan terrenos bien drenados, con alto contenido de materia orgánica y de relieve suave. En el caso de Perú, esta especie está presente principalmente en las regiones de Loreto y Ucayali, dentro de ecosistemas de selva húmeda tropical y bosque seco tropical. Su

crecimiento óptimo ocurre en áreas con lluvias anuales que varían entre 1000 y 4000 mm, y una media térmica de 26°C (Angulo, 2015).

2.1.17.3. Descripción botánica

Los árboles de *S. amara* pueden llegar a medir hasta 30 metros de altura y tener un diámetro de hasta 80 centímetros. Presentan un tronco recto y generalmente cilíndrico, con una copa en forma de globo. La corteza externa varía del gris al pardo claro, mientras que la corteza interna es arenosa y suave, con un sabor extremadamente amargo. Las hojas son alternas y paripinnadas, con folíolos lanceolados y opuestos que tienen un aspecto brillante. Las flores hermafroditas se agrupan en racimos, y los frutos consisten en una o varias drupas de color pardo oscuro a negro cuando maduran, cada una de ellas conteniendo una sola semilla (Flores, 2002).

2.2. Estado del arte

2.2.1. A nivel internacional

Jiménez et al. (2020) calcularon la cantidad de carbono retenido en una plantación de *Tectona grandis* de 11 años en México. Para este estudio, se utilizó un método no destructivo, el cual se basó en la medición de la altura total y el diámetro a la altura del pecho de 128 árboles seleccionados, la plantación consta de 1 666 árboles. Los resultados obtenidos mostraron una biomasa aérea total de 140,37t/ha y una retención de carbono de 77,20tC/ha.

2.2.2. A nivel nacional

Guzmán (2023) llevó a cabo una investigación para estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de *Simarouba amara* de 27 años y *Cedrelinga cateniformis* de 15 años en Iquitos, Perú. Para este estudio, se utilizó el método no destructivo y realizó un inventario al 100% que consistió en registrar datos sobre la altura total y el diámetro a la altura del pecho de un total de 76 árboles de *S. amara* y 41 árboles de *C. cateniformis*. Los resultados obtenidos revelaron que la biomasa aérea de *S. amara* alcanzó un valor de 424,04t/ha, mientras que para *C. cateniformis* se registró 235,61t/ha. En términos de carbono almacenado, se estimaron 212,02tC/ha para *S. amara* y 117,81tC/ha para *C. cateniformis*.

Vidal (2023) llevó a cabo un análisis económico del secuestro de CO₂ en cultivos de *Eucalyptus globulus* de 20 años en Huánuco, Perú. En dicha investigación, se empleó un enfoque indirecto que consistió en registrar datos del diámetro a la altura del pecho y la altura

total de 150 árboles, la plantación consta de 300 árboles. Los hallazgos indicaron un valor de 685,47tCO₂/ha y una estimación económica del CO₂ de 4 914,83\$/tCO₂/ha.

Araujo (2014) ejecutó una investigación con el objetivo de determinar el secuestro y la valoración del CO₂ en *Simarouba amara* de 27 años en Iquitos, Perú. Para ello, se utilizó una metodología basada en el método indirecto, que consistió en la recopilación de datos sobre el diámetro a la altura del pecho y la altura total de los 76 árboles. Los resultados obtenidos indicaron una biomasa aérea total de 344,49t/ha, un contenido de carbono total de 124,02tC/ha y un secuestro de CO₂ de 457,72tCO₂/ha. Además, la valoración económica del CO₂ se estimó en 2 791,98\$/tCO₂/ha.

Del Águila (2014) llevó a cabo una investigación para estimar el secuestro de CO₂ y el almacenamiento de carbono en una plantación de *Cedrelinga cateniformis* de 27 años en Iquitos, Perú. Utilizando un método no destructivo y realizando un inventario al 100%, recopiló datos sobre el diámetro a la altura del pecho y la altura total de 9 árboles. Los resultados obtenidos mostraron que la biomasa aérea total alcanzó un valor de 56,93t/ha, mientras que el almacenamiento de carbono se estimó en 35,30tC/ha y el secuestro de CO₂ fue 77,65tCO₂/ha.

Pérez (2014) desarrolló una investigación para cuantificar el almacenamiento de carbono en un sistema agroforestal de *Simarouba amara* de 2 años en Moyobamba, Perú. Para ello empleó el método indirecto, que se basó en la recolección de datos sobre el diámetro a la altura del pecho de 20 árboles seleccionados. Al concluir el estudio, se determinó que el almacenamiento de carbono alcanzaba un valor de 6,14tC/ha.

Ruiz (2014) realizó una valoración económica del secuestro de CO₂ en plantaciones de *Simarouba amara* y *Parkia igneiflora*, ambas de 27 años, en Iquitos, Perú. Para este estudio utilizó el método no destructivo, que consistió en registrar las mediciones del diámetro a la altura del pecho y la altura de una muestra de 112 árboles de *S. amara* y 45 árboles de *P. igneiflora* las plantaciones tuvieron en total 329 y 180 árboles por hectárea, respectivamente. Como resultado se estimó que el secuestro de CO₂ para *S. amara* alcanzó un valor de 337,21tCO₂/ha, mientras que para *P. igneiflora* fue 250,49tCO₂/ha. En términos de valoración económica del CO₂, se calculó que *S. amara* tenía un valor de 1 180,23\$/tCO₂/ha, en comparación con 876,71\$/tCO₂/ha para *P. igneiflora*.

Ucañay (2014) desarrolló una investigación con el objetivo de valorar económicamente el secuestro de CO₂ en una plantación de *Parkia sp.* de 27 años en Iquitos,

Perú. Para ello, utilizó un método indirecto que se centró en el registro de datos sobre el diámetro a la altura del pecho y la altura comercial de 46 árboles. Los resultados revelaron un secuestro de CO₂ de 265,19tCO₂/ha, así como una valoración económica del CO₂ que alcanzó los 1 421,41\$/tCO₂/ha.

Guerra (2013) llevó a cabo una investigación para determinar el stock de carbono y el secuestro de CO₂ en una plantación de *Simarouba amara* de 17 años en Iquitos, Perú. Para este análisis, utilizó un método no destructivo, recopilando datos sobre el diámetro a la altura del pecho y la altura total de 8 árboles. Se obtuvo como resultado una biomasa aérea total de 58,31t/ha, un contenido de carbono total de 36,15tC/ha y un secuestro de CO₂ estimado en 132,54tCO₂/ha.

Saldaña (2010) llevó a cabo un estudio en Loreto, Perú, con el objetivo de estimar la biomasa aérea de *Simarouba amara* de 35 años. Para ello, empleó un método destructivo, donde talaron 21 árboles para determinar la biomasa. Los resultados mostraron que la biomasa aérea total alcanzó un valor significativo de 242,89t/ha.

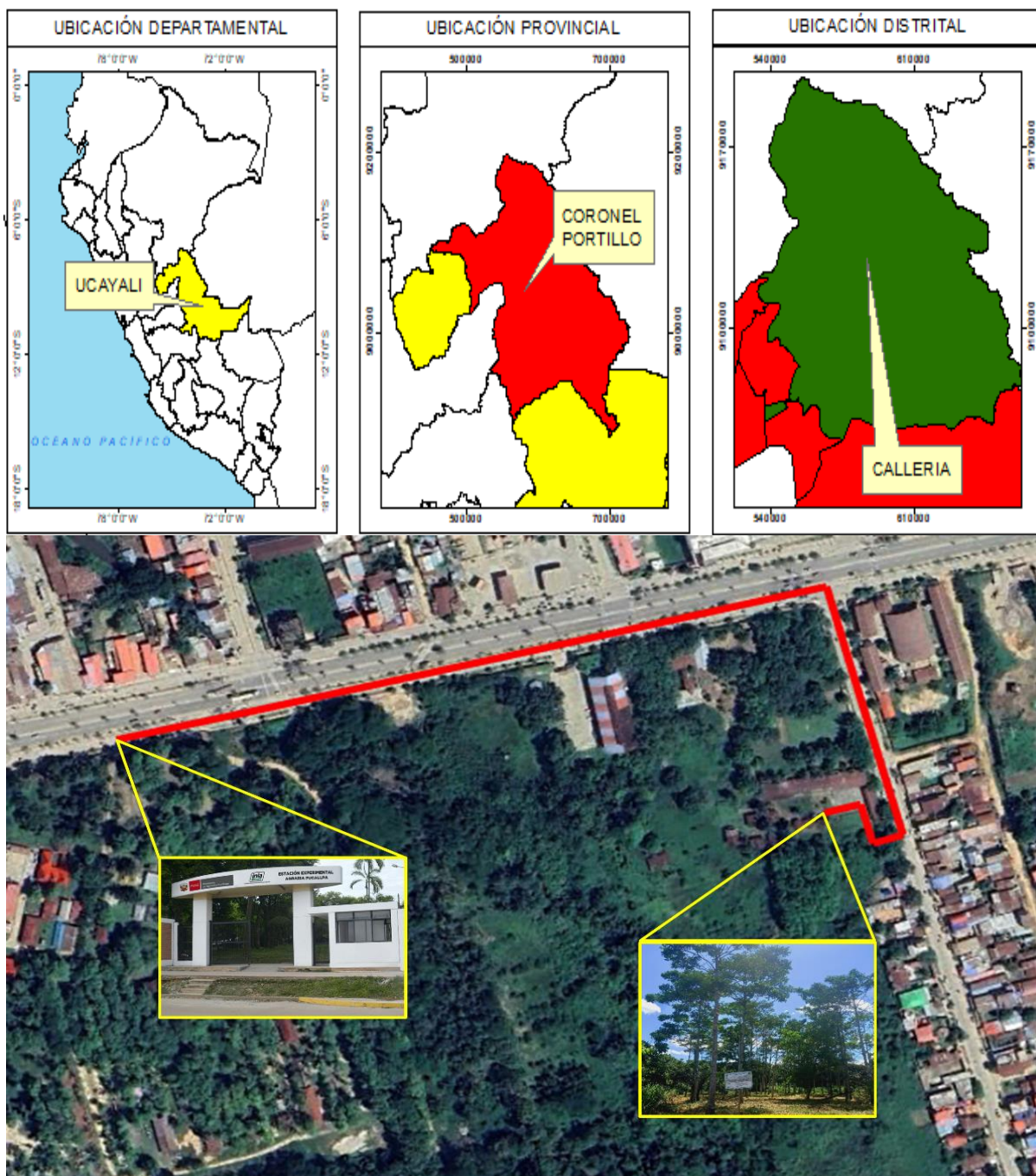
2.2.3. A nivel local

Anaya (2010) estimó la cantidad de biomasa aérea y carbono almacenado en una plantación de *Guazuma crinita* Martius de 5 años en Tingo María, Perú. Para llevar a cabo el estudio, se empleó un método indirecto que implicó la medición del diámetro a la altura del pecho de 24 árboles por hectárea, la plantación consta de 833 árboles. Se obtuvo como resultado los siguientes valores, 212,48t/ha de biomasa aérea y 95,62tC/ha de carbono almacenado.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La investigación se realizó en una plantación de *S. amara* en el Centro Experimental Los Magos del Instituto Nacional de Investigación Agraria (INIA) - Pucallpa en el km 4 de la carretera Federico Basadre (Figura 2).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Ubicación de la plantación de *S. amara*.

3.1.1. Ubicación política

La plantación de *S. amara* se encuentra ubicada políticamente en la ciudad de Pucallpa, distrito de Callería, provincia de Coronel Portillo, región de Ucayali.

3.1.2. Ubicación geográfica

La zona de estudio está geográficamente situada en las siguientes coordenadas, que corresponden al centroide de la plantación. Las coordenadas específicas de esta ubicación son las siguientes:

Tabla 1. Ubicación geográfica de la zona en estudio

Plantación (Especie)	Coordenadas (Centroide de la Plantación)		Altitud (m.s.n.m.)
	Este	Norte	
<i>Simarouba amara</i> Aubl	548928	9072753	152

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Zona de vida

Holdridge (1978) establece que, en su diagrama de clasificación de zonas de vida, el área de influencia se caracteriza por la presencia de formaciones vegetales correspondientes al Bosque húmedo Premontano Tropical (bh-PT). Este enfoque proporciona un marco teórico valioso para comprender la distribución y las características ecológicas de los diferentes tipos de vegetación en función de factores climáticos y altitudinales.

3.1.4. Clima

El clima de la región es cálido y húmedo, con una temperatura media anual de 28°C y una precipitación promedio de 1 700mm. Se presentan períodos claramente definidos de baja y alta precipitación, lo que influye en el crecimiento de la vegetación y la dinámica ecológica local (SENAMHI, 2020).

3.1.5. Datos de la plantación

La plantación de *S. amara* tiene 15 años y fue establecida en el año 2009 utilizando el método de cuadrado, con un distanciamiento de 3 x 3 metros en un área total de 0,25ha. El sistema de plantación es experimental de pequeña escala ya que cuenta con un total

de 78 árboles y exhibe interacciones significativas entre los componentes bióticos y abióticos del ecosistema, lo que resalta su importancia ecológica.

Además, a pocos metros de esta plantación se localizan otras áreas con diversas especies forestales como *Calycophyllum spruceanum*, *Guazuma crinita* y *Ormosia coccinea*. Este tipo de diversidad es fundamental para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos, como la polinización, el control de plagas y la mejora de la calidad del suelo.

3.2. Material y métodos

3.2.1. Material vegetativo

Una plantación de *Simarouba amara* Aubl de 15 años.

3.2.2. Materiales y equipos

Los materiales y equipos utilizados en esta investigación incluyeron los siguientes elementos: una forcípula electrónica (MASSER BT Caliper), una wincha de 5 metros, pintura en aerosol de color rojo, pilas AA, una batería CR123A, una cámara fotográfica y una laptop. Además, se empleó el equipo de Field Map, que consiste en un Trupulse 360R “laser range-finder”, un filtro de vegetación, un computador de campo (Getac T800), un bastón extensible con reflector, un trípode y un soporte para láser.

Para el análisis de datos, se utilizaron varios programas informáticos, incluyendo el software de diseño y procesamiento Field-Map Project Manager, el software de recolección de datos Field Map Data Collector, Microsoft Excel 2013, ArcMap 10.8 y RStudio versión 2024.09.1-394. Estos recursos tecnológicos fueron fundamentales para garantizar la precisión en la recolección y el análisis de datos, permitiendo una evaluación rigurosa de los resultados obtenidos en esta investigación.

3.2.3. Metodología

La metodología utilizada en esta investigación se estructuró en dos etapas principales: la fase de campo y la fase de gabinete. Cada una de estas etapas incluyó procedimientos específicos diseñados para cumplir con los objetivos planteados en el estudio, para ello se describe los siguientes procedimientos en el diagrama de flujo (Figura 3)

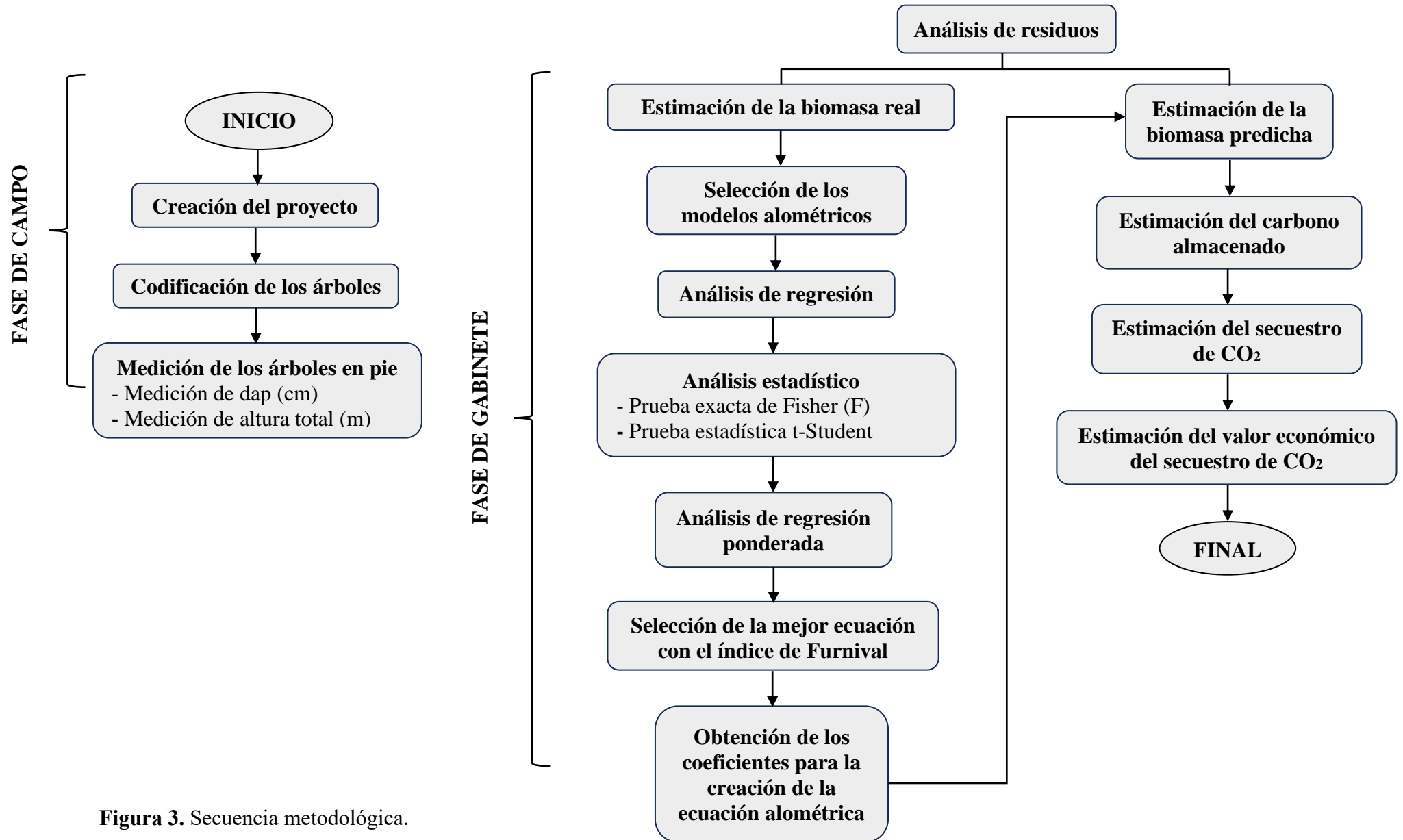


Figura 3. Secuencia metodológica.

3.2.3.1. Construcción de una ecuación alométrica para estimar la biomasa aérea total en la plantación de *S. amara*

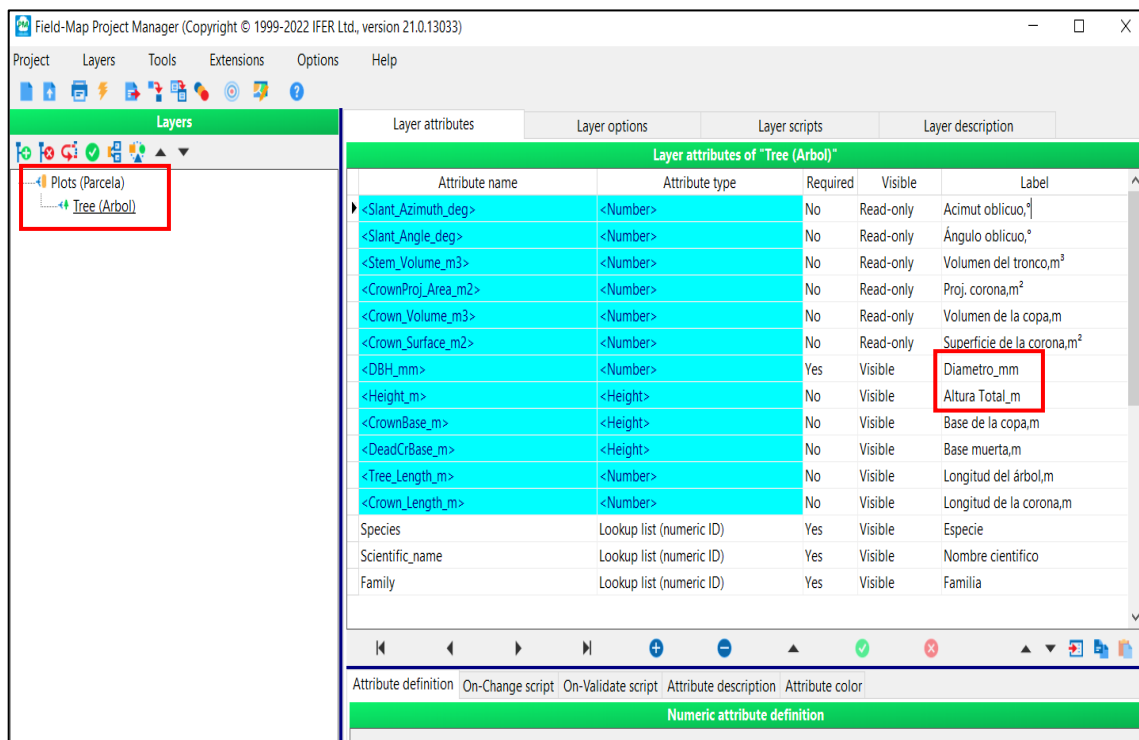
➤ Fase de campo

▪ Codificación de los árboles.

Se codificaron los árboles mediante una enumeración correlativa, utilizando pintura roja para identificarlos. Además, se aplicó pintura a una altura de 1,30 m desde la base de cada árbol con el fin de facilitar la medición del diámetro.

▪ Creación del proyecto en Field Map Project Manager.

Para la creación del proyecto, se utilizó la tecnología Field Map Project Manager con el objetivo de diseñar la base de datos y asignar los atributos alfanuméricos correspondientes. Se abrió un nuevo proyecto en la plataforma, donde se creó la capa "Tree" (árbol) junto con las variables fundamentales para este trabajo, que incluyeron el diámetro y la altura total. Además, se incorporaron datos adicionales como el nombre científico, la especie y la familia de los árboles (Figura 4).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Diseño del Proyecto en el Software Field – Map Project Manager.

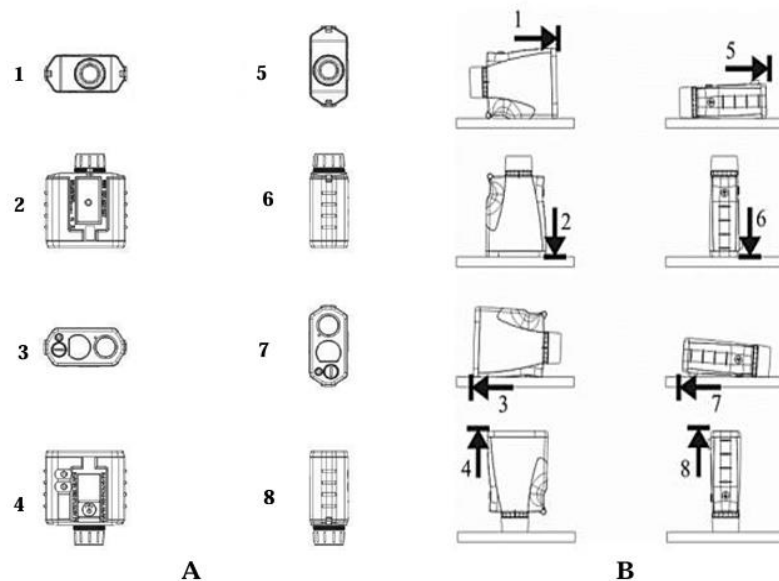
▪ Verificación y calibración del equipo Fiel Map.

Antes del ingreso al área de estudio se verificó que la batería del Getac esté completamente cargada. Para comenzar con la recolección de los datos, se verificó que los dispositivos de medición estuvieran correctamente ajustados en el trípode junto con el Trupulse 360R. Posteriormente, se comprobó la sincronización del Bluetooth entre la computadora de campo Getac, el Trupulse 360R y la forcípula electrónica.

Finalmente, se procedió a calibrar el Trupulse 360R (Figura 5), esto se realizó para asegurar la precisión de las mediciones de distancia, ángulo vertical y rumbo, corrigiendo posibles desviaciones causadas por interferencias magnéticas o cambios en las condiciones del entorno.

Pasos de calibración A: Angulo horizontal; B: Sensor de inclinación

Trupulse360R hacia el norte y el botón de encendido hacia arriba. Trupulse360R mirando hacia el norte y el botón de disparo hacia la derecha. Si se observa "PASS" en el visor, la calibración fue correcta; en caso de salir "FAIL" se debe volver a realizar el proceso de calibración.



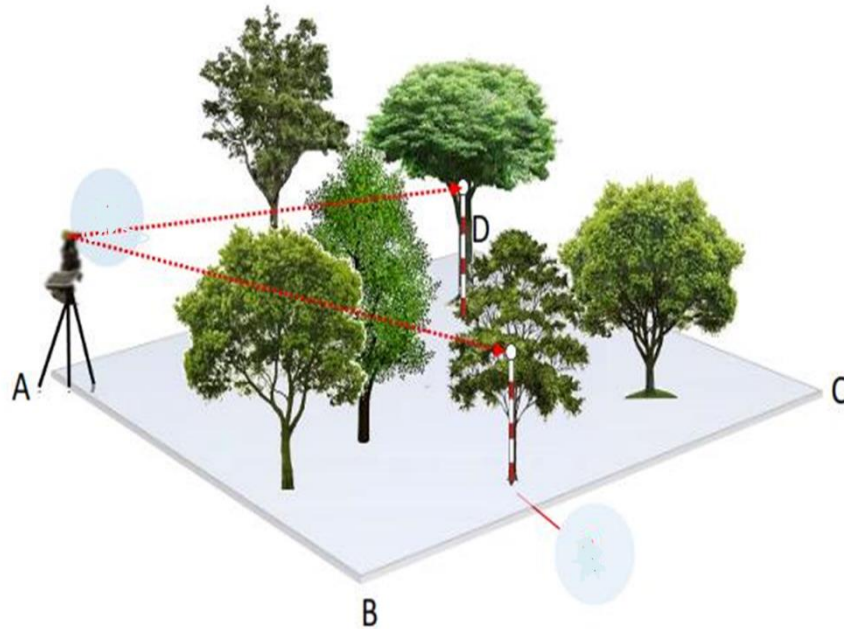
Fuente: Lasertech, 2005.

Figura 5. Calibración del Trupulse 360R

▪ Localización espacial de los árboles.

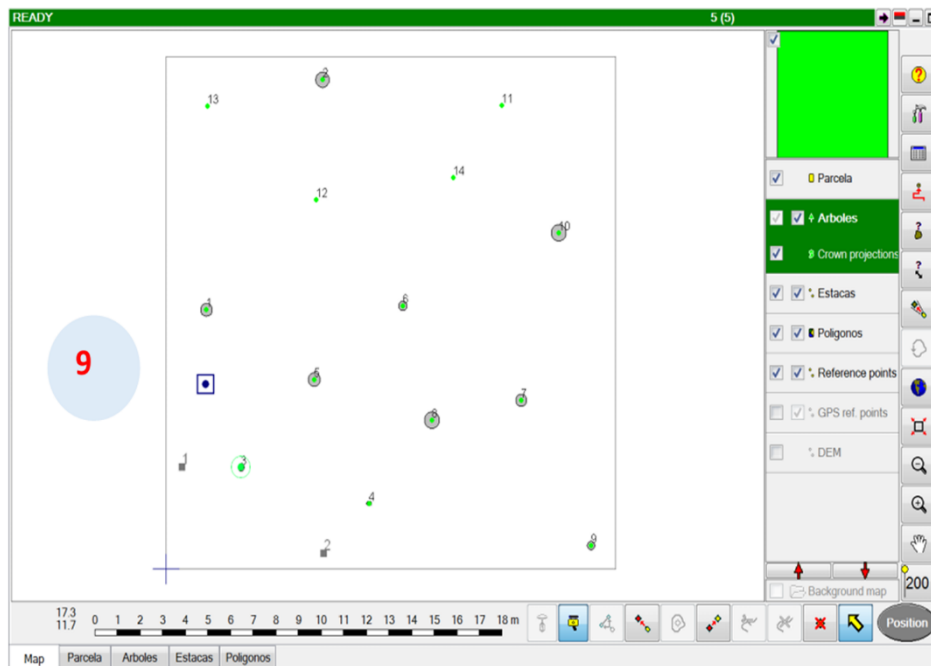
Para la localización espacial de los árboles, se utilizó Field Map Data Collector y se aplicó un método topográfico de radiación. Este método consistió en establecer la posición de los puntos a partir de un punto de referencia en el que se estacionó el equipo. La posición del árbol dentro de la plantación fue digitalizada usando un láser rangefinder + inclinómetro electrónico + brújula electrónica (RIC) y un reflector que se colocó

sobre la superficie del fuste del árbol. (Figura 6) A través de este procedimiento, se obtuvieron la distancia, las coordenadas y los ángulos verticales (x, y, z) para cada árbol, y se visualizó el árbol localizado en campo en el mapa de Field Map Data Collector (Figura 7)



Fuente: Manual básico de Field-Map.

Figura 6. Localización espacial de los árboles.



Fuente: Manual básico de Field-Map.

Figura 7. Visualización del árbol localizado en campo en tiempo real.

- **Variables dasométricas.**

Las variables dasométricas recolectadas con el equipo Field Map Data Collector fueron las siguientes:

- ✓ **Diámetro a la altura del pecho (dap):** Para cada árbol, se midieron dos diámetros a la altura del pecho (dap) empleando una forcípula electrónica de alta precisión. Las mediciones se realizaron a una altura estándar de 1,30 metros desde el nivel del suelo, tomando los diámetros en direcciones perpendiculares entre sí para capturar posibles irregularidades en la forma del tronco. El equipo promedió automáticamente ambos valores, generando un dato único y representativo del dap para cada individuo muestreado.

- ✓ **Altura total (h):** Se determinó utilizando el instrumento láser electrónico TruPulse 360R. Para este procedimiento, se empleó una tablet Getac, desde la cual se seleccionó el método de medición "D" del equipo. Este método consistió en realizar primero una medición dirigida al reflector ubicado delante del fuste y, posteriormente, una segunda medición orientada hacia la parte superior de la copa del árbol. De esta manera, el equipo calcula automáticamente la altura total mediante triangulación basada en distancia, ángulo de inclinación y rumbo.

- **Fase de gabinete**

- **Estimación de la biomasa real**

La biomasa aérea total para cada árbol se calculó con la fórmula propuesta por Higuchi y Carbalho (1994):

$$BAT = a * D^b * H^c \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

BAT = Biomasa aérea total (kg)

a = Constante de cálculo 0,026

D = Diámetro a la altura del pecho (cm)

b = Constante de cálculo 1,529

H = Altura total (m)

c = Constante de cálculo 1,747

▪ Selección de los modelos alométricos

Se seleccionaron modelos alométricos de diferentes estudios realizados (tabla 2), dando prioridad a aquellas que incluyen las mismas variables que se midieron en campo durante la toma de datos, específicamente el diámetro a la altura del pecho (dap) y la altura total (h). Esta selección se basó en la necesidad de garantizar una mayor precisión en las estimaciones, así como en la compatibilidad entre los datos empíricos recolectados y las variables requeridas por los modelos alométricos.

Tabla 2. Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea.

Número	Modelo para biomasa	Autores
1	$BAT = b_0 + b_1 * dap$	Suarez <i>et al.</i> (2004)
2	$BAT = b_0 + b_1 * dap^2 * h$	Monroy y Návar (2004)
3	$BAT = b_0 + b_1 * dap^2 * h^3$	Simbaña (2011)
4	$BAT = b_0 + b_1 * dap^2 * h^2$	Simbaña (2011)
5	$BAT = b_0 + b_1 * dap^3 * h^3$	Simbaña (2011)
6	$BAT = b_0 + b_1 * dap^3 * h$	Simbaña (2011)
7	$BAT = b_0 + b_1 * dap^3 * h^2$	Simbaña (2011)
8	$BAT = b_0 + b_1 * dap^2 + b_2 * h$	Montero y Montagnini (2005)
9	$BAT = b_0 + b_1 * dap * h + b_2 * h$	Ruiz (2007)
10	$BAT = b_0 + b_1 * dap * h + b_2 * dap^2 * h$	Ruiz (2007)
11	$BAT = b_0 + b_1 * dap + b_2 * dap^2$	Segura (1999)
12	$BAT = b_0 + b_1 * dap + b_2 * dap^2 * h$	Ruiz (2007)
13	$BAT = b_0 + b_1 * \ln(dap)$	Montero y Montagnini (2005)
14	$BAT = b_0 + b_1 * \ln(dap) + b_2 * [\ln(dap)]^2$	Douterlungne <i>et al.</i> (2013)
15	$BAT = b_0 + b_1 * [\ln(dap)]^2 + b_2 * \ln(h)$	Simbaña (2011)
16	$BAT = b_0 + b_1 * \ln(dap) + b_2 * \ln(h)$	Montero y Montagnini (2005)
17	$BAT = b_0 + b_1 * \ln(dap^2 * h) + b_2 * \ln(h)$	Simbaña (2011)
18	$BAT = b_0 + b_1 * \ln(dap^2 * h)$	Simbaña (2011)

BAT = Biomasa aérea total (kg); dap = diámetro a la altura del pecho (cm) h = Altura total (m); b₀, b₁ y b₂ = parámetros estimados

▪ Análisis de los modelos alométricos

Los modelos seleccionados fueron analizados mediante un procedimiento de regresión lineal utilizando el método de los mínimos cuadrados,

para lo cual se empleó el programa RStudio. Los resultados obtenidos se compararon y evaluaron tanto de manera individual como entre los distintos modelos. El criterio para aceptar o rechazar los modelos consistió en lo siguiente:

✓ **Análisis de regresión**

Durante esta fase, se estableció un límite mínimo para el coeficiente de determinación (R^2) que los modelos debían superar para ser considerados válidos. Se seleccionaron aquellos modelos cuyo valor de R^2 fue superior a 0,75, tal como lo recomienda Acuña (2004).

✓ **Prueba exacta de Fisher (F)**

Para este análisis, se empleó la evaluación estadística Fisher. Se consideraron las siguientes hipótesis:

$H_0: \beta_1 = 0$. No hay evidencia de una relación lineal entre X e Y

$H_1: \beta_1 \neq 0$. Se confirma una relación lineal de Y en función de X.

La decisión de descartar la hipótesis nula (H_0) y respaldar estadísticamente la asociación entre las variables se fundamentó en el "p-valor" del estadístico F. Siguiendo las recomendaciones de Rojo (2007), se calculó un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$), excluyendo aquellos modelos con un p-valor mayor a α (p-valor $> 0,05$).

✓ **Prueba estadística t – de Student (t)**

En este análisis, se adoptó la metodología propuesta por Romero (2016) para evaluar si los coeficientes calculados en los modelos eran significativamente distintos de cero. Por esta razón, se descartaron los modelos que no mostraron relevancia estadística al 95%, es decir, aquellos que presentaron un valor p mayor a 0,05 en al menos uno de sus coeficientes calculados .

✓ **Análisis de regresión ponderada**

Se calculó el coeficiente de determinación ajustado (R^2) con el fin de evaluar los modelos alométricos que cumplieran con los criterios establecidos para su selección. Aquellas fórmulas que mostraron un R^2 ajustado superior a 0,96 fueron seleccionadas para los siguientes análisis.

✓ Selección de la mejor ecuación

Se obtuvo el Índice de Furnival (IF) para cada una de las expresiones matemáticas estudiadas. El modelo con el menor valor de IF fue elegida como la más precisa para calcular la biomasa aérea de los individuos de *S. amara*. Además, se identificaron los coeficientes de la ecuación seleccionada con el propósito de formular una nueva ecuación específica para el cálculo de la biomasa aérea de esta especie.

✓ Análisis de residuos

Se calcularon las diferencias o errores residuales utilizando la expresión matemática propuesta por Montgomery (2004):

$$\text{Error residual} = \text{Valor observado} - \text{Valor predicho}$$

Este procedimiento se basó en graficar la biomasa predicha (eje y) frente a la biomasa real (eje x) para analizar su distribución y comprobar el supuesto de homocedasticidad.

3.2.3.2. Estimación del carbono almacenado en la plantación de *S. amara*

De acuerdo con Ruginitz, *et al.* (2009), para determinar el carbono a partir de la biomasa aérea, se emplea un coeficiente de conversión de 0,45, para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$\Delta C_{AT} = (B_T * C_F) \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

ΔC_{AT} : Carbono aéreo total, expresado en toneladas de carbono por hectárea (tC/ha)

B_T : Biomasa aérea total (t/ha)

C_F : Fracción de carbono (tC/t) $C_F = 0,45$

3.2.3.3. Estimación del secuestro de dióxido de carbono (CO₂) en la plantación de *S. amara*

De acuerdo con Gonzalo (2013), para estimar el dióxido de carbono (CO₂) se utilizó la siguiente fórmula:

$$CO_2 = C_{AT} * k \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

CO₂ : Dióxido de Carbono, expresado en toneladas de dióxido de carbono por hectárea (tCO₂/ha)

CAT : Carbono aéreo total (tC/ha)

k : $44/12 = 3,67$

3.2.3.4. Estimación del valor económico del secuestro de CO₂ de la plantación de *S. amara*

De acuerdo con Gonzalo (2013), para estimar el valor económico del secuestro de CO₂ se utilizó la siguiente fórmula:

$$VE = CO_2 * PM \text{ (actual)} \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

VE : Valor económico (US\$)

CO₂ : Dióxido de Carbono (t/ha).

PM : Precio en el mercado (\$)

Para el mes de enero del presente año el precio del CO₂ fue € 72,84 (Tabla 3) es decir \$ 75,10 por tonelada/hectárea/año.

Tabla 3. Precio del CO₂ por tonelada en el mercado.

Precios CO ₂	EUA
Último cierre (02-01-2025)	72,84 €
Media de las últimas 5 sesiones	70,34 €
Media de las últimas 30 sesiones	67,71 €
Media de los últimos 12 meses	65,25 €

Fuente: SendeCO2 (<https://www.sendeco2.com/es/>)

3.3. Criterios de la investigación

3.3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación fue aplicado, ya que se fundamentó en conocimientos prácticos obtenidos en estudios relacionados con métodos no destructivos,

utilizando modelos alométricos para calcular la biomasa aérea, con la finalidad de proporcionar resultados sobre una especie forestal que no ha sido estudiada, permitiendo que estos sirvan para futuras investigaciones.

3.3.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación fue de carácter descriptivo, pues se enfocó en identificar ciertas características relevantes que contribuyen al análisis del carbono almacenado en la biomasa aérea de una variedad forestal, empleando valores descriptivos.

3.3.3. Diseño de investigación

El diseño de la investigación fue no experimental, ya que no se realizó una alteración intencional de las variables analizadas. Este enfoque posibilita la observación y evaluación de las relaciones entre las variables en su entorno natural.

3.4. Variables en estudio

3.4.1. Variable independiente

- *Simarouba amara*
- Diámetro a la altura del pecho (dap)
- Altura total (HT)

3.4.2. Variable dependiente

- Biomasa aérea total en la plantación de *S. amara* (t/ha)
- Carbono almacenado en la plantación de *S. amara* (tC/ha)
- Secuestro dióxido de carbono (CO₂) en la plantación de *S. amara* (tCO₂/ha)
- Valor económico del secuestro de CO₂ de la plantación de *S. amara* (\$/tCO₂/ha)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Construcción de una ecuación alométrica para estimar biomasa aérea en la plantación de *S. amara*

Se llevó a cabo un análisis utilizando gráficos de dispersión para examinar la relación entre las variables independientes (dap y altura total) con la variable dependiente (biomasa aérea). Es importante señalar que, durante esta fase, no se identificaron valores atípicos (“outliers”) en los datos recolectados. La ausencia de outliers indicó una adecuada homogeneidad en las mediciones, lo que permitió mantener la totalidad de los individuos muestreados para los análisis estadísticos posteriores, asegurando así una mayor representatividad y robustez en los resultados obtenidos.

La Figura 8 muestra la relación entre el diámetro a la altura del pecho (dap) y la biomasa aérea (kg) de los individuos evaluados. Se observa una tendencia positiva, indicando que a mayor dap, mayor es la biomasa aérea estimada. El coeficiente de determinación (R^2) obtenido fue de 0,6002, lo que sugiere que aproximadamente el 60 % de la variabilidad en la biomasa aérea puede ser explicada por el dap. Asimismo, el coeficiente de correlación de Pearson (r) fue de 0,7747, evidenciando una correlación positiva moderada entre ambas variables.

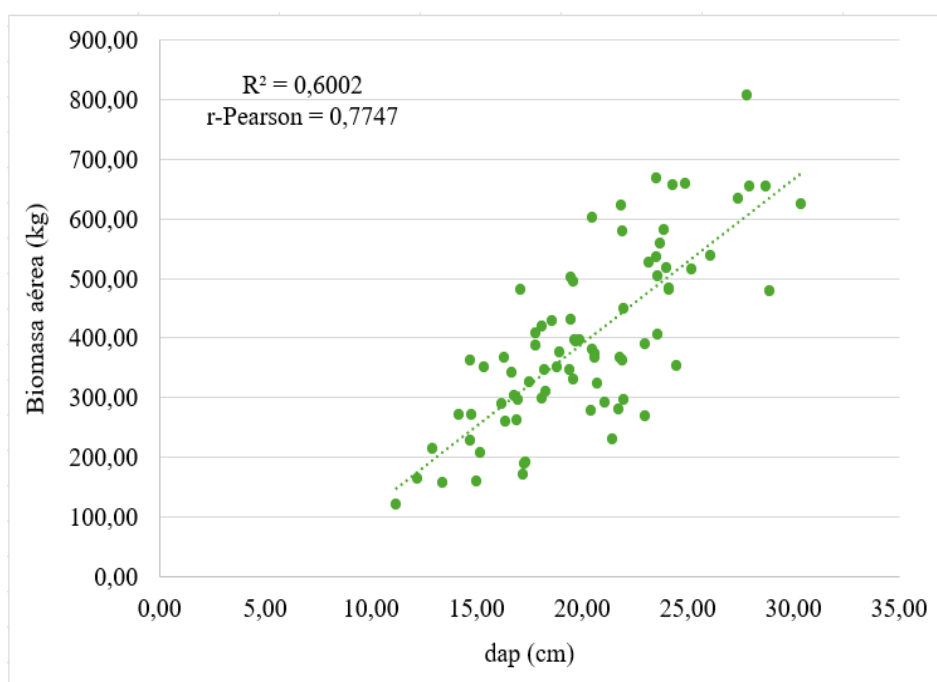


Figura 8. Relación entre la biomasa aérea total y el dap de *S. amara*.

Por otro lado, la Figura 9 muestra la relación entre la altura total (m) y la biomasa aérea (kg) de los árboles evaluados. Se observa una tendencia positiva, indicando que, en general, a mayor altura, mayor es la biomasa aérea. Sin embargo, el coeficiente de determinación (R^2) fue de 0,3188, lo que indica que solo el 31,88 % de la variabilidad en la biomasa aérea es explicada por la altura. El coeficiente de correlación de Pearson (r) fue de 0,5646, lo que señala una correlación positiva moderada. Esto sugiere que la altura no constituye una variable significativa para el cálculo de la biomasa aérea.

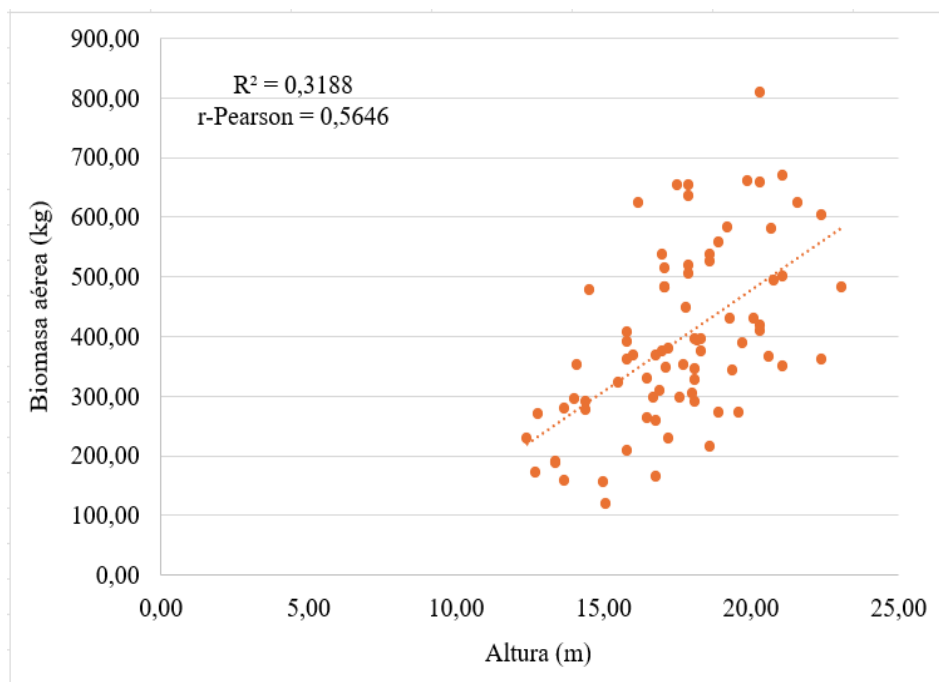


Figura 9. Relación entre la biomasa aérea total y la altura de *S. amara*.

4.1.1. Análisis de regresión

Todos los modelos analizados lograron un coeficiente de determinación considerado aceptable (Tabla 4); no obstante, no todos alcanzaron el valor mínimo establecido, que es superior 0,75 como lo recomienda Acuña (2004). Se observó que aquellos modelos que emplean únicamente el diámetro a la altura del pecho (dap) como variable independiente (Modelos 1, 11, 13 y 14) fueron descartados debido a sus valores de R^2 inferiores.

En contraste, todos los modelos que incorporan la variable de altura total (h) fueron aceptados. Esto refleja la importancia de utilizar múltiples variables independientes para obtener estimaciones más precisas y confiables de la biomasa aérea.

Tabla 4. Resultado del análisis de regresión (R^2).

N°	Modelos	b ₀	b ₁	b ₂	R ²	Calificación
1	BAT = b ₀ + b ₁ * dap	-163,4427	27,6742		0,6002	Rechazado
2	BAT = b ₀ + b ₁ * dap ² * h	-70,9346	-0,5078		0,9959	Aceptado
3	BAT = b ₀ + b ₁ * dap ² * h ³	48,5246	0,2599		0,9947	Aceptado
4	BAT = b ₀ + b ₁ * dap ² * h ²	17,7598	0,0655		0,9979	Aceptado
5	BAT = b ₀ + b ₁ * dap ³ * h ³	96,1870	0,0064		0,9797	Aceptado
6	BAT = b ₀ + b ₁ * dap ³ * h	-118,8272	-0,0190		0,9785	Aceptado
7	BAT = b ₀ + b ₁ * dap ³ * h ²	41,1469	0,0000		0,9817	Aceptado
8	BAT = b ₀ + b ₁ * dap ² + b ₂ * h	-550,3890	0,6929	37,0211	0,9678	Aceptado
9	BAT = b ₀ + b ₁ * dap * h + b ₂ * h	122,4518	-19,7262	-18,2848	0,9963	Aceptado
10	BAT = b ₀ + b ₁ * dap * h + b ₂ * dap ² * h	6,0496	-8,0692	-3,7450	0,9985	Aceptado
11	BAT = b ₀ + b ₁ * dap + b ₂ * dap ²	-140,3798	25,3459	0,0564	0,6003	Rechazado
12	BAT = b ₀ + b ₁ * dap + b ₂ * dap ² * h	-214,9655	14,3434	-0,8429	0,9984	Aceptado
13	BAT = b ₀ + b ₁ * ln(dap)	-1216,5460	540,1831		0,5883	Rechazado
14	BAT = b ₀ + b ₁ * ln(dap) + b ₂ * [ln(dap)] ²	1160,5850	-1078,1450	274,0295	0,5997	Rechazado
15	BAT = b ₀ + b ₁ * [ln(dap)] ² + b ₂ * ln(h)	-2221,9000	94,5470	619,7724	0,9532	Aceptado
16	BAT = b ₀ + b ₁ * ln(dap) + b ₂ * ln(h)	-3020,0140	554,3109	616,2877	0,9429	Aceptado
17	BAT = b ₀ + b ₁ * ln(dap ² * h) + b ₂ * ln(h)	-3020,0140	277,1555	339,1322	0,9429	Aceptado
18	BAT = b ₀ + b ₁ * ln(dap ² * h)	-2336,8600	309,5594		0,8447	Aceptado

BAT = Biomasa aérea total (kg); dap = diámetro a la altura del pecho (cm) h = altura total (m); b₀, b₁ y b₂ = parámetros estimados; coeficiente de determinación = R²

4.1.2. Prueba exacta de Fisher (F)

Todos los modelos fueron aceptados al cumplir con los criterios establecidos por la prueba exacta de Fisher (Tabla 5). Los resultados obtenidos se alinearon con lo propuesto por Rojo (2007), ya que presentaron valores inferiores a 0,05 (p-valor < 0,05) con un nivel de confianza del 95%.

Los resultados obtenidos proporcionan evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula (H_0) al nivel de significancia del 5 %, permitiendo así aceptar la hipótesis alternativa (H_1). Esto implica que existe una relación estadísticamente significativa entre la variable dependiente, biomasa aérea (kg), y las variables independientes evaluadas, específicamente el diámetro a la altura del pecho (dap) y la altura total (H). En consecuencia, se confirma que ambas variables predictoras contribuyen de manera significativa a explicar la variabilidad observada en la biomasa aérea de los individuos analizados.

Tabla 5. Resultados de la prueba exacta de Fisher (F).

Modelo	F	F-tabular	p-valor	Calificación
2	5933,4230	2,7283	4,67E-88	Aceptado
3	4622,6540	2,7283	4,59E-84	Aceptado
4	11863,1600	2,7283	3,71E-99	Aceptado
5	1189,2570	2,7283	1,70E-62	Aceptado
6	1119,9660	2,7283	1,49E-61	Aceptado
7	1326,9110	2,7283	3,19E-64	Aceptado
8	1127,0670	3,1186	1,11E-56	Aceptado
9	6657,8320	2,7283	6,69E-90	Aceptado
10	9453,8180	2,3418	6,13E-100	Aceptado
12	11378,8700	2,4971	3,44E-101	Aceptado
15	763,0514	3,1186	1,41E-50	Aceptado
16	619,2604	3,1186	2,36E-47	Aceptado
17	619,2604	3,1186	2,36E-47	Aceptado
18	413,2546	3,9668	1,84E-32	Aceptado

F = prueba exacta de Fisher

4.1.3. Prueba estadística t – student (t)

En esta fase, se aplicó un procedimiento similar al utilizado en la prueba exacta de Fisher (F), con el propósito de evaluar la significancia estadística de los coeficientes de los modelos alométricos. Se eliminaron aquellos modelos que no demostraron un nivel de significancia del 95 % ($p\text{-valor} > 0,05$) en al menos uno de sus parámetros estimados, tal como

se detalla en la Tabla 6. Bajo este criterio de depuración, fueron descartados los Modelos 7 y 10, cuyos coeficientes presentaron p-valores superiores al umbral establecido.

Esta depuración permitió reforzar la solidez de los modelos seleccionados, asegurando que cada variable incluida contribuyera de manera significativa a la explicación de la variabilidad observada en la biomasa aérea.

Tabla 6. Resultados de la prueba estadística t-student (t).

Modelo	t b ₁	t-tabular	p-valor	t b ₂	t-tabular	p-valor	Calificación
2	-9,4040	1,9925	2,88E-14				Aceptado
3	12,0814	1,9925	3,52E-19				Aceptado
4	3,3487	1,9925	0,0013				Aceptado
5	4,8526	1,9925	6,59E-06				Aceptado
6	-4,9102	1,9925	5,28E-06				Aceptado
7	-0,0215	1,9925	0,9829				Rechazado
8	38,8788	1,9921	1,87E-51	29,5731	1,9921	4,34E-43	Aceptado
9	-9,5427	1,9925	1,58E-14	-7,7488	1,9925	3,86E-11	Aceptado
10	-0,6979	1,9935	0,4875	-0,5500	1,9935	0,5840	Rechazado
12	10,7582	1,9930	1,03E-16	-18,3349	1,9930	4,86E-29	Aceptado
15	31,7358	1,9921	3,21E-45	23,9585	1,9921	6,99E-37	Aceptado
16	28,5094	1,9921	5,43E-42	21,5815	1,9921	6,63E-34	Aceptado
17	28,5094	1,9921	5,43E-42	11,3596	1,9921	5,75E-18	Aceptado
18	20,3287	1,9917	1,84E-32				Aceptado

4.1.4. Análisis de regresión ponderada

Los doce modelos alométricos evaluados mostraron coeficientes de determinación ajustados (R^2 ajustado) superiores a 0,84, lo que evidencia un buen nivel de ajuste general entre las variables predictoras y la biomasa aérea estimada (Tabla 7).

Sin embargo, con el fin de seleccionar el modelo óptimo, se estableció un criterio más estricto, priorizando aquellos modelos que presentaron un R^2 ajustado superior

a 0,95. Esta estrategia de selección buscó maximizar la capacidad explicativa de los modelos, minimizando el error asociado a las predicciones.

Tabla 7. Coeficiente de determinación para los modelos ponderados.

Modelo	R²	R² ajustado	Calificación
2	0,9959	0,9957	Aceptado
3	0,9947	0,9945	Aceptado
4	0,9979	0,9978	Aceptado
5	0,9797	0,9789	Aceptado
6	0,9785	0,9776	Aceptado
8	0,9678	0,9669	Aceptado
9	0,9963	0,9962	Aceptado
12	0,9984	0,9983	Aceptado
15	0,9532	0,5829	Rechazado
16	0,9429	0,9414	Rechazado
17	0,9429	0,9414	Rechazado
18	0,8447	0,8426	Rechazado

Coeficiente de determinación = R²

4.1.5. Selección de la mejor ecuación

La Tabla 8 presenta los resultados de la comparación de los modelos más destacados, utilizando el índice de Furnival (IF). El uso del IF permitió comparar la eficiencia de los modelos de manera más precisa, considerando tanto la variabilidad residual como la transformación de datos, lo que garantizó la elección del modelo más adecuado para una estimación confiable y precisa de la biomasa aérea.

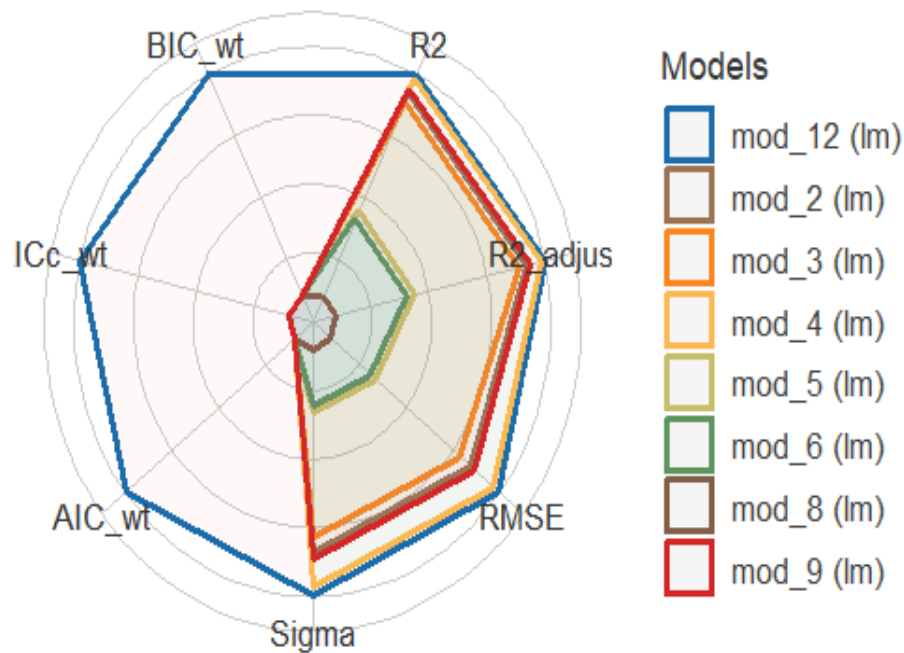
El modelo que presentó el menor valor del índice de Furnival (IF) fue el modelo 12, con un valor de 0,0872. Este indicador, al considerar tanto la variabilidad residual como la forma funcional de la ecuación, permite evaluar de manera más precisa la eficiencia de los modelos alométricos utilizados. Un menor valor del IF sugiere un mejor ajuste y una mayor precisión en las estimaciones. Por lo tanto, se concluye que el modelo 12 ofrece el mejor desempeño entre los modelos evaluados, siendo el más adecuado para la estimación de la biomasa aérea de *S. amara* en las condiciones ecológicas del presente estudio

Tabla 8. Índice de Furnival para la selección de la mejor ecuación.

N°	Modelos	IF
12	$BAT = b_0 + b_1 * dap + b_2 * dap^2 * h$	0,0872
4	$BAT = b_0 + b_1 * dap^2 * h^2$	0,1130
9	$BAT = b_0 + b_1 * dap * h + b_2 * h$	0,2011
2	$BAT = b_0 + b_1 * dap^2 * h$	0,2255
3	$BAT = b_0 + b_1 * dap^2 * h^3$	0,2891
5	$BAT = b_0 + b_1 * dap^3 * h^3$	1,1069
6	$BAT = b_0 + b_1 * dap^3 * h$	1,1739
8	$BAT = b_0 + b_1 * dap^2 + b_2 * h$	1,7542

BAT = Biomasa aérea total (kg); dap = diámetro a la altura del pecho (cm) h = altura total (m); b_0 , b_1 y b_2 = parámetros estimados; IF = Índice de Furnival

Asimismo, la Figura 10 ilustra mediante un gráfico, que la ecuación 12 presenta un ajuste superior en comparación con los demás modelos analizados. Este hallazgo sugiere que el modelo 12 es el más adecuado para representar la relación entre las variables estudiadas.



BIC_wt = Peso del criterio de información Bayesiano; ICc_wt = peso del AIC corregido; AIC_wt = Peso del criterio de información Akaike; Sigma = desviación estándar de los residuos; RMSE = Error cuadrático medio; R2_Adjus = coeficiente de determinación ajustado; R2 = coeficiente de determinación

Figura 10. Comparación de los modelos

4.1.6. Obtención de los coeficientes para la creación de la ecuación alométrica

El Modelo 12 se destacó como el que presentó el mejor ajuste entre todos los modelos analizados, de acuerdo con los criterios estadísticos aplicados. Este modelo no solo mostró un coeficiente de determinación ajustado elevado, sino que también obtuvo el valor más bajo del índice de Furnival, lo que reafirma su eficiencia y precisión para la estimación de la biomasa aérea.

Los coeficientes estimados para dicho modelo, presentados en la Tabla 9, serán empleados en la formulación final de la ecuación alométrica seleccionada. Esta ecuación se utilizará como herramienta principal para estimar la biomasa aérea de *S. amara*, permitiendo obtener resultados consistentes y representativos de las condiciones del área de estudio.

Tabla 9. Coeficientes para la ecuación

Parámetro	Coefficiente
(Intercept)	-214,9851
dap	14,3438
dap ²	-0,8429
h	9,4459
dap ² *h	0,0688

dap = diámetro a la altura del pecho; h = altura total

La ecuación desarrollada para estimar la biomasa aérea de *S. amara* es la siguiente:

$$\text{Modelo 12: } \text{BAT} = b_0 + b_1 * \text{dap} + b_2 * \text{dap}^2 * h$$



$$\text{BAT} = (-214,9851) + (14,3438 * \text{dap}) + (-0,8429 * \text{dap}^2) + (9,4459 * h) + (0,0688 * \text{dap}^2 * h)$$

Utilizando esta ecuación, se estimó una biomasa aérea predicha de 30 878,07 kg para los 78 árboles de *S. amara* analizados, mientras que la biomasa aérea real fue de 30 878,25 kg. La diferencia observada fue de apenas 0,18 kg, lo que indica una subestimación mínima. Por lo tanto, se puede afirmar que la ecuación generada permite estimar

la biomasa aérea total con una precisión del 99,99% para los árboles de *S. amara* en la región Ucayali.

4.1.7. Análisis de residuos

En la Figura 11 se muestra la distribución de los residuos obtenidos en función de la biomasa aérea predicha, siguiendo las recomendaciones metodológicas propuestas por Montgomery *et al.* (2006) para la validación de modelos de regresión. El análisis visual de este gráfico revela que los residuos se encuentran dispersos de manera aleatoria alrededor de la línea base (residuo = 0), sin evidenciar tendencias sistemáticas, agrupamientos ni patrones curvilíneos. Esta distribución aleatoria de los residuos sugiere que no existen problemas de heterocedasticidad ni de falta de ajuste en el modelo seleccionado.

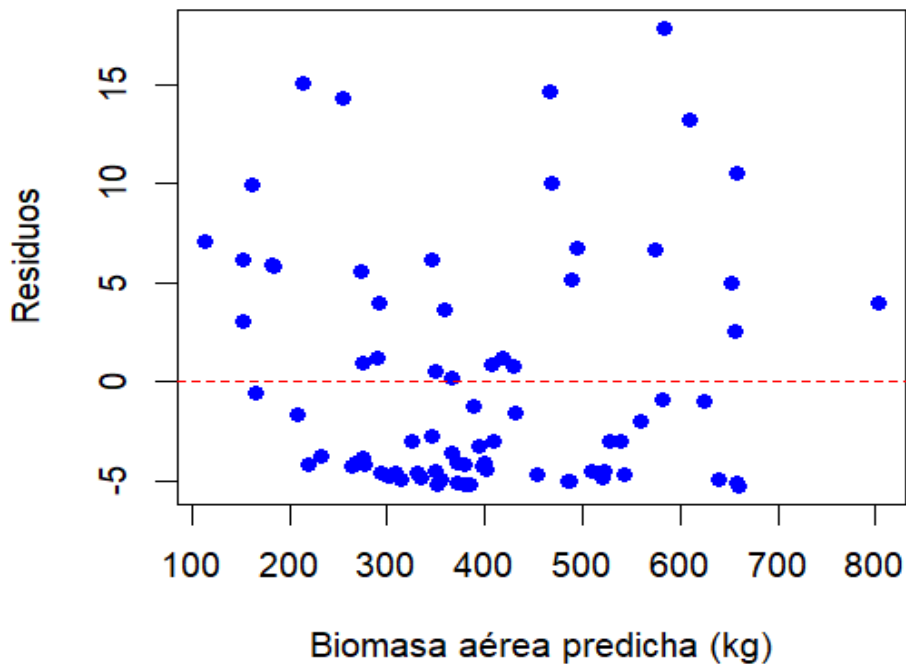


Figura 11. Distribución de los residuos para la ecuación seleccionada.

En la Figura 12 se muestra la comparación entre la biomasa aérea real y la biomasa aérea predicha, con el objetivo de evaluar la precisión del modelo seleccionado. Se observa una marcada tendencia lineal, donde los puntos se alinean estrechamente a la línea de identidad (línea roja discontinua), lo que evidencia un alto nivel de ajuste entre las estimaciones y los valores reales. Esta correspondencia indica que el modelo predice de manera precisa la biomasa aérea de *S. amara*, reforzando su fiabilidad para aplicaciones prácticas en estudios forestales.

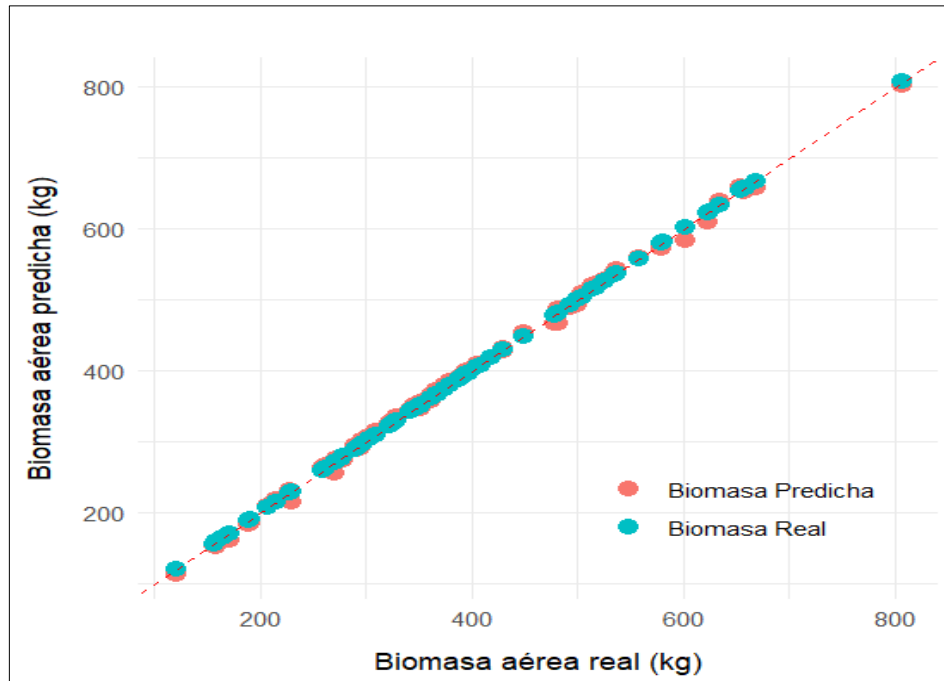


Figura 12. Comparación de la biomasa aérea predicha y biomasa aérea real.

4.1.8. Estimación de la biomasa aérea

En la Tabla 10 se presentan los resultados de la biomasa aérea para *S. amara* de 15 años, con un valor de 123,51t/ha. Comparando estos datos con otros estudios, Araujo (2014) determinó que una plantación de 27 años en Iquitos alcanzó 344,49t/ha, mientras que Guzmán (2023) reportó un valor aún mayor de 424,04t/ha para la misma edad. Además, Saldaña (2010) estimó un valor de 242,89t/ha para una plantación de 35 años. Estos resultados indican que, a medida que esta especie envejece, su biomasa aérea tiende a aumentar; sin embargo, se observa que a cierta edad puede comenzar a disminuir debido a factores como la muerte de individuos.

Tabla 10. Biomasa aérea predicha.

Biomasa aérea (kg)	Biomasa aérea (t/ha)
30 878,07	123,51

Por otra parte, en la evaluación realizada por Guerra (2013) en Iquitos, se estimó un valor de 58,31t/ha para una plantación de *S. amara* de 17 años. Este resultado relativamente bajo puede atribuirse a la cantidad de árboles que tuvo esa plantación, que solo fueron 8 árboles. De manera similar, Del Águila (2014) llevó a cabo una investigación en

Cedrelinga cateniformis de 27 años, reportando un valor de 56,93t/ha, que también es bajo en comparación con *S. amara*, este resultado se debe a que la evaluación se realizó en una plantación donde solo encontraron 9 árboles.

En un estudio realizado por Jiménez *et al.* (2020), reportaron un valor de 140,37t/ha para *Tectona grandis* de 11 años en México, un valor que supera al obtenido para *S. amara*. Esta diferencia puede atribuirse a la mayor densidad de plantación de *T. grandis* ya que esa plantación tuvo 1 666 árboles por hectárea. Asimismo, Anaya (2010) estimó un valor de 212,48t/ha para una plantación de *Guazuma crinita* de 5 años en Tingo María. Este resultado también es superior al de *S. amara*, lo que se puede explicar por el rápido crecimiento de *G. crinita*, que le permite acumular biomasa en menos tiempo.

Por otro lado, Guzmán (2023) realizó una investigación en *Cedrelinga cateniformis* de 15 años en Iquitos, obteniendo un valor de 235,61t/ha, significativamente mayor al registrado para *S. amara*. Esta diferencia puede explicarse por varias características propias de *C. cateniformis*. En primer lugar, esta especie presenta un rápido crecimiento durante sus primeros años, lo que le permite acumular biomasa de manera eficiente.

4.2. Estimación del carbono almacenado en la plantación de *S. amara*

La Tabla 11 muestra los resultados del carbono aéreo almacenado por *S. amara* de 15 años, que alcanzó un total de 55,58tC/ha. En un estudio realizado por Pérez (2014) en San Martín, determinó que esta especie a los 2 años acumulaba 6,14tC/ha. Por su parte, Araujo (2014) estimó que una plantación de 27 años en Iquitos alcanzaba 124,02tC/ha, mientras que Guzmán (2023) reportó un valor aún mayor, de 212,02tC/ha, para la misma edad. La notable diferencia en los valores de almacenamiento de carbono indica que *S. amara* presenta un crecimiento significativo en su capacidad para capturar carbono a medida que pasan los años.

Tabla 11. Carbono almacenado en la plantación de *S. amara*

Especie	Edad (años)	Área (ha)	Carbono aéreo (tC/ha)
<i>Simarouba amara</i>	15	0,25	55,58

Sin embargo, en una investigación realizada por Guerra (2013) en una plantación de *S. amara* de 17 años, obtuvo un valor de 36,15t/ha, inferior al estimado en este

estudio. Como se mencionó con anterioridad, esta diferencia se debe al reducido número de árboles encontrados por hectárea, que consistieron únicamente en 8 árboles.

Anaya (2010) estimó que una plantación de *Guazuma crinita* de 5 años en Tingo María almacenaba 95,62tC/ha, un valor superior al de *S. amara*. Esta diferencia se atribuye a que *G. crinita*, como especie pionera, acumula biomasa rápidamente y fija carbono de manera eficiente en sus primeros años de crecimiento.

Por otro lado, Jiménez (2020) realizó un estudio en una plantación de *Tectona grandis* de 11 años en México, donde estimó un almacenamiento de 77,20tC/ha, un valor que supera al registrado para *S. amara*, ya que esta plantación se encuentra mayor cantidad de árboles por hectárea. De manera similar, Guzmán (2023) estimó que una plantación de *Cedrelinga cateniformis* de 15 años en Iquitos almacena un valor de 117,81tC/ha, también superior al de *S. amara*. Esta diferencia se debe a que esta especie almacena mayor cantidad de biomasa en sus primeros años, lo que les permite almacenar un mayor contenido de carbono.

4.3. Estimación del secuestro de dióxido de carbono (CO₂) en la plantación de *S. amara*

En la Tabla 12 se presenta que *S. amara*, de 15 años, mostró un secuestro de dióxido de carbono equivalente a 203,98tCO₂/ha. En comparación, Araujo (2014) reportó un valor significativamente mayor de 454,72tCO₂/ha para una plantación de 27 años en Iquitos. Asimismo, Ruiz (2014) estimó un valor de 337,21tCO₂/ha para la misma edad, también superior al obtenido en esta investigación. Estas diferencias en los valores de secuestro de dióxido de carbono reflejan el impacto del tiempo en la capacidad de las especies arbóreas para capturar carbono. A medida que las plantas maduran, su capacidad para fijar CO₂ tiende a aumentar (Páiz *et al.*, 2002).

Tabla 12. Secuestro de CO₂ en la plantación de *S. amara*

Especie	Edad (años)	Área (ha)	Secuestro de CO ₂ (tCO ₂ /ha)
<i>Simarouba amara</i>	15	0,25	203,98

Por otra parte, en la evaluación realizada por Guerra (2013) en Iquitos, se estimó un valor de 132,54tCO₂/ha para una plantación de 17 años. Este resultado es inferior al obtenido en esta investigación, esto se puede atribuir a que solo se encontraron 8 árboles en la plantación, como se mencionó anteriormente.

Vidal (2023) estimó un valor de 685,47tCO₂/ha en una plantación de *Eucalyptus globulus* de 20 años en Huánuco. En un estudio realizado por Ruiz (2014) sobre una plantación de *Parkia igneiflora* de 27 años en Iquitos, estimó un valor de 250,49tCO₂/ha. De manera similar, Ucañay (2014) reportó un valor de 265,19tCO₂/ha para la misma plantación. Todos estos valores son significativamente superiores al encontrado en esta investigación. Las diferencias observadas en los niveles de secuestro de CO₂ pueden atribuirse a la mayor cantidad de árboles que hay en la plantación o también a la mayor densidad básica de estas especies en comparación con *S. amara*. Una mayor densidad básica permite a las especies almacenar más biomasa y, por ende, fijar una cantidad superior de dióxido de carbono.

4.4. Estimación del valor económico del secuestro de CO₂ de la plantación de *S. amara*

La Tabla 13 muestra que la plantación de *S. amara* de 15 años tiene un valor económico de 15 318,94\$/tCO₂/ha. En contraste, Araujo (2014) determinó que la valoración económica de una plantación de 27 años en Iquitos fue de 2 791,98\$/tCO₂/ha, mientras que Ruiz (2014) reportó un valor de 1 180,23\$/tCO₂/ha para la misma edad, ambos significativamente inferiores al encontrado en esta investigación, a pesar de que estas plantaciones presentaron un mayor secuestro de CO₂.

Tabla 13. Valor económico de la plantación de *S. amara*

Espece	Edad (años)	Área (ha)	Valoración económica del secuestro de CO ₂ (\$/tCO ₂ /ha)
<i>Simarouba amara</i>	15	0,25	15 318,94

La diferencia en los valores económicos puede atribuirse a la variación en el precio del CO₂ en el mercado. Araujo (2014) utilizó un precio de \$ 6,14 por tonelada, mientras que Ruiz (2014) aplicó un valor de \$ 3,14 por tonelada. En contraste, el precio actual se ha incrementado considerablemente, alcanzando los \$ 75,10 por tonelada. Este aumento en el valor del CO₂ refleja una creciente conciencia sobre la importancia del secuestro de carbono y su papel en la mitigación del cambio climático, lo que a su vez podría incentivar inversiones y políticas más efectivas en la gestión forestal sostenible.

V. CONCLUSIONES

- Se generó una ecuación alométrica para estimar la biomasa aérea total en la plantación de *S. amara* de 15 años en el Centro Experimental Los Magos, INIA - Pucallpa. La ecuación resultante es la siguiente:
$$BAT = -214,9851 + 14,3438*dap - 0,8429*dap^2 + 9,4459*h + 0,0688*dap^2*h$$
Utilizando esta ecuación, se estimó una biomasa aérea total de 30 878,07 kg en 0,25 ha, lo que equivale a 123,51t/ha.
- Se estimó el carbono almacenado en la plantación de *S. amara* de 15 años en el Centro Experimental Los Magos, INIA - Pucallpa, obteniendo un valor de 55,58tC/ha.
- Se estimó el secuestro de dióxido de carbono (CO₂) en la plantación de *S. amara* de 15 años en el Centro Experimental Los Magos, INIA - Pucallpa, resultando en un valor de 203,98tCO₂/ha.
- Se estimó el valor económico del secuestro de CO₂ de la plantación de *S. amara* de 15 años en el Centro Experimental Los Magos, INIA - Pucallpa, obteniendo un valor de 15 318,94\$/tCO₂/ha.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

- Llevar a cabo la validación de los modelos de biomasa desarrollados en esta investigación en diversas regiones del país. Esto permitirá evaluar la aplicabilidad y precisión de los modelos en diferentes contextos ecológicos y climáticos, contribuyendo así a su robustez y utilidad en estudios futuros.
- Para la construcción de las ecuaciones de biomasa o carbono se debe utilizar un mínimo de 30 árboles. Este tamaño de muestra asegura un margen de error de muestreo del 10 por ciento, lo cual es esencial para mantener la representatividad y la validez estadística de los análisis realizados.
- Realizar estudios adicionales sobre la estimación de biomasa en diferentes especies forestales y en diversas regiones del Perú. Estos estudios deben emplear métodos no destructivos para asegurar la sostenibilidad y conservación de los recursos forestales.
- Establecer un mayor número de plantaciones de *Simarouba amara* por su alta capacidad de acumular biomasa y carbono, favoreciendo la restauración ecológica y la mitigación del cambio climático.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, M., Quednow, K., Etchevers, J., & Monreal, C. (2001). Un método para la medición del carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. INIFAP, 1-7.
- Acuña, E. (2004). Análisis de regresión. Mayagüez, Puerto Rico.
- Alvarado, J., & Obagi, J. (2008). *Fundamentos de Inferencia Estadística*. Javeriana.
- Anaya, K. (2010). *Carbono almacenado en plantaciones disetáneas de Guazuma crinita Martius "Bolaina blanca", en Tingo María- Perú* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/handle/20.500.14292/938>
- Angulo, W. (2015). Ecología y Silvicultura de *Simarouba amara* Aubl. Repositorio Institucional INIA.
- Araujo, E. (2014). *Secuestro y valoración económica de CO₂ en tres plantaciones de diferentes edades de simarouba amara del CIEFOR Puerto Almendras, Iquitos - Peru, 2013* [Tesis de grado, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. Repositorio Institucional UNAP. <https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/4722>
- Arévalo, L., Alegre, J. y Palm, CH. (2003). Manual de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra en Perú. Publicación de STC - CGIAR Ministerio de agricultura. Pucallpa, Perú.
- Baltazar, A. (2011). *Carbono aéreo almacenado en una plantación de bolaina blanca (Guazuma crinita Martius) de un año de edad, en el centro poblado Nuevo Edén, Alto Madre de Dios* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/handle/20.500.14292/563>
- Barrena, V., Dancé, J., & Sáenz, D. (1986). Metodología para la selección de ecuaciones de volumen. *Revista Forestal del Perú*, 13(2), 3-12.
- Brack, A. & Mendiola, C. (2000). *Ecología del Perú*. Peruecológico.
- Brown, P., Cabarle, B., & Livernash, R. (1997). *Carbon counts: Estimating climate change mitigation in forestry projects*. World Resources Institute.

- Carranza, C., Bruce, A., Echeverría, J., Tosi, J., & Mejias, R. (1996). *Valoración de los servicios ambientales de los Bosques de Costa Rica*. Centro Científico Tropical.
- Ciesla, W. (1996). *Cambio climático, bosque y ordenación forestal Una visión de conjunto*. FAO.
- Cifuentes, J. M. (2010). ABC del cambio climático en Mesoamérica. Turrialba, Costa Rica. Serie Técnica. Informe Técnico / CATIE.
- Chatterjee, S., & Hadi, A. (1977). *Regression analysis by example*. Wiley.
- Cunia, T. (1964). Weighted least square method and construction of volume tables. *Forest Science*, 10(2), 180-191.
- Da Cunha, T., & Guimaraes, C. (2009). Modelo de regresión para estimar el volumen total con corteza de árboles de *Pinus taeda* L. en el sur de Brasil. *Kurú: Revista Forestal*, 6(16), 1-15.
- Del Águila, C. (2014). *Secuestro de CO₂ y almacenamiento de carbono en plantaciones de Cedrelinga cateniformis ducke "tornillo" e: n tres edades diferentes en el CIEFOR, Puerto Almendra, rio Nanay, Iquitos - Perú* [Tesis de grado, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. Repositorio institucional UNAP. <https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/2554>
- Derecho Ambiente y Recursos Naturales (2022). *Riesgo de deforestación asociada a la infraestructura vial existente y proyectada en los departamentos de Loreto, San Martín y Ucayali*. <https://dar.org.pe/wp-content/uploads/2023/02/Riesgo-de-Deforestacion.pdf>
- Douterlungne, D., Herrera-Gorocica, A., Ferguson, B., Siddique, I., & Soto-Pinto, L. (2013). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono de cuatro especies leñosas neotropicales con potencial para la restauración. *Agrociencia*, 47(4), 385-397.
- Escobar, E., & Maass, M. (2008). Diversidad de procesos funcionales en los ecosistemas. *Capital natural de México*, 1, 161-189.
- Escobar, M. (2018). *Estudio de la volumetría de árboles en pie de caoba (Swietenia macrophylla King) en el departamento de Madre de Dios, Perú* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio UNALM. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3243>

- Figueroa, J. (2005). Valoración de los productos forestales no maderables (PFNMs) en la reserva forestal Imataca, bajo el enfoque de la economía ecológica: caso de estudio cuenca alta del río Botanamo, Estado de Bolívar. Venezuela [Tesis doctoral, Universidad de la Laguna]. Repositorio institucional RIULL. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/9850>
- Flores, Y. (2002). Manual de semilla de especies forestales de importancia económica en la región Ucayali. Primera edición. INIA. Pucallpa, Perú.
- Fonseca-González, W., Ávila, C., Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C., Benavidez-Fallas, R., Arce-Ledezma, V., Carmona-Solís, R., Ulloa-Saborío, G., Salazar-Ruiz, A., & Carvajal-Arroyo, D. (2021). Predicción de biomasa y carbono en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L.f. *grandis* L. f y *G. arborea* Roxb. en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana KURÚ*, 19(44), 66-74.
- Furnival, G. (1961). An Index for comparing equations used in constructing volumes tables. *Forest Science*, 7(4), 337-341.
- Gayoso, J. (2002). Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques nativos y plantaciones de Chile. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1(1), 1-13.
- Gonzalo, S. (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 grado, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. Repositorio institucional UNAP. <https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/4921>
- Guerra, N. (2013). *Valoración económica del secuestro de c02 y stock de carbono en plantaciones. de simarouba amara* (Aublet) “marupa” en cinco edades diferentes en el CIEFOR-Puerto Almendra, Iquitos-Perú [Tesis de grado, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. Repositorio institucional UNAP. <https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/1933>
- Guzmán, J. (2023). *Carbono almacenado en la biomasa de las plantaciones forestales de Simarouba amara* “marupa” y de *Cedrelinga cateniformes ducke* “tornillo” del CIEFOR puerto almendra, Loreto – Perú [Tesis de grado, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. Repositorio institucional UNAP. <https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/8866>

- Granados, J., & Corner, C. (2001). Respuesta de las selvas tropicales al incremento de CO₂ en la atmósfera. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1(1), 63-70.
- Hanke, J., & Wichern, D. (2010). *Pronóstico en los negocios*. Prentice Hall.
- Herrador, D. (1999). Pagos por servicios ambientales: oportunidad para la agricultura sostenible en el salvador. *Revista Centroamericana Laderas*, 4,20-22.
- Holdridge, L. (1978). *Ecología basada en zonas de vida*. IICA.
- IFER. (2009). *Institute of Forest Ecosystem Research, Ltd., is an independent* - IFER. Republica checa.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2018). *RT.2 Cambios en los impulsores climáticos humanos y naturales*. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4-wg1-ts-sp.pdf>
- Jiménez, J., Telles, R., Alanís, E., Yerena, J., García, D., & Gómez, M. (2020). Estimación del carbono almacenado en una plantación de *Tectona grandis* L.f. mediante ecuaciones alométricas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(57), 32-56. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i57.550>.
- Lasertech. (2005). *Manual para el usuario de la unidad Trupulse de LTI - Trupulse 200/200B*. España: Laser Technology.
- Llerena, C., Hermoza, R., & Llerena, L (2007). Plantaciones forestales, agua y gestión de cuencas. *Debate agrario*, 42, 79-110.
- Páiz, D., & Molina, J. (2002). *Producción de biomasa y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y tacotales en la zona baja de la Micro-cuenca Rio Bul Bul, Matiguas, Matagalpa* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio institucional RIUNA. <https://repositorio.una.edu.ni/1018/>
- Monroy, C., & Návar, J. (2004). Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques*. 10(2), 29-43.
- Montero, M., & Montagnini, F. (2005). Modelos alométricos para la estimación de biomasa de diez especies nativas en plantaciones en la región Atlántica de Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente*, 45, 112-119.

- Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. LIMUSA WILEY.
- Montgomery, D., Peck, A., & Vining, G. (2006). *Introducción al análisis de regresión lineal*. CECSA.
- Pardos, A. (1999). Ante un cambio climático: papel de los montes arbolados y los productos forestales en la retención del carbono. *Investigación Agraria Sistemas y Recursos Forestales, 1*, 93-99.
- Pérez, M. (2014). *Cuantificación de la reserva de carbono en la biomasa aérea en sistemas agroforestales de Simarouba amara "marupa" y Swietenia macrophylla "caoba" en Yurimaguas – Loreto* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto]. Repositorio UNSM. <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/429>
- Pons, J. (2005). La biomasa como fuente de energía renovable, en *Anales de la Real Academia Española para la Química*. 32-42.
- Rojo, J. (2007). *Regresión Lineal Múltiple*. Madrid, España. 32p.
- Romero, C. (2016). *Estimación del volumen de árboles en pie de caoba (Swietenia macrophylla King) en el departamento de Ucayali, Perú* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio UNALM. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/e8216516-4f6d-480f-aacd-c901a8c5c58d>
- Ruiz, E. (2007). *Elaboración de una ecuación de volumen para un bosque de terrazas altas en el codo de Pozuzo, Puerto Inca, Huanuco* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio UNALM. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/1736>
- Ruiz, S. (2014). Valoración económica del secuestro de CO₂ en plantaciones de 27 años en especies de *Ormosia coccinea*, *Parkia igneiflora*, y *Simarouba amara*, en el CIEFOR- Puerto Almendra, Perú [Tesis de grado, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. Repositorio institucional UNAP. <https://repositorio.unapikitos.edu.pe/handle/20.500.12737/3824>
- Rügnitz, M., Chacón, M., Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. Lima, Perú.
- Saldaña, P. (2010). *Estimación de biomasa de Cedrelinga cateniformis Ducke (tornillo) y Simarouba amara Aublet (marupa) en plantaciones forestales del Centro De*

- Investigaciones Jenaro Herrera* [Tesis de grado, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana] Repositorio UNAP.
<https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/2357>
- Salinas, Z., & Hernández, P. (2008). Guía para el diseño de proyectos MDL forestales y de bioenergía. Costa Rica.
- Segura, M. (1999). *Valoración del servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados del Área de Conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Costa Rica] Repositorio CATIE.
<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/4298>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2020). Mapa Climático del Perú.
<https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=ucayali&p=mapa-climatico-del-peru>
- Simbaña, N. (2011). *Estimación de la captura de carbono en plantaciones de eucaliptus globulus labill* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio UNALM.
http://www.lamolina.edu.pe/Gaceta/Avances_Cientificos/edicion2012/notas/nota005.htm
- Suarez, D., Segura, M., & Kanninen, M. (2004). Estimación de la biomasa aérea total en árboles de sombra y plantas de café en sistemas agroforestales en Matagalpa, Nicaragua, usando modelos alométricos. *Agroforestería en las Américas*. 41, 112-119.
- Ucañay, T. (2014). *Valoración económica del secuestro del CO₂ en plantaciones de Parkia sp. "pashaco" de diferentes edades en el CIEFOR-Puerto Almendra, Iquitos-Perú* [Tesis de grado, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. Repositorio institucional UNAP. <https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/1955>
- Vélez, I. (2003). Apuntes de Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Administración. Colombia.
- Vidal, J. (2023). *Valoración económica del secuestro de CO₂ en plantaciones de eucalipto (Eucalyptus globulus Labill) y aliso (Alnus acuminata) en el distrito de Jircán, provincia Huamalíes, departamento Huánuco* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional UNI.
<https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/26951>

ANEXOS

ANEXO A. Datos registrados en la plantación de *S. amara*.Tabla 14. Georreferenciación de *S. amara* de 15 años.

N° árbol	X	Y	N° árbol	X	Y
1	548941,3	9072777,4	40	548918,37	9072741,8
2	548942,23	9072768,5	41	548917,91	9072744,8
3	548942,58	9072765,6	42	548912,37	9072768,5
4	548944,54	9072747,4	43	548913,68	9072756,5
5	548943,01	9072735,2	44	548914,07	9072753,5
6	548942,69	9072738,2	45	548914,69	9072747,7
7	548939,09	9072771,2	46	548915,07	9072744,5
8	548937,21	9072761,9	47	548916,35	9072732,5
9	548937,74	9072755,9	48	548917,74	9072720,6
10	548939,78	9072737,9	49	548918	9072717,5
11	548940,16	9072734,9	50	548913,31	9072732,3
12	548940,78	9072729	51	548912,79	9072738,2
13	548937,79	9072728,7	52	548911,4	9072750,2
14	548936,84	9072737,6	53	548910,74	9072756,2
15	548936,45	9072740,7	54	548905,68	9072773,9
16	548935,47	9072749,8	55	548906,07	9072770,9
17	548934,81	9072755,5	56	548906,37	9072767,9
18	548934,23	9072761,6	57	548909,13	9072743,9
19	548929,79	9072773,3	58	548909,3	9072740,8
20	548930,11	9072770,3	59	548910,17	9072734,9
21	548932,46	9072749,3	60	548909,2	9072716,8
22	548932,78	9072746,3	61	548908,61	9072722,7
23	548933,14	9072743,3	62	548908,31	9072725,6
24	548933,82	9072737,3	63	548907,96	9072728,5
25	548934,13	9072734,3	64	548907,45	9072731,6
26	548934,46	9072731,3	65	548907,36	9072734,5
27	548931,54	9072731	66	548906,28	9072743,8
28	548930,84	9072737	67	548900,01	9072773,4
29	548929,91	9072746,1	68	548900,66	9072767,5
30	548923,54	9072775,7	69	548901,2	9072764,4
31	548924,26	9072769,8	70	548901,25	9072761,4
32	548924,5	9072766,8	71	548903,77	9072740,5
33	548924,87	9072763,8	72	548905,55	9072722,5
34	548928,14	9072733,7	73	548902,31	9072725
35	548924,92	9072736,4	74	548901,25	9072734
36	548924,58	9072739,5	75	548900,4	9072743,1

37	548917,96	9072772,1	76	548899,4	9072752
38	548920,56	9072748,2	77	548898,63	9072757,9
39	548919,44	9072732,8	78	548894,69	9072766,7

Tabla 15. Biomasa aérea de *S. amara* de 15 años.

N° de árbol	dap (cm)	HT (m)	Área (ha)	Biomasa aérea (kg)	Biomasa aérea (t/ha)
1	28,90	14,53	0,25	467,73	1,87
2	23,00	12,79	0,25	255,34	1,02
3	24,50	14,10	0,25	345,96	1,38
4	22,00	17,80	0,25	453,48	1,81
5	16,40	16,80	0,25	263,11	1,05
6	19,40	17,14	0,25	351,77	1,41
7	23,20	18,60	0,25	528,58	2,11
8	20,50	17,20	0,25	384,61	1,54
9	27,80	20,30	0,25	803,48	3,21
10	13,40	15,00	0,25	152,87	0,61
11	20,60	17,00	0,25	379,72	1,52
12	23,50	18,60	0,25	539,00	2,16
13	18,30	16,90	0,25	314,25	1,26
14	14,20	19,60	0,25	275,78	1,10
15	14,70	22,40	0,25	358,34	1,43
16	17,00	17,60	0,25	301,45	1,21
17	17,80	19,70	0,25	388,79	1,56
18	12,20	16,80	0,25	165,28	0,66
19	23,60	15,80	0,25	408,75	1,64
20	20,60	16,80	0,25	371,99	1,49
21	16,90	16,50	0,25	266,77	1,07
22	17,80	20,30	0,25	407,53	1,63
23	16,20	18,10	0,25	293,96	1,18
24	12,90	18,60	0,25	218,43	0,87
25	18,60	20,10	0,25	428,48	1,71
26	11,20	15,10	0,25	112,88	0,45
27	20,50	22,40	0,25	584,08	2,34
28	17,50	18,10	0,25	330,23	1,32
29	16,80	18,00	0,25	307,64	1,23
30	21,10	14,40	0,25	289,50	1,16
31	23,90	19,20	0,25	582,27	2,33
32	19,90	18,10	0,25	400,77	1,60

33	24,90	19,90	0,25	656,41	2,63
34	15,40	21,10	0,25	349,60	1,40
35	16,70	19,40	0,25	344,97	1,38
36	23,50	21,10	0,25	657,60	2,63
37	18,10	16,70	0,25	302,65	1,21
38	21,90	20,70	0,25	573,45	2,29
39	18,20	18,10	0,25	350,33	1,40
40	23,60	17,90	0,25	509,06	2,04
41	19,60	20,80	0,25	488,57	1,95
42	14,70	17,20	0,25	231,91	0,93
43	19,60	16,50	0,25	334,30	1,34
44	26,10	17,00	0,25	542,52	2,17
45	23,00	15,80	0,25	393,32	1,57
46	23,70	18,90	0,25	560,42	2,24
47	17,10	23,10	0,25	466,74	1,87
48	21,80	16,00	0,25	371,41	1,49
49	28,70	17,50	0,25	659,42	2,64
50	18,10	20,30	0,25	417,80	1,67
51	14,80	18,90	0,25	276,02	1,10
52	24,10	17,10	0,25	485,97	1,94
53	27,40	17,90	0,25	638,88	2,56
54	24,15	17,10	0,25	487,49	1,95
55	15,20	15,80	0,25	208,69	0,83
56	17,36	13,40	0,25	184,41	0,74
57	19,65	18,30	0,25	400,41	1,60
58	18,95	18,30	0,25	379,13	1,52
59	24,30	20,30	0,25	652,30	2,61
60	24,00	17,90	0,25	522,19	2,09
61	21,85	21,60	0,25	609,53	2,44
62	20,75	15,50	0,25	325,29	1,30
63	19,50	19,30	0,25	431,42	1,73
64	20,43	14,40	0,25	275,78	1,10
65	19,45	21,10	0,25	493,61	1,97
66	22,00	14,00	0,25	291,05	1,16
67	30,40	16,20	0,25	625,15	2,50
68	15,00	13,70	0,25	152,00	0,61
69	17,25	13,40	0,25	182,53	0,73
70	21,90	15,80	0,25	365,48	1,46
71	18,85	17,70	0,25	355,78	1,42
72	16,30	20,60	0,25	366,01	1,46
73	25,20	17,10	0,25	519,84	2,08

74	27,95	17,90	0,25	658,60	2,63
75	19,70	18,20	0,25	398,33	1,59
76	21,75	13,70	0,25	273,55	1,09
77	21,45	12,40	0,25	214,52	0,86
78	17,20	12,70	0,25	160,82	0,64
Total				30878,07	123,51

Tabla 16. Carbono aéreo, secuestro de CO₂ y valoración económica del secuestro de CO₂ de *S. amara* de 15 años.

N° de árbol	Carbono aéreo (tC/ha)	Secuestro de CO ₂ (tCO ₂ /ha)	Valoración económica del secuestro de CO ₂ (US\$/ha)
1	0,84	3,09	232,05
2	0,46	1,69	126,67
3	0,62	2,29	171,64
4	0,82	3,00	224,98
5	0,47	1,74	130,53
6	0,63	2,32	174,52
7	0,95	3,49	262,23
8	0,69	2,54	190,81
9	1,45	5,31	398,61
10	0,28	1,01	75,84
11	0,68	2,51	188,38
12	0,97	3,56	267,40
13	0,57	2,08	155,90
14	0,50	1,82	136,82
15	0,65	2,37	177,77
16	0,54	1,99	149,55
17	0,70	2,57	192,88
18	0,30	1,09	82,00
19	0,74	2,70	202,79
20	0,67	2,46	184,55
21	0,48	1,76	132,35
22	0,73	2,69	202,18
23	0,53	1,94	145,83
24	0,39	1,44	108,36
25	0,77	2,83	212,58
26	0,20	0,75	56,00
27	1,05	3,86	289,77

28	0,59	2,18	163,83
29	0,55	2,03	152,62
30	0,52	1,91	143,62
31	1,05	3,85	288,87
32	0,72	2,65	198,83
33	1,18	4,34	325,65
34	0,63	2,31	173,44
35	0,62	2,28	171,14
36	1,18	4,34	326,24
37	0,54	2,00	150,15
38	1,03	3,79	284,50
39	0,63	2,31	173,80
40	0,92	3,36	252,55
41	0,88	3,23	242,38
42	0,42	1,53	115,05
43	0,60	2,21	165,85
44	0,98	3,58	269,15
45	0,71	2,60	195,13
46	1,01	3,70	278,03
47	0,84	3,08	231,56
48	0,67	2,45	184,26
49	1,19	4,36	327,15
50	0,75	2,76	207,28
51	0,50	1,82	136,94
52	0,87	3,21	241,10
53	1,15	4,22	316,95
54	0,88	3,22	241,85
55	0,38	1,38	103,53
56	0,33	1,22	91,49
57	0,72	2,65	198,65
58	0,68	2,50	188,09
59	1,17	4,31	323,61
60	0,94	3,45	259,07
61	1,10	4,03	302,39
62	0,59	2,15	161,38
63	0,78	2,85	214,03
64	0,50	1,82	136,82
65	0,89	3,26	244,89
66	0,52	1,92	144,39
67	1,13	4,13	310,14
68	0,27	1,00	75,41

69	0,33	1,21	90,56
70	0,66	2,41	181,32
71	0,64	2,35	176,51
72	0,66	2,42	181,58
73	0,94	3,43	257,90
74	1,19	4,35	326,74
75	0,72	2,63	197,62
76	0,49	1,81	135,71
77	0,39	1,42	106,43
78	0,29	1,06	79,78
Total	55,58	203,98	15 318,94

ANEXO B. Mapa de ubicación.

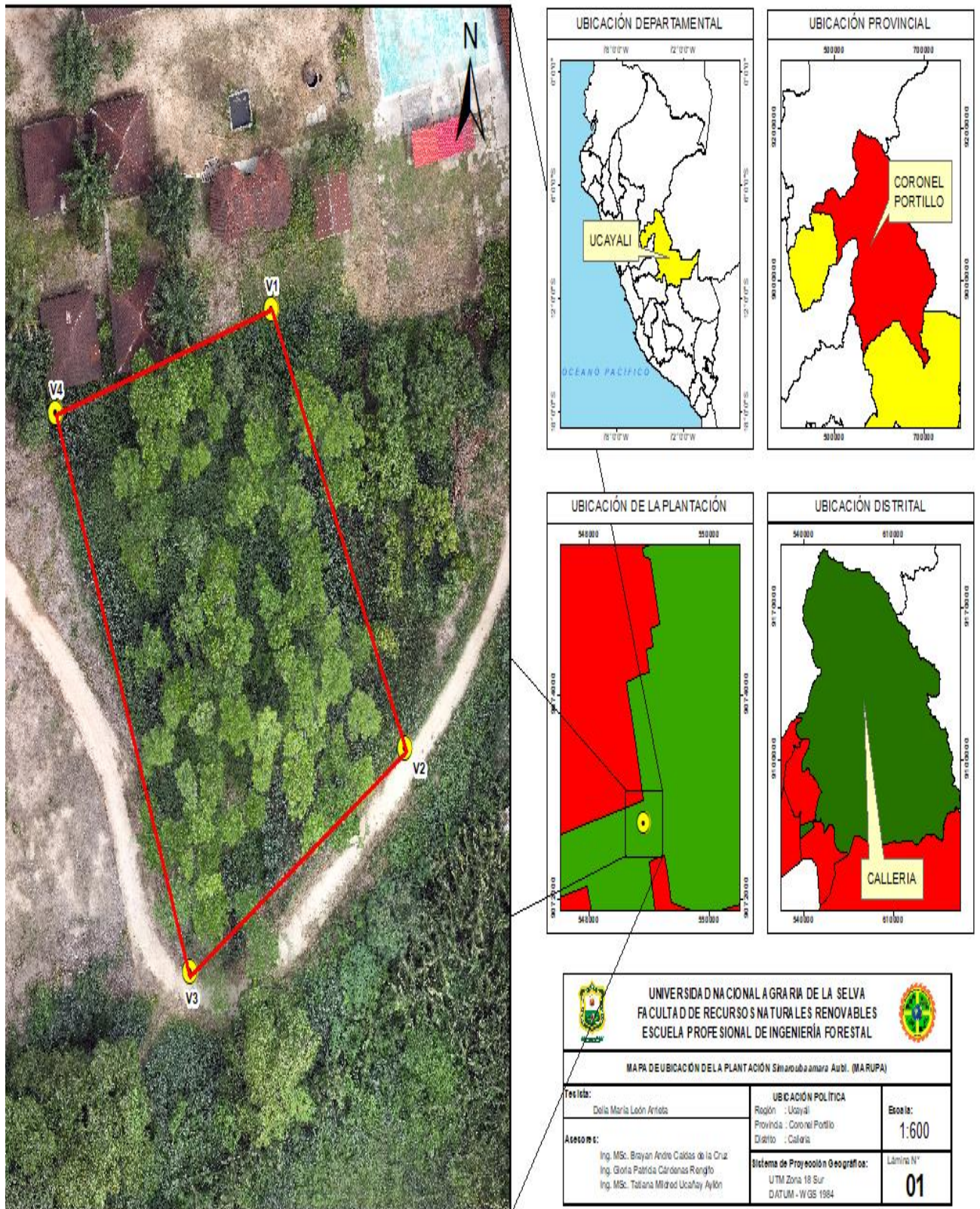


Figura 13. Mapa de ubicación de la plantación de *S. amara*.

ANEXO C. Mapa de dispersión.

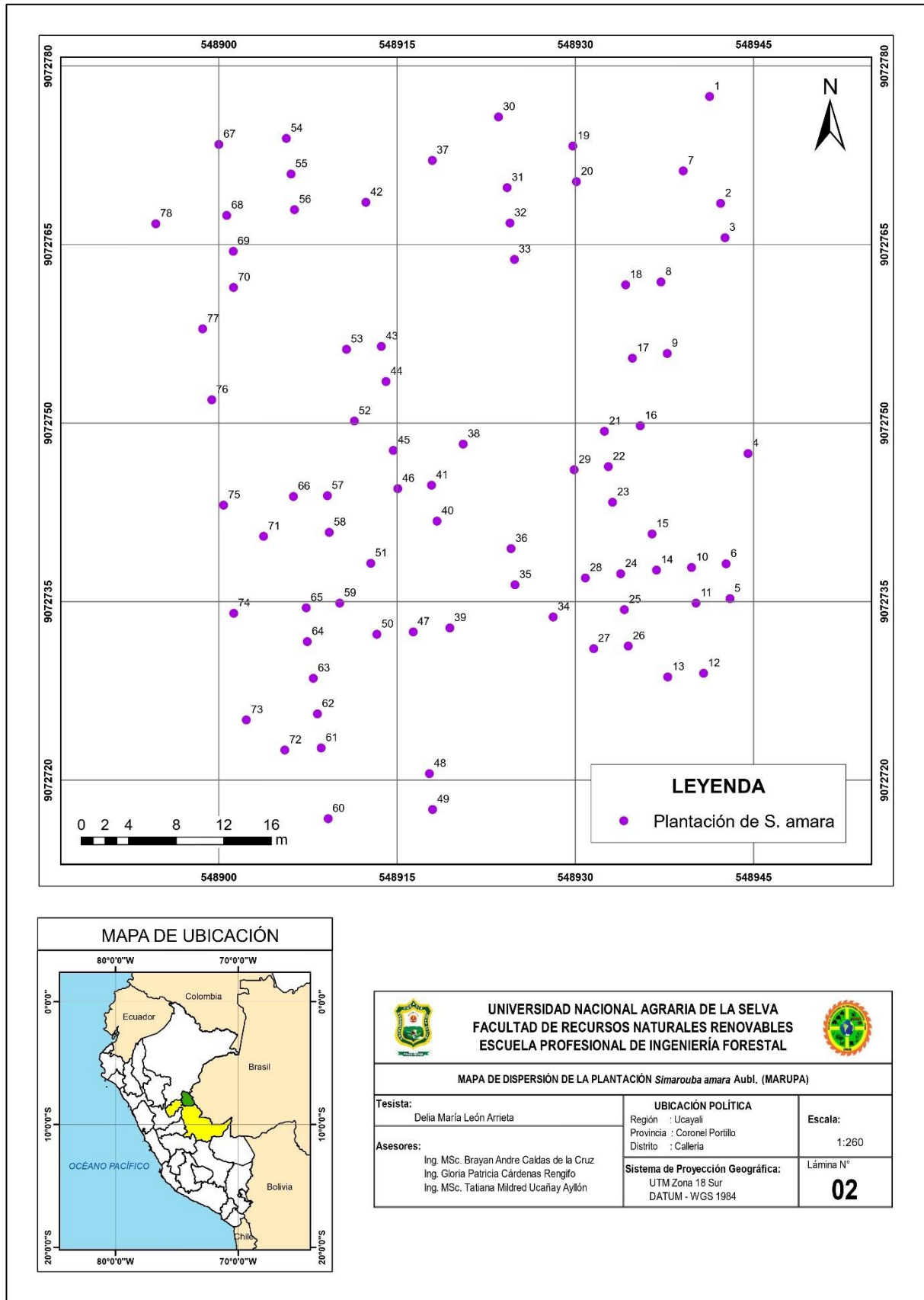


Figura 14. Mapa de dispersión de la plantación de *S. amara*.

ANEXO D. Panel fotográfico.



Figura 15. Plantación de *S. amara* de 15 años.



Figura 16. Codificación de los árboles de *S. amara*.



Figura 17. Posicionamiento del trípode.



Figura 18. Colocación del Trupulse 360R al braket.



Figura 19. Calibración del Trupulse 360R.



Figura 20. Georeferenciación y medición de altura total de los árboles de *S. amara*.



Figura 21. Medición de diámetros de los árboles de *S. amara*.



Figura 22. Visita del presidente de los miembros del jurado a la plantación de *S. amara*.