



Por un Desarrollo Agrario
Integral y Sostenible

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

FACULTAD

Trabajo de Tesis

ESTIMACION DEL CONTENIDO DE CARBONO EN PLANTACIONES DE TECA (*TECTONA GRANDIS L. F.*) EN DOS FINCAS DEL MUNICIPIO DE NANDAIME, GRANADA

Autor(es)

Br. Leslie Adriel Espinoza Ruiz

Br. María Lourdes Amaya García

Asesor(es)

MSc. Edwin Alonzo Serrano.

Presentado a la consideración del honorable comité
evaluador como requisito final para optar al grado de
<Ingeniero en Gestión Ambiental>

Managua, Nicaragua
Junio, 2026

Este trabajo de graduación fue evaluado y aprobado por el honorable comité evaluador designado por la decanatura de la <Facultad de Recursos Naturales y el Ambiente> como requisito final para optar al título profesional de:

<Ingeniero en Gestión Ambiental>

Miembros del Comité Evaluador

<grado académico y nombre>
Presidente

<grado académico y nombre>
Secretario

<grado académico y nombre>
Vocal

Lugar y fecha: <Municipio>, Nicaragua, <día/mes/año>

DEDICATORIA

A Dios, por darme la fuerza y la sabiduría para superar los obstáculos y alcanzar esta meta.

A mis padres, Milton Espinoza y Meyling Ruiz, por su amor incondicional, su apoyo constante y por haberme dado las herramientas necesarias para llegar hasta aquí. Este logro es también suyo.

A mi familia, por su paciencia, comprensión y ánimo durante todo este proceso.

A mi tía Luby Monterrosa por su apoyo constante el cual contribuyó a la culminación de mis estudios y por siempre estar pendiente de mi proceso. Gracias por siempre.

A mis amigas, por su compañía, sus consejos y por los momentos de distracción que me permitieron seguir adelante en este proceso que juntas hemos logrado.

A mis maestros y mentores, por su guía, sus conocimientos y por su dedicación en la dirección de este proyecto. Gracias por creer en mí.

A Don Ernesto Lugo Y Francis Obregón quienes fueron un apoyo incondicional en mis momentos mas difíciles, me apoyaron hasta el final de esta meta, hasta el cielo le dedico este logro, Don Ernesto.

A todos aquellos que de alguna manera contribuyeron a la realización de esta tesis, muchas gracias por su apoyo.

Leslie Adriel Espinoza Ruiz,

A mis padres, Héctor Amaya y Ena García, quienes con amor, paciencia y sacrificio han sido mi fuente inagotable de apoyo y motivación, iluminado mi camino a lo largo de esta travesía académica.

A mi adorada hija Jelena, quien a pesar de las largas noche de estudio y lo momentos de concentración intensa, siempre estuvo ahí con una sonrisa, recordándome la verdadera razón detrás de cada esfuerzo, brindándote un ejemplo de perseverancia y dedicación.

Al grupo infaltable de mis amigas, con las cuales compartí risas, desafíos y la montaña rusa de emociones que es la vida universitaria. Su amistad y todos los momentos que compartimos hicieron que este viaje sea verdaderamente inolvidable y lleno de buenos recuerdos.

A mis profesores y mentores, cuya guía ha sido fundamental en mi formación académica.
Gracias por desafiarme a superar mis límites y por creer en mi potencial.

Este trabajo está dedicado a todos ustedes ya que es el resultado de la contribución y el apoyo que me brindaron de diferentes maneras y que han formado parte de este viaje, se los dedico con profundo agradecimiento.

Con sincera gratitud,

María Lourdes Amaya García

AGRADECIMIENTO

A nivel personal, extendemos nuestra gratitud a aquellos que han sido nuestra red de apoyo incondicional. A nuestros padres, cuyo amor y sacrificio han sido la fuerza impulsora detrás de cada logro. A nuestro director de tesis, le agradecemos profundamente por su dedicación, paciencia y orientación experta a lo largo de este viaje académico. También agradecemos a nuestros amigos y seres queridos, quienes han sido faros de aliento y comprensión en los momentos de desafío. Su presencia ha sido fundamental para mantenernos enfocadas y motivadas. En este viaje, cada palabra de ánimo y gesto de apoyo que se nos brindó ha sido un recordatorio constante de que el logro académico es un esfuerzo colectivo, y por ello estamos sinceramente agradecidas.

<María Lourdes Amaya García, Leslie Adriel Espinoza Ruiz>

ÍNDICE DE CONTENIDO

SECCIÓN	PÁGINA
	1
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	viii
Cuadro 2. Formato para el levantamiento de datos	viii
Cuadro 3. Formato para registros de datos GPS y otras observaciones	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
2.1. Objetivo General	2
2.2. Objetivos Específicos	2
III. MARCO DE REFERENCIA	3
MARCO TEORICO	5
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	9
4.1. Enfoque general de la investigación	9
4.2. Ubicación del área de estudio	9
4.3. Descripción biofísica	10
4.4. Diseño del estudio	11
4.5. Etapas del proceso metodológico	11
La ejecución del estudio se estructuró en tres fases metodológicas diferenciadas:	11
4.6. Criterios de selección de las fincas	14
Misma plantaciones, accesibilidad y edades.	14
4.7. Fincas seleccionadas	15
5.1. Descripción de la Especie	15

5.2. Inventario forestal	17
Cuadro 4. Ecuaciones y procedimientos.	23
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
6.1. Presentación e interpretación de resultados	25
6.2. Distribución geoespacial de los lotes de muestreo	25
6.3. Distribución de categorías diamétricas de árboles muestreados	28
6.4. Evaluación del Volumen Fustal	29
6.5. Biomasa Aérea	29
6.6. Biomasa Total	30
6.7. Contenido de Carbono Almacenado	31
6.8. Fijación de Dióxido de Carbono	32
6.9. Datos recopilados dentro de las dos fincas	33
	35
VI. CONCLUSIONES	38
VII. RECOMENDACIONES	39
VIII. LITERATURA CITADA	40
IX. ANEXOS	43
I. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	43
1. PRESUPUESTO	45

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO	PÁGINA
1. Cuadro 1. Datos de las fincas seleccionadas	15
2. Cuadro 2. Descripción de nomenclatura	16
3. Cuadro 3. Materiales utilizados en el inventario	22
4. Cuadro 4. Ecuaciones y procedimientos	23
5. Cuadro 5. Distribución de categorías diamétricas	28
6. Cuadro 6. Biomasa Aérea	29
7. Cuadro 7. Biomasa Total	30
8. Cuadro 8. Carbono Almacenado	31

ÍNDICE DE FIGURAS

	FIGURA	PÁGINA
1.	Figura 1. Macro localizacion y Microlocalizacion del area de estudio	10
2.	Figura 2. Etapas del proceso metodológico	13
3.	Figura 3. Plantación de la especie en estudio	17
4.	Figura 4. Mapa de la distribución de los árboles en los lotes de muestreo en la finca Los Placeres, Nandaime.	26
5.	Figura 5. Mapa de la distribución de los árboles en los lotes de muestreo en la finca La Cabrereña, Nandaime	27
6.	Figura 6. Cuadro de los datos generales obtenidos en la Finca Los Placeres	33
7.	Figura 7. Cuadro de los datos obtenidos en la Finca La Cabrereña	35

ÍNDICE DE ANEXOS

	ANEXO	PÁGINA
1.	Cuadro 1. Tiempo necesario para realizar el estudio	43
2.	Cuadro 2. Formato para el levantamiento de datos	44
3.	Cuadro 3. Formato para registros de datos GPS y otras observaciones	44
4.	Cuadro 4. Presupuesto	45

RESUMEN

Debido a los efectos del cambio climático, uno de los temas más preocupantes de nuestro tiempo es el estado del medio ambiente nacional y del planeta. Por ello, el objetivo principal de este estudio fue evaluar cuantitativamente la captación y retención de biomasa y dióxido de carbono (CO_2) en dos fincas del municipio de Nandaime. El enfoque metodológico empleó una estrategia sistemática para la producción de muestras y se basó en el muestreo aleatorio de datos de especies arbóreas. Este proceso permitió la estimación de la biomasa aérea. La metodología adoptada incluyó la selección de árboles de diferentes clases diametrales, seguida de la medición de variables clave como lo fueron el diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total (Ht), diámetro de copa (Dc), diámetro mayor (D^+), diámetro menor (D^-), longitud de troza y peso de ramas, fuste y hojas. Como resultado de este proceso se logró la identificación y selección de 100 individuos de teca (*Tectona grandis*), proporcionando una base de datos para la evaluación de la biomasa y su función ecológica en el contexto estudiado. Este estudio se centra en la estimación del contenido de carbono en plantaciones de teca de dos fincas del municipio de Nandaime, utilizando un inventario aleatorio para cuantificar la biomasa aérea mediante ecuaciones alométricas. Las ecuaciones alométricas han sido ampliamente utilizadas para la estimación de biomasa y carbono en diversas especies forestales por su precisión y fiabilidad (Sáenz Reyes et al., 2021). Estas ecuaciones establecen una relación entre el DAP de los árboles y su biomasa total, permitiendo una estimación precisa del contenido de carbono. De esta manera, el trabajo buscó aportar una estimación rigurosa del carbono en plantaciones de teca en Nandaime, con una metodología reconocida y confiable, a fin de contribuir al desarrollo sostenible del sector forestal en Nicaragua y apoyar las iniciativas de conservación ambiental.

Palabras clave: Biomasa, Captación, Clases diametrales, Evaluación, Cuantificación.

ABSTRACT

Due to the effects of climate change, one of the most worrying issues of our time is the state of the national and global environment. Therefore, the main objective of this study was to quantitatively assess the uptake and retention of biomass and carbon dioxide (CO₂) on two farms in the municipality of Nandaime. The methodological approach employed a systematic strategy for sample production and was based on random sampling of tree species data. This process allowed for the estimation of aboveground biomass. The methodology adopted included the selection of trees from different diameter classes, followed by the measurement of key variables such as diameter at breast height (DBH), total height (TH), crown diameter (CD), major diameter (D+), minor diameter (D-), log length, and the weight of branches, stems, and leaves. As a result of this process, 100 teak (*Tectona grandis*) individuals were identified and selected, providing a database for assessing biomass and its ecological function in the studied context. This study focuses on estimating carbon content in teak plantations on two farms in the municipality of Nandaime, using a random inventory to quantify aboveground biomass using allometric equations. Allometric equations have been widely used to estimate biomass and carbon in various forest species due to their accuracy and reliability (Sáenz Reyes et al., 2021). These equations establish a relationship between the DBH of trees and their total biomass, allowing for an accurate estimation of carbon content. Thus, this study sought to provide a rigorous estimate of carbon in teak plantations in Nandaime, using a recognized and reliable methodology, in order to contribute to the sustainable development of the forestry sector in Nicaragua and support environmental conservation initiatives.

Key words: Biomass, Capture, Diameter Classes, Evaluation, Quantification.

I. INTRODUCCIÓN

Debido a la excepcional calidad de su madera y su capacidad para almacenar carbono, la teca (*Tectona grandis* L. f.) es una especie forestal de gran importancia ecológica y comercial. La silvicultura ha cobrado relevancia en Nicaragua en términos de adaptación, mitigación y crecimiento productivo, apoyando sistemas de gestión que reducen las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono y aumentan la biomasa..

En Nicaragua, la actividad forestal ha cobrado gran relevancia en las últimas décadas debido a su potencial para generar ingresos y empleo en las zonas rurales. Sin embargo, la deforestación y la degradación forestal siguen siendo problemas críticos que amenazan la sostenibilidad ambiental del país. En este contexto, la reforestación con especies de alto valor, como la teca, se presenta como una estrategia viable para fomentar el desarrollo económico mientras se conserva el medio ambiente.

En este contexto, la estimación de biomasa y de contenido de carbono en plantaciones de teca es fundamental para evaluar servicios ecosistémicos, valorar el potencial de captura de carbono y orientar decisiones silvícolas. El uso de ecuaciones alométricas permite estimar de forma no destructiva la biomasa por componentes y total del árbol, aportando resultados consistentes con menores costos y tiempos de medición en campo. Estas ecuaciones establecen una relación entre el diámetro a la altura del pecho (DAP) de un árbol y su biomasa total, lo que permite un cálculo preciso del contenido de carbono (Sáenz Reyes et al., 2022).

La importancia de este estudio radica no solo en la contribución a la cuantificación del carbono para implementar prácticas de manejo forestal que optimicen la captura de carbono.

Además, los resultados obtenidos pueden servir como referencia para futuros estudios en otras regiones y para la implementación de proyectos de compensación de carbono, fortaleciendo así los esfuerzos globales para mitigar el cambio climático.

El propósito de este estudio fue estimar el almacenamiento de carbono en plantaciones de *Tectona grandis* en dos fincas del municipio de Nandaime mediante métodos de muestreo aleatorio y ecuaciones alométricas adecuadas para la especie y las condiciones locales. Los hallazgos sugieren maneras de mejorar las prácticas de manejo forestal, reforzar las políticas ambientales y contribuir a las iniciativas nacionales para el desarrollo sostenible y la mitigación del cambio climático.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

- Evaluar la cantidad de carbono almacenado en plantaciones de Teca (*Tectona grandis* Linn F), en dos fincas del Municipio de Nandaime.

2.2. Objetivos Específicos

- Estimar la de biomasa de cada componente arbóreo (fuste, ramas, hojas) en plantaciones de Teca (*Tectona grandis* Linn F) en dos fincas de Nandaime, mediante el uso del método aleatorio.
- Cuantificar la cantidad de carbono y dióxido de carbono equivalente almacenados en los árboles de la plantación de Teca (*Tectona grandis*) utilizando ecuaciones alométrica específicas para la especie.
- Comparar los contenidos de carbono entre las fincas evaluados en las plantaciones de Teca (*Tectona grandis*).

III. MARCO DE REFERENCIA

Base teórica

Al almacenar biomasa aérea y subterránea y servir como sumideros de carbono, las plantaciones forestales son una herramienta importante para mitigar los efectos del cambio climático. Los rangos de almacenamiento documentados por la investigación de referencia sobre la estimación de biomasa en los trópicos difieren según la especie, la edad, el manejo y las circunstancias del sitio como el suelo, densidad de la madera y precipitación (Brown, 1997).

El rápido crecimiento y la densidad básica de la madera relativamente alta de *Tectona grandis* (teca), que promueven el secuestro de carbono a escala de plantación, han atraído mucha atención de la investigación. El uso de biomasa y reservas de carbono en programas de reforestación y manejo productivo está respaldado por evidencia regional como la de Asia y Mesoamérica, con la advertencia de que las estimaciones deben modificarse utilizando ecuaciones y factores específicos del sitio para minimizar el sesgo (Marroquín-Morales et al., 2023; Sáenz Reyes et al., 2021)

Para cuantificar biomasa y carbono en plantaciones se emplean ecuaciones alométricas que relacionan variables dendrométricas de fácil medición, como el diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura total (H), e incorporan, cuando aplica, la densidad básica de la madera (ρ). El uso de modelos pan-tropicales recientes mejora la precisión siempre que se respete su ámbito de validez según el tipo de bosque, rango diamétrico o se calibren con datos locales (Marroquín-Morales et al., 2023). La conversión de biomasa a carbono suele realizarse con la fracción por defecto 0.47 que se refiere al 47% del peso seco, recomendada por IPCC para enfoques de Nivel 1–2, en tanto que proyectos de mayor detalle pueden emplear fracciones específicas por especie o sitio. Cuando se requiere CO₂ equivalente, se aplica el factor 44/12 al carbono estimado (Pérez-Vázquez et al., 2021).

En la realidad, los procedimientos reconocidos proporcionan instrucciones para el diseño de muestras, la medición en campo, el control de calidad y la estimación de la incertidumbre. Estos incluyen mediciones estandarizadas de DAP y altura, una selección clara de ecuaciones alométricas y una presentación transparente de supuestos y errores relacionados.

Las plantaciones forestales como sumideros de carbono.

Las plantaciones forestales, por la gran cantidad de biomasa que producen por unidad de área, han sido sugeridas como alternativas para la fijación de carbono por se ecosistemas cuyo manejo se orienta a minimizar el volumen en madera por unidad de área, lo que da como resultado una fijación de carbono elevada y por ende contribuye a la limpieza de la atmosfera. El carbono fijado en la biomasa permanece acumulado en las plantaciones por largos periodos. La función de las plantaciones como elemento mitigador de los gases de efecto invernadero es reconocida en la actualidad a nivel nacional e internacional.

Los sistemas forestales atrapan CO₂ de la atmosfera mientras ellos van adquiriendo más. Una vez alcanzada su madurez, ellos aproximadamente están en balance con respecto al carbono pues la tasa que han acumulado es la misma que liberan.

La tasa de fijación de carbono está en función de la especie y el índice del sitio, por lo que el índice anual de fijación de carbono es más alto en las plantaciones jóvenes, o sea, las plantaciones que se encuentran en pleno crecimiento.

Dichas plantaciones forestales, ya sean para la producción de madera, producción de biomasa, protección de áreas seleccionadas, recuperación de tierras degradadas para el fortalecimiento de prácticas agroforestales, contribuyen a contrarrestar el efecto invernadero ya que sirve como mecanismos de captación de CO₂ y alivian la presión sobre los bosques naturales, preservándolos como depósito de carbono. (Pérez-Vázquez et al., 2021; Sáenz Reyes et al., 2021)

MARCO TEORICO

Conceptos generales

Plantaciones Forestales: En cuanto a las plantaciones forestales Rojas (2001) menciona que “es el cultivo de los árboles forestales técnicamente planeado para la obtención de productos y beneficios forestales de la mejor calidad, con el mínimo costo y en el menor tiempo posible”

Cambio Climático: Es un fenómeno que se expresa como una desviación del tiempo meteorológico promedio esperados de las condiciones climáticas normales (temperatura y precipitación) para un lugar y tiempo dado (Ipcc, 2022).

Almacenamiento de Carbono: El almacenamiento de dióxido de carbono (CAC); se considera como una de las opciones para reducir las emisiones atmosféricas de CO₂ generadas por las actividades humanas (Ipcc, 2022).

Biomasa: Es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptibles de ser aprovechada energéticamente. Las plantas transforman la energía radiante del sol a energía química a través de la fotosíntesis y parte de esta energía queda almacenada en forma de materia orgánica. La biomasa en los ecosistemas forestales se divide área, fuste, ramas, follaje y biomasa subterránea, raíces (Ipcc, 2022)

Biomasa aérea: Se refiere al peso seco de material vegetal del árbol sobre el suelo incluyendo fuste, corteza, ramas y hojas (Ashton et al., 2012).

Fijación de carbono: La fijación de carbono se genera en el proceso de la fotosíntesis realizado por las hojas y otras partes verdes de las plantas, que capturan el dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera que producen carbohidratos, liberan oxígeno y dejan carbono que se utiliza para la transformar la biomasa de la planta incluyendo la madera de los árboles (Eggleston, 2006)

Almacenamiento de carbono: Se refiere al proceso de retención y acumulación de carbono (en forma de carbono orgánico o inorgánico) en varios reservorios naturales y artificiales. Dicho proceso es esencial para equilibrar el ciclo del carbono.

Carbono fijado: Se refiere a la capacidad de una unidad de área cubierta por vegetación para fijar carbono en un periodo determinado; es decir por encima de la cantidad actual almacenada (Eggleston, 2006)

Sistema silvopastoril: Es una forma de hacer ganadería en los potreros, combinando los pastos con enredaderas, hierbas, árboles y arbustos. En este sistema se requiere una administración de estos recursos de manera que perduren en el tiempo de los árboles y arbustos, así como es el aprovechamiento en la alimentación animal. (IICA, 2016) e (Integración de la ganadería y la conservación de los recursos naturales 2010.)

Sistema bosque: Es una asociación vegetal natural o plantada, en cualquier etapa del ciclo natural de vida, con árboles que alcanzan una altura superior a 5 metros, con una cobertura de dosel mayor del 10 %, que se extiende por más de 0.5 hectáreas y un mínimo de 20 metros de ancho que con o sin manejo, es capaz de producir bienes y servicios; ejercer influencia sobre el régimen del agua, el suelo, el clima y proveer hábitat para la vida silvestre. (INAFOR, 2009). (E. Jiménez, A. Landeta, 2010)

Factor de expansión de biomasa (FEB): Es la proporción directa entre biomasa total y la biomasa del fuste. Se trata de un factor variable que depende de la especie arbórea, las condiciones ambientales, la densidad de la plantación y la edad de los individuos, entre otros (Fonseca, 2017)

Densidad básica de la madera: Relación entre la masa de la madera en estado anhidro (seco) y el volumen de la madera en estado verde y se expresa en g/cm³ o ton/m³. (Eggleston, 2006)

Dióxido de carbono (CO₂): (CO₂) Gas que se produce de forma natural, y también como subproducto de la combustión de combustibles fósiles y biomasa, cambios en el uso de las tierras y otros procesos industriales. Es el principal gas de efecto invernadero antropogénico que afecta al equilibrio de radiación del planeta. Es el gas de referencia frente al que se miden otros gases de efecto invernadero y, por lo tanto, tiene un Potencial de calentamiento mundial (Ipcc, 2022)

Clases diamétricas: son la principal variable del bosque en término de uso, aprovechamiento, manejo y otros servicios que brinda el bosque convencionalmente, existen diez clases diamétricas. La legislación nacional relativa al aprovechamiento forestal comercial establece de manera general un diámetro mínimo de corta de 40 cm. (INAFOR, 2009).

Importancia de las plantaciones en el ciclo de carbono: según Trujillo (2002) las plantaciones desempeñan un papel importante en la mitigación del cambio climático y la conservación del medio ambiente debido a que con dicho ciclo generan:

- a) Captura de dióxido de carbono (CO₂): Por medio de las plantas, a través del proceso de fotosíntesis, absorben dióxido de carbono de la atmósfera y lo convierten en carbono orgánico, que se almacena en su biomasa, reduciendo la cantidad de CO₂ en la atmósfera, lo que a su vez ayuda a reducir gases de efecto invernadero y el calentamiento global.

El rol de las plantaciones como sumideros de carbono: Un sumidero de carbono es un sistema natural o artificial que retiene o almacenan dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera contribuyendo a reducir su concentración. Los sumideros de CO₂ son esenciales para equilibrar el ciclo del carbono ya que generan una regulación del clima en la tierra.

El dióxido de carbono que es retenido por medio de las plantaciones forestales es almacenado en biomasa en sus troncos, ramas, hojas y raíces que este es utilizado a medida que las plantas crecen y se desarrollan por largos periodos de tiempos, (Romero, N, 2003).

Reducción de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI): Por lo general la reducción de las emisiones de gases por medio de plantaciones se puede lograrse mediante una combinación de prácticas sostenibles y estrategia de manejo forestal. Tales como;

- a) Gestión forestal sostenible
- b) Reforestación y restauración del área
- c) Uso sostenible de la madera
- d) Certificación forestal
- e) Educación y capacitación

Efecto invernadero: Es un fenómeno natural y fundamental para mantener la temperatura de la tierra en niveles adecuados para vida. Sin embargo, debido a las actividades humanas, este fenómeno se ha intensificado y ha llevado al llevado al calentamiento global y al cambio climático.

Ciclo de carbono: Es un proceso natural fundamental que involucra la circulación y transformación del elemento carbono a través de diferentes reservorios en la tierra, incluyendo la atmosfera, océanos, suelos, seres vivos y la corteza terrestre. El carbono es un elemento esencial para la vida y desempeña un papel crucial en el funcionamiento de los ecosistemas y en el clima de la tierra. (Zamora et al., 2000)

Factor de expansión de la biomasa (FEB): Es un concepto que se utiliza para estimar la cantidad total de biomasa vegetal (generalmente en termino de peso seco) en un área o en ecosistema basado en muestras y mediciones limitadas. Es una herramienta importante para calcular la biomasa total de árboles, plantas herbáceas u otro tipo de vegetación en un área determinada.

Área basal (AB): Es una medida forestal que se utiliza para cuantificar la superficie de sección transversal de los troncos de los árboles en un determinado bosque o área forestal. Se expresa en metros cuadrados por hectárea (m^2/ha) o en pies cuadrados por acre, dependiendo de la región y las unidades de medida utilizadas. (Peña, 2011).

Factor de forma: Es un término que se utiliza en las industrias de madera para evaluar la calidad y la forma de los troncos de los árboles. Este factor se calcula como la relación entre el diámetro del tronco y la altura total del árbol. Generalmente se expresa como un numero entre el 0 y el 1 o como un porcentaje. (Ochoa, 2015).

Densidad básica de la madera: Es una propiedad física que se refiere a la masa de la madera por unidad de volumen. Se expresa comúnmente en gramos por centímetros cúbicos (g/cm^3) o en kilogramos por metro cubico (kg/m^3). Esta medida es importante ya que influye en mucha de las propiedades y usos de la madera, incluyendo su durabilidad, resistencia y aplicaciones específicas. (Ochoa, 2014).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Enfoque general de la investigación

El objetivo de esta investigación fue evaluar el contenido de carbono almacenado en plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) en dos fincas del municipio de Nandaime, Granada. Se empleó un diseño metodológico no destructivo basado en la selección aleatoria de árboles, utilizando ecuaciones alométricas adaptadas a las condiciones locales. La metodología está dividida en varias etapas, desde la selección de las áreas de estudio hasta el análisis de datos obtenidos, con el fin de garantizar la precisión y representatividad de los resultados.

4.2. Ubicación del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en dos fincas del municipio de Nandaime, Granada, ubicadas en las coordenadas 11°45' N y 85°55' O. Este municipio se caracteriza por un clima tropical con una precipitación anual promedio de 1200 mm y una temperatura media de 26°C. Los suelos predominantes en la zona son de tipo arcilloso, con buena fertilidad y drenaje.

La finca la Cabrereña tiene una extensión aproximadamente de 17.6 hectáreas, establecida desde hace 12 años atrás, su ubicación se encuentra en las coordenadas 11°47' 13.992`` y longitud 9° 53' 46.219``. Mientras la finca Los Placeres abarca 69 hectáreas y hasta la fecha ha evolucionado en un bosque de 11 años, sus coordenadas en latitud son 11° 46' 43.1256`` y longitud 9° 53' 37.396``. Ambas fincas están compuestas exclusivamente por plantaciones de *Tectona grandis*.

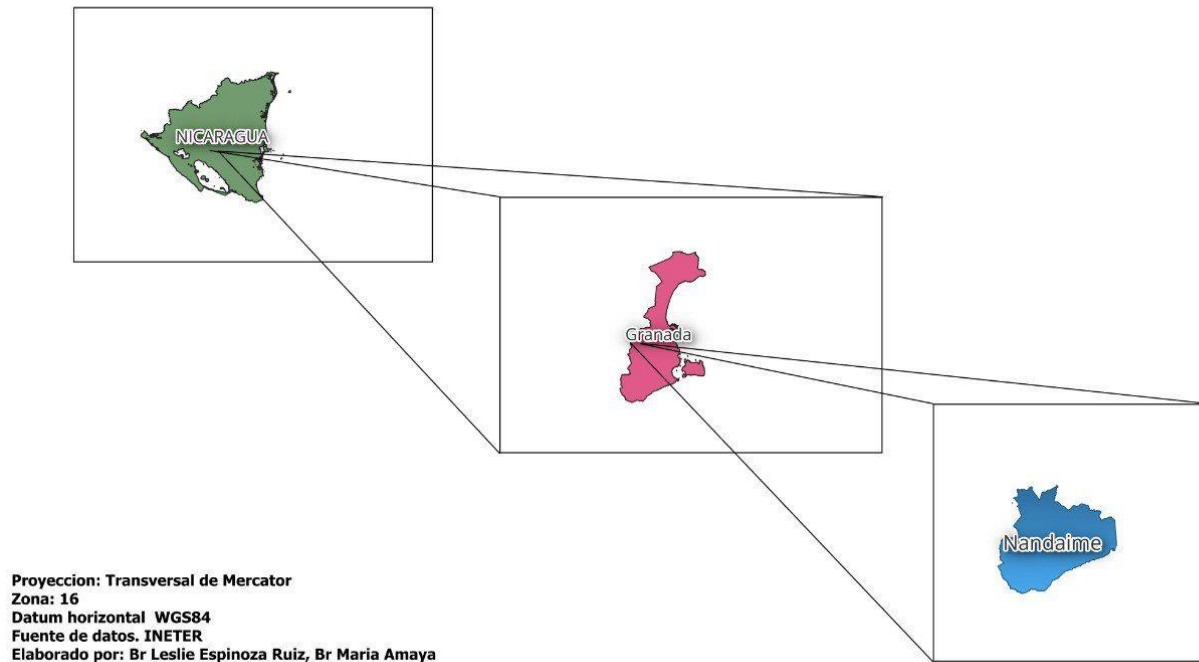


Figura 1. Mapa de Macro localizacion v Microlocalizacion del area de estudio.

4.3. Descripción biofísica

De acuerdo a Guido (2004), el área de estudio presenta los siguientes aspectos biofísicos:

Clima: Es clima es sub tropical, típico de la zona costera del Pacífico. La temperatura oscila entre los 23°C y 29°C, con una precipitación media anual entre 900 y 1300 mm. La época lluviosa es de mayo a octubre.

Hidrología: El área es atravesada por las quebradas Nandarola, San Rafael, Cebadilla y algunos ramales que solamente en el invierno presentan su caudal, siendo estos una microcuenca del Río Ochomogo.

Relieve: Las condiciones topográficas que presenta el bosque son: áreas planas, áreas onduladas, áreas quebradas y poco escarpadas. Las elevaciones dentro del área están entre 103 msnm (en la parte más baja), hasta los 261msnm (en las aéreas quebradas), predominando el relieve ondulado con pendientes menores de 30%, aunque también existen pendiente entre 45 y 80%, pero en trechos cortos.

Suelo: Son suelos de textura arcillosa, presentando diferentes coloraciones que van de rojizo claro a un tono más oscuro, pasando a negro en los lugares más cercanos a los ríos, hasta un tono gris claro, en las lomas y partes altas toman la coloración blanquecina con presencia de gravas; con un pH variable, predominando el ligeramente el ácido. Las profundidades varían entre 34-90 cm para el horizonte de la materia orgánica presenta de 1 a 2 centímetros de espesor.

4.4. Diseño del estudio

El diseño de esta investigación se basó en un enfoque estratificado aleatorio en la selección de los árboles a estudiar, con el objetivo de estimar el contenido de carbono en plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) en dos fincas del municipio de Nandaime, Granada, llamadas Los Placeres y La Cabrerena.

Este enfoque permitió asegurar que las muestras fueran representativas de las diferentes clases diamétricas y de las variaciones estructurales presentes en las plantaciones, garantizando así la fiabilidad de las estimaciones de carbono obtenidas. El muestreo fue no destructivo, tomando como referencia el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) y la altura total de cada árbol.

Para llevar a cabo este diseño metodológico, se siguieron tres etapas principales, desde la selección de las áreas de estudio hasta el análisis de los datos obtenidos.

4.5.Etapas del proceso metodológico

La ejecución del estudio se estructuró en tres fases metodológicas diferenciadas:

Primera fase: Etapa pre – campo

Durante esta etapa, se realizaron reuniones de coordinación con la empresa Equiforest, en donde se discutió y coordinó la destinación de las áreas para el desarrollo de la investigación, en el cual

destinaron las fincas Los Placeres y La Cabrereña ya que son áreas que se encuentran bajo manejo forestal.

Asimismo, se llevó a cabo la verificación de los instrumentos y materiales necesarios para el trabajo de campo, lo cual incluyó la calibración de equipos de medición como cintas diamétricas, clinómetros para la estimación de la altura, y dispositivos GPS para la localización precisa de los árboles. También se elaboró un cronograma de actividades para coordinar las visitas a campo, con el fin de maximizar el tiempo y la coordinación con el resto del equipo para llevar a cabo las mediciones de la manera más eficiente.

Segunda fase: Etapa campo

Con base a lo antes planteado, el equipo de trabajo se desplazó a la finca Los Placeres y La Cabrereña donde se procedió a delimitar las zonas de mayor potencial para la captación de carbono, estableciendo lotes específicos, donde se elegirían los árboles para el inventario forestal que serían medidos, siendo seleccionados de manera aleatoria, los cuales serían evaluados con la intención de que las áreas de trabajo fueran representativas de las plantaciones de teca en cada finca. Para cada árbol, se registraron datos clave como el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total, utilizando herramientas calibradas previamente en la fase de planificación. Así mismo, se tomó la ubicación exacta de cada árbol, lo que permitió un seguimiento detallado y facilitó la interpretación de los datos obtenidos.

Tercera fase: Etapa post campo

Finalmente, en esta etapa, se llevó a cabo el análisis de los datos recopilados durante la etapa de campo. En este análisis, se revisaron las mediciones de diámetro y altura de los árboles seleccionados y con dichos datos, fue posible estimar el contenido de carbono presente en la biomasa de los árboles a través de la aplicación de fórmulas.

Se utilizó el programa Excel y la herramienta ArcGIS para procesar los datos y elaborar mapas, lo cual facilitó la obtención de estimaciones del contenido de carbono en cada categoría diamétrica establecida y los mapas elaborados facilitaron un mayor entendimiento del área de estudio.

En la siguiente imagen ilustra detallada las distintas etapas metodológicas seguidas en el estudio de captación de estimación de carbono.

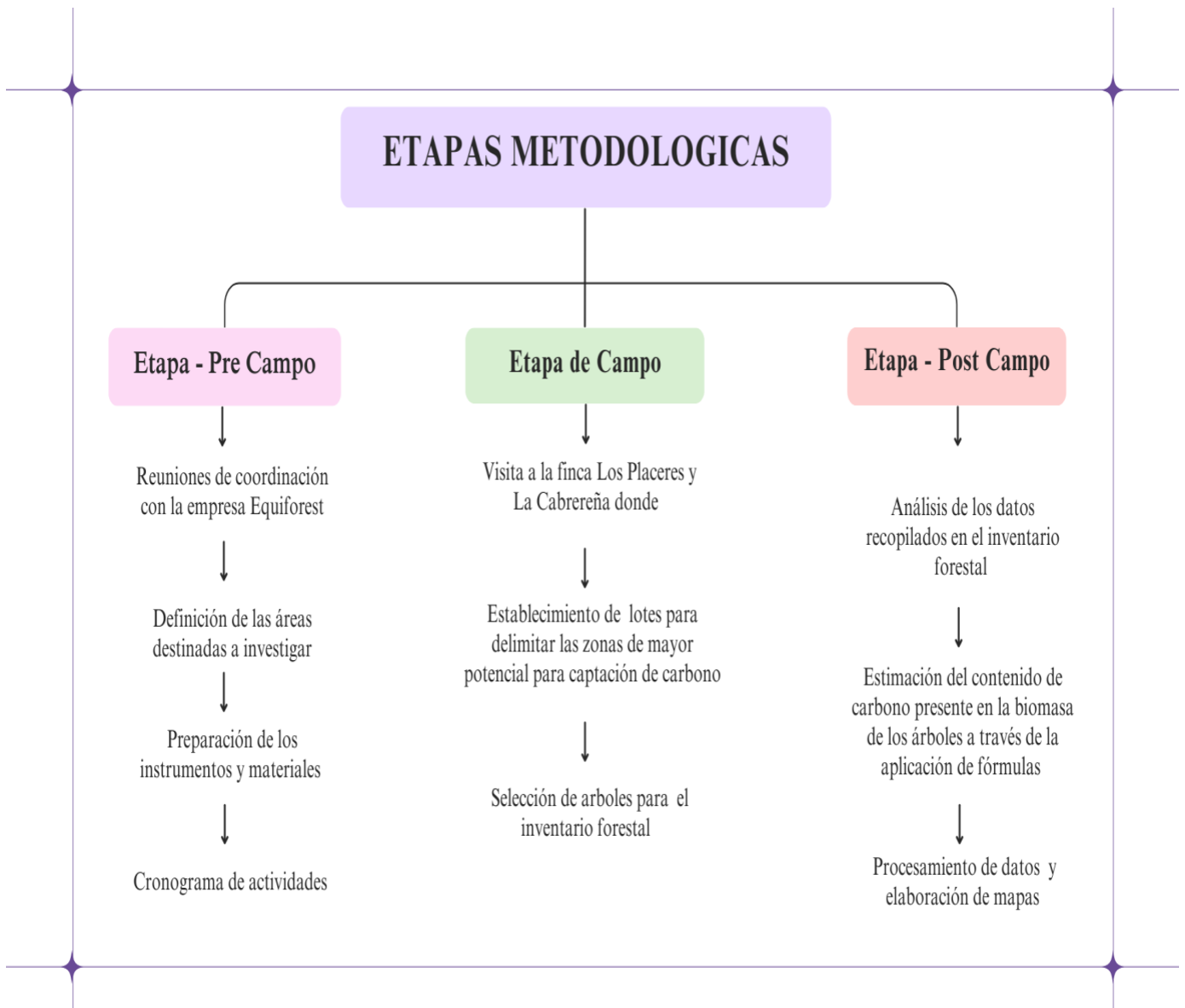


Figura 2. Etapas del proceso metodológico.

4.6.Criterios de selección de las fincas

Misma plantaciones, accesibilidad y edades.

Se seleccionaron las fincas La Cabrereña y Los Placeres debido a que ambas poseen áreas de plantaciones de teca sometidas a manejo silvicultural, ambas fincas rondan con plantaciones de edades similares y porque ambas están accesibles al municipio y son partes de la organización Equiforest.

Interés de la organización para estudios en sus plantaciones.

Uno de los criterios considerados fue el interés manifiesto de la empresa Equiforest en apoyar la investigación y optimizar el manejo de las plantaciones, con miras a incrementar la captura de carbono en dichas áreas. Asimismo, se valoró la oportunidad de sentar las bases para investigaciones futuras en otras fincas forestales administradas por la organización.

El contenido de carbono y determinación de la biomasa.

El estudio incluyó la determinación de la biomasa y el contenido de carbono de las plantaciones de las fincas, evaluando de tal manera la composición de la especie y su estructura en la población arbórea de los terrenos agrícolas convertidos en bosques en el municipio de Nandaime. Posteriormente se identificaron todos los árboles con un diámetro a la altura del pecho (DAP) superior a 10 cm, los cuales fueron seleccionados aleatoriamente dentro de los lotes bajo estudio.

Para medir la biomasa aérea (árboles en pie) y el volumen existente, se utilizó un método no destructivo, minimizando así el impacto sobre el ecosistema. La recuperación de la vegetación arbórea en antiguos campos agrícolas ha avanzado de manera satisfactoria, constituyendo un método viable para la restauración forestal. Sin embargo, es fundamental implementar medidas de protección y conservación para evitar perturbaciones, tanto naturales como antropogénicas, que puedan revertir el proceso de sucesión.

Según Huerta, en los años 60, la mayoría de las áreas boscosas de Nandaime fueron deforestadas y usados en la producción de granos básicos y áreas ganaderas, los campos fueron recientemente

abandonados y están siendo colonizados por un joven bosque secundario. El área era agrícola y fue abandonado hace 17 años con fines de convertirlo en área boscosa forestal.

4.7. Fincas seleccionadas

Para seleccionar las fincas, se coordinó con la empresa Equiforest, una reunión que llevo la finalidad de organizar dicho trabajo ya que previamente se han desarrollado otros estudios silviculturales junto con la Universidad Nacional Agraria (UNA). Fruto de esta colaboración, se asignaron dos fincas cuyos propietarios accedieron a facilitar sus terrenos para la realización del presente estudio (Cuadro 1).

Cuadro 1. Datos de las fincas seleccionadas

Municipio	Nombre de la finca	Nombre propietario	Coordenadas	
			UTM X	UTM Y
Nandaime	La Cabrereña	Equiforest	1301718	1303181
Nandaime	Los Placeres	Equiforest	0597899	1301718

5.1. Descripción de la Especie

Tectona grandis, conocida comúnmente como teca, es una especie arbórea perteneciente a la familia *Lamiaceae*, originaria del sudeste asiático. Se caracteriza por su rápido crecimiento en forma recta, madera dura y resistencia a la descomposición, lo que la convierte en una especie altamente cotizada en el mercado maderero (Chávez, 2011). En el siguiente cuadro se presenta la clasificación taxonómica de la especie.

Cuadro 2. Descripción de nomenclatura

Nomenclatura	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Dicotyledonae
Orden	Lamiales
Familia	Lamiaceae (Verbenaceae)
Genero	Tectona
Especie	<i>Tectona grandis</i> L. f.

Fuente: (Fonseca, 2018).



Figura 3. Plantación de la especie en estudio (*Tectona grandis*)

Las plantaciones en estudio comprenden árboles de edades entre 10 y 15 años, con un manejo que incluye podas periódicas. Por lo tanto, la selección de los árboles muestreados, se contó con la colaboración de Equiforest, que se encargó de escoger individuos representativos de diversas clases diamétricas. Esta selección cuidadosa garantiza una estimación precisa de la biomasa y del contenido de carbono, asegurando que los datos obtenidos reflejen la variabilidad y estructura de la población arbórea en las plantaciones estudiadas.

5.2. Inventario forestal

El inventario forestal se llevó a cabo mediante un muestreo aleatorio estratificado, en el cual se evaluaron para cada árbol, registrando dos parámetros clave, siendo estos la altura total y el diámetro a la altura del pecho que se mide 1.30 metros arriba del suelo. Inicialmente, se planeó la medición de 50 árboles; sin embargo, debido a limitaciones logísticas y a las condiciones climáticas, se logró

medir un total de 43 árboles, distribuidos en dos fincas: 24 en la finca La Cabrereña y 19 en Los Placeres.

Inventario en lotes

Se establecieron dos lotes de muestreo en cada una de las fincas seleccionadas: La Cabrereña y Los Placeres. En estos lotes, se realizó un muestreo aleatorio de árboles con diámetros a partir de 10 cm. En la Finca La Cabrereña, se midieron 24 árboles, mientras que en la Finca Los Placeres se midieron 19 árboles.

Registro de las especies

Durante el inventario aleatorio, se identificó la especie *Tectona grandis* (teca) en cada lote, ya que es la especie objetivo del estudio. Para cada árbol, se tomaron datos clave, como el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total, que son esenciales para estimar la biomasa y posteriormente el carbono almacenado en las plantaciones.

Medición de diámetro del árbol

El diámetro a la altura del pecho (DAP) se midió a 1.30 metros del suelo utilizando una cinta métrica para asegurar la precisión. Por otro lado, la altura de cada árbol se estimó con un clinómetro. Estos parámetros son cruciales para la estimación precisa de la biomasa aérea en el área de estudio.

Cada árbol, fue seleccionado de manera aleatoria dentro de los lotes definidos dentro de las fincas, permitiendo que dicha muestra abarcara una gama representativa de diámetros, tanto arboles jóvenes como arboles maduros, proporcionando una buena base para evaluar el almacenamiento de carbono, ya que el diámetro de los árboles está directamente relacionado con la cantidad de biomasa que pueden acumular.

Clase Diamétrica	Rango de: 15 – 20 cm >20 cm	Donde: DAP: Diámetro a la altura al pecho.
-----------------------------------	--	---

Estimación de altura total en los arboles

El proceso para la recolección de los datos de la altura de cada árbol comenzó con la selección del árbol a medir, asegurando que la base del tronco estuviera visible y accesible. Luego el observador se posiciono a una distancia aproximadamente 10 a 15 metros del árbol, para tener una visión completa del tronco y la copa, por lo cual, a esa distancia, el observador apunto con el clinómetro hacia la parte más alta del árbol (el ápice) y posteriormente, el observador dirigió el clinómetro hacia la base del árbol y registro la altura correspondiente.

Rango de:

15 – 20 m

>20 m

Determinación de biomasa en plantaciones de teca

Para la cuantificación de biomasa en este estudio se consideró únicamente la biomasa aérea, es decir, la masa por encima del suelo, utilizando un método no destructivo, utilizando las mediciones del DAP y la altura total. Por lo tanto, para determinar la biomasa aérea en las plantaciones de Teca (*Tectona grandis*), fue estimada través de los componentes principales del árbol, que incluyen las ramas, el fuste y las hojas, dicho proceso se realizó utilizando los datos recolectados en el campo, principalmente el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) y la altura total de cada árbol, debido a que la forma de los árboles suele correlacionarse con su tamaño, lo que implica que el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total explican, en gran medida, la variación en el volumen debida a la forma, como también lo indican Emanuelli y Milla (2014). Para esto, se seleccionaron ejemplares sin daños ni defectos visibles, con el fin de incluir la mayor cantidad posible de clases diamétricas y alturas, siguiendo las recomendaciones de Barrios et al. (2014).

Biomasa Total	$B_t = B_f + B_c$	Donde: B_f: Biomasa total B_c: Biomasa de copa
----------------------	-------------------------------------	---

Determinación del Factor de Expansión (FEB)

El factor de expansión utilizado en este estudio determinado a partir de una investigación realizada por el Dr. Álvaro Noguera Talavera de la Universidad Nacional Agraria. Dicha investigación se llevó a cabo en plantaciones de **Tectona grandis**, administradas por la empresa Equiforest, con el fin de ajustar el factor de forma a las condiciones locales de crecimiento y manejo. El proceso consistió en medir variables clave, como el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) y la altura comercial de los árboles. Posteriormente, se calculó el volumen real de los árboles mediante la técnica destructiva, que incluyó el derribo de los árboles y el troceado en secciones de 2 metros. El factor de forma se definió como la relación entre el volumen real y el volumen teórico de un cilindro, derivado de la fórmula propuesta por Malleux y Montenegro (1971), permitiendo obtener un valor ajustado a las condiciones locales de crecimiento y manejo.

Estimación de almacenamiento de carbono

Una vez determinada la biomasa aérea, se procedió a estimar el contenido de carbono almacenado en los árboles, mediante ecuaciones alométricas que permiten relacionar las dimensiones de los árboles, como el DAP y la altura total, con la cantidad de carbono presente. Las fórmulas empleadas para este cálculo se detallan en el cuadro 4.

Cálculo de Carbono Almacenado	C= Bt*Dm	Donde: Bf: Biomasa total (Kg o Ton) Vf: Volumen del fuste (m3) Dm: Densidad de la madera (Kg/m3 ó Ton/m3)
--------------------------------------	-----------------	--

Documentación y registro de datos

Todo el proceso de inventario fue minuciosamente documentado, registrando de tal manera todos los datos recolectados en un formato de campo para respaldar la información recopilada. Posteriormente los datos se organizaron en una base de datos en Excel la cual facilito el análisis y la aplicación de fórmulas para después realizar los informes.

Análisis de datos y resultados

Los datos recolectados se analizaron para obtener estimaciones de la biomasa total y el almacenamiento de carbono presente en el área, estos análisis contribuyen a la interpretación de los resultados del estudio.

Cuadro 3. Materiales utilizados en el inventario.

Materiales	Cantidad	Descripción
Cinta Biodegradable	2	Se emplearon para marcar puntos específicos durante el estudio.
Forcmetro	1	Utilizado para medir con precisión el diámetro de los árboles.
GP S Garmin	1	Sirvió para obtener coordenadas geográficas exactas y rápidas de los puntos de interés.
Cinta Métrica	2	Usada para medir distancias en el área de estudio, con una longitud de 50 metros cada una.
Formato de Campo	100 hojas	Permitió registrar las características y datos de las variables estudiadas.
Tabla de Campo	2	Facilitó la toma de datos en el campo de manera ordenada y eficiente.
Brújula	1	Utilizada para determinar la orientación norte durante las mediciones.
Balanza	1	Empleada para pesar la biomasa recolectada de los árboles.

Cuadro 4. Ecuaciones y procedimientos.

Variables	Formulas	Descripción	Referencia
Clase Diamétrica	Rango de: 15 – 20 cm >20 cm	Donde: DAP: Diámetro a la altura al pecho.	INAFOR (2018)
Área Basal	AB= $\pi/4 * D^2$	Donde: AB: Área Basal en metros cuadrados (m ²) $\pi/4$: Constante 0.7854 D2: Diámetro medido a los 1.30 m sobre el nivel del suelo, expresados en centímetros.	CATIE (2014)
Volumen	Vol= AB* H*Ff	D onde: Vol: volumen en metros cúbicos (m ³). AB: área basal en m ² H: Altura total en (m) Ff: factor de forma 0.7 para especies de bosque latifoliados, según (INAFOR, 2009)	CATIE (2014)
Biomasa Aérea Forestal (FEBa)	Bt= V*GE*FEBa	Donde: Bt: Biomasa total arriba del suelo (ton) V: Volumen del fuste (m ³) GE: Densidad de la madera (t m ⁻³) 0.5 g cm ³ según (Brown, 1997). Feba: Factor de expansión de la biomasa (ramas, hojas) (es de 1.20, según FAO, 1998).	(Brown, 1979).

Factores de forma	-	Se utilizó el Factor de forma de 0.5 registrado en las plantaciones de T. grandis por el Dr. Alvaro Noguera Talavera	<i>(Reporte de Investigación Factor de Forma Teca EQUIFOREST, s. f.)</i>
Biomasa Total	Bt = Bf+Bc	Donde: Bf: Biomasa fustal Bc: Biomasa de copa	<i>FAO (1998).</i>
Cálculo de Carbono Almacenado	C= Bt*Dm	Donde: Bf: Biomasa total (Kg o Ton) Vf: Volumen del fuste (m3) Dm: Densidad de la madera (Kg/m3 ó Ton/m3)	<i>IPCC (2006).</i>
Cálculo de Dióxido de Carbono Fijado	CO2=Bt*Fc	Donde: CO2: Carbón fijado (ton) Bt: Biomasa total Fc: Fracción de carbono para fines prácticos (0.5)	IPCC (2003)

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Presentación e interpretación de resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de las variables evaluadas en las plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) en las fincas La Cabrereña y Los Place, destacando los valores relacionados con biomasa y almacenamiento de carbono. Con la interpretación de dichos datos nos permitirá aportar elementos relevantes para la gestión sostenible de las fincas analizadas.

6.2. Distribución geoespacial de los lotes de muestreo

En la finca Los Placeres y en la Finca La Cabrereña, se empleó un diseño de muestreo aleatorio para garantizar la representatividad de la muestra y minimizar sesgos en la medición de los parámetros dendrométricos.

Para cada árbol se registraron variables clave como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total y su ubicación geográfica precisa mediante GPS. Esta información permitió construir una base de datos espacial robusta, facilitando el análisis geoespacial de la distribución de los árboles en los lotes de muestreo.

Los mapas generados muestran la ubicación de los árboles evaluados, lo cual permite visualizar la cobertura y densidad de las plantaciones, así como identificar posibles patrones de distribución que podrían estar relacionados con factores edáficos o de manejo.

Las siguientes imágenes se muestra la distribución geoespacial de algunos de los árboles seleccionados en ambas fincas.

Figura 4. Mapa de la distribución de los árboles en los lotes de muestreo en la finca Los Placeres, Nandaime.

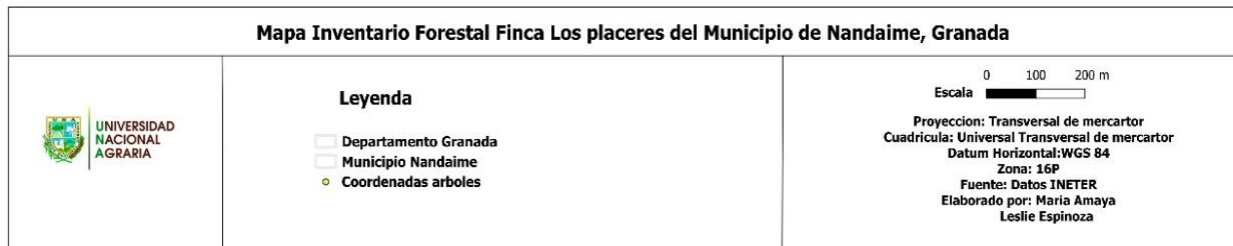
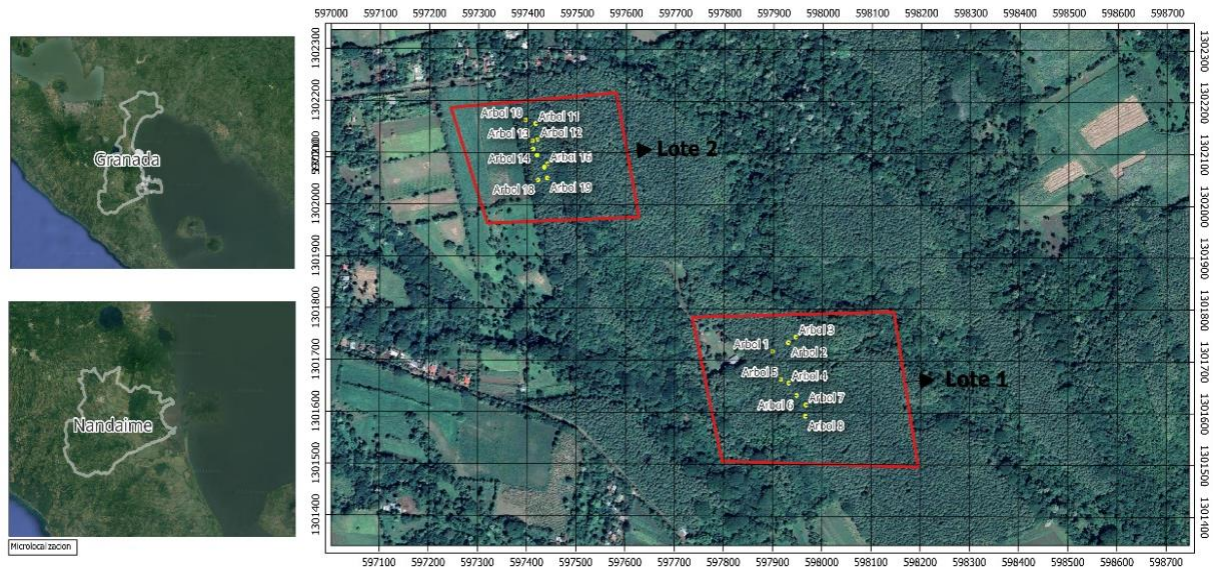
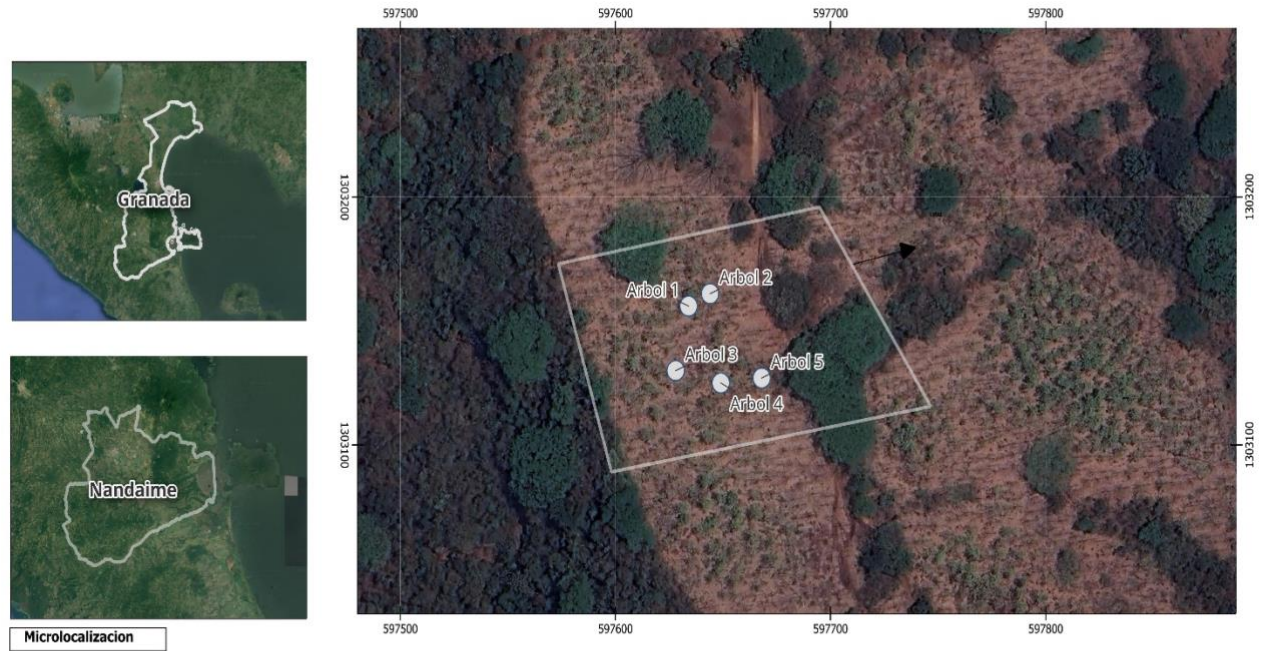


Figura 5. Mapa de la distribución de los árboles en los lotes de muestreo en la finca La Cabrereña, Nandaime.



6.3. Distribución de categorías diamétricas de árboles muestreados

La distribución de categorías diamétricas es clave para identificar patrones de crecimiento y estimar con mayor precisión la biomasa y el almacenamiento de carbono en función del diámetro de los árboles. (Acero & Martin, s. f.)

Al agrupar los árboles en tres categorías diamétricas (10-19.9 cm, 20-29.9 cm y 30-39.9 cm), se observa en el cuadro 5, que la mayor parte de los árboles se encuentra en la categoría de 20-29.9 cm, lo que indica existencia de población mayoritariamente joven y en fase de crecimiento, sin haber alcanzado su máximo potencial de crecimiento.

Cuadro 5. Distribución de categorías diamétricas.

Categoría Diamétrica	Numero de árboles de la muestra	Diámetro promedio
10-19.9	13	17.81
20 - 29.9	21	24.53
30 - 39.9	9	31.33
Total	43	23.69

Por otro lado, la categoría más baja (10-19.9 cm), con 13 árboles, puede indicar la presencia de árboles más jóvenes o aquellos que, por diversas razones (como condiciones del suelo o competencia por recursos), no han logrado alcanzar un crecimiento significativo. Estos árboles tienen el potencial de continuar su crecimiento y eventualmente pasar a la siguiente categoría diamétrica, lo que sugiere un proceso continuo de desarrollo en la plantación.

Al poseer un diámetro promedio general de 23.69 cm, confirma n indicador positivo del estado de desarrollo de la masa forestal evaluada. Este valor sugiere que los individuos presentes en la plantación han alcanzado un crecimiento significativo, propio de estructuras poblacionales saludables y dinámicas.

En la literatura, plantaciones tropicales jóvenes e intermedias de teca suelen mostrar dominancia de clases medias antes del incremento en diámetros altos, y los modelos alométricos basados en capturan bien estas variaciones si se reporta su ámbito de validez (Marroquín-Morales et al., 2023) Esta estructura es compatible con un manejo orientado a crecimiento rápido y con existencias de biomasa acordes a edades intermedias.

6.4. Evaluación del Volumen Fustal

La estimación de volumen fustal con corteza se realizó aplicando ecuaciones ajustadas para *Tectona grandis*, las cuales integran variables como DAP y altura total (Ht). Se observa que los árboles con diámetros superiores a 30 cm presentaban volúmenes entre 0.65 y 0.75 m³, siendo estos ejemplares los que aportaron mayor biomasa estructural.

Para arboles con DAP mayor o igual 30 cm se obtuvo un rango de 0.65–0.75 m³/árbol. Dentro del estudio, este intervalo es consistente con los listados de DAP y altura observados y con el pequeño diferencial en biomasa total entre fincas. En relación con otros estudios, las ecuaciones alométricas para trópicos que integran DAP y altura, mejoran la precisión y reducen sesgos si se respeta el rango diamétrico y el tipo de bosque para el cual fueron desarrolladas (Marroquín-Morales et al., 2023)

6.5. Biomasa Aérea

La estimación de biomasa aérea y en ambas fincas a partir del volumen fustal y considerando el factor de expansión de biomasa (FEB = 1.08) con la densidad básica (0.59 g/cm³), permitió evaluar la productividad forestal de las plantaciones de *Tectona grandis*, obteniendo los siguientes resultados en la siguiente tabla:

Cuadro 6. Biomasa aérea.

Finca	Biomasa por Aérea (ton)	Biomasa Total (ton/ha)
La Cabrereña	4.7577	5.4714
Los Placeres	4.8548	5.5830

Apartir del volumen fustal y aplicando $FEB = 1.08$ y $\rho = 0.59 \text{ g/cm}^3$, la biomasa aérea fue 4.76 t en La Cabrereña y 4.85 t en Los Placeres. Dentro del estudio, esta diferencia pequeña es coherente con la ligera mayor representación de árboles de DAP alto en la muestra conjunta de clase 30–39.9 cm. Según estudios realizados, la teca presenta densidad básica media–alta y alometrías estables en el trópico cuando se especifican FEB y ρ . Para estimaciones confiables requieren declarar la procedencia de ρ y el criterio del FEB aplicado (Brown, 1997; Marroquín-Morales et al., 2023)

Este resultado sugiere que los árboles de Los Placeres presentan un mejor desarrollo en su estructura aérea, lo cual podría estar relacionado con factores como: Mayor disponibilidad de luz debido a una distribución menos densa o un mejor manejo de podas. Condiciones edáficas más favorables, como suelos con mayor fertilidad o mejor capacidad de retención de agua. Menor competencia intraespecífica, permitiendo a los árboles desarrollar más biomasa por individuo.

Aunque la diferencia es moderada, refleja una tendencia de mayor productividad estructural en Los Placeres, lo cual influye directamente en las siguientes variables de análisis.

6.6.Biomasa Total

En cuanto a la biomasa total, que incluye además de la biomasa aérea cualquier componente adicional cuantificado (usando el factor de expansión), se estimaron los siguientes datos:

Cuadro 7. Biomasa total.

Finca	Biomasa Total (ton/ha)
La Cabrereña	5.4714
Los Placeres	5.5830

La biomasa total fue 5.47 t/ha en La Cabrereña y 5.58 t/ha en Los Placeres. Este patrón confirma la proximidad estructural entre plantaciones y la coherencia con los resultados de biomasa aérea. Trabajos en teca de Asia y Mesoamérica reportan existencias y trayectorias de biomasa acordes con

plantaciones de crecimiento rápido. Se encontraron que la variación entre sitios se explica por edad, espaciamiento y manejo (Fernández Moya, 2014; Marroquín-Morales et al., 2023).

La diferencia es de 0.1116 toneladas, reafirmando el patrón observado en la biomasa aérea.

La biomasa total depende directamente del volumen y densidad de la madera, así como del factor de expansión aplicado. En este sentido, la diferencia observada puede atribuirse a un mejor crecimiento en volumen en los árboles de Los Placeres, posiblemente derivado de un factor de forma más eficiente, lo cual implica que los troncos tienen una geometría más favorable para acumular volumen. Mayor altura o diámetro promedio en algunos individuos clave, que influye en el volumen y por tanto en la biomasa total. Diferencias micro ambientales que pueden favorecer el incremento de la biomasa en ciertos sitios.

Esta variable es clave, ya que está directamente relacionada con el potencial de captura de carbono de las plantaciones.

6.7.Contenido de Carbono Almacenado

A partir de la biomasa aérea estimada en cada finca, se procedió a calcular el contenido de carbono almacenado utilizando el factor de conversión del 0.5 (según IPCC) el cual representa el 50% de la biomasa seca de los árboles. Obteniendo los siguientes resultados:

Cuadro 8. En este cuadro se muestra la cantidad de carbono almacenado que genera cada una de las fincas.

Finca	Carbono Almacenado (ton/ha)
La Cabrereña	2.73 ton/ha
Los Placeres	2.79 ton/ha

Con la fracción de carbono aplicada en el estudio, el C almacenado fue 2.74 t/ha en La Cabrereña y 2.79 t/ha en Los Placeres (+0.06 t/ha). Dentro del estudio, la diferencia replica el orden observado en

biomasa total y es consistente con la estructura diamétrica conjunta. Comparación externa. Para reportes compatibles con inventarios, IPCC (2006) recomienda 0.47 como fracción por defecto cuando no hay valores específicos por especie/sitio; el uso explícito de una fracción declarada (p. ej., 0.50) es aceptable siempre que se justifique y se aplique en forma consistente (IPCC, 2006). Significancia. Diferencias pequeñas a escala de parcela pueden resultar relevantes al escalar a toda la plantación. Recomendación. Explorar fracciones específicas para teca/edad local (Tier 3) o justificar la adopción del valor por defecto con análisis de sensibilidad (IPCC, 2006). La diferencia entre ambas es de 0.0558 toneladas (55. 8 kg), lo cual representa una variación en la capacidad de almacenamiento de carbono.

Este resultado indica que, aunque ambas plantaciones tienen una alta capacidad de almacenamiento de carbono, Los Placeres presenta una ligera ventaja. Esto puede deberse a una mayor proporción de biomasa útil, donde se concentra la mayor parte del carbono. Diferencias en el estado de desarrollo de los árboles, aunque ambas plantaciones tienen edades similares, una leve ventaja en diámetro o altura puede aumentar considerablemente el contenido de carbono por árbol. Posible presencia de árboles con mejor conformación estructural, lo cual influye en la acumulación de carbono sin necesariamente requerir mayor cantidad de individuos.

Estos valores evidencian que ambas plantaciones de *Tectona grandis* funcionan como sumideros de carbono efectivos, resaltando que dichos valores indican un buen potencial en la captación de carbono, ya que contribuye a los esfuerzos de mitigación de cambio climático.

6.8.Fijación de Dióxido de Carbono

Cuadro 9. Se muestra en cantidad la fijación de dióxido de carbono almacenado en las dos fincas

Finca	Dióxido de Carbono (CO ₂)
La Cabrereña	10.0399 toneladas de CO ₂ fijado
Los Placeres	10.2448 toneladas de CO ₂ fijado

El CO₂e calculado fue 10.04 t/ha en La Cabrereña y 10.24 t/ha en Los Placeres. El orden coincide con los apartados previos y refleja una diferencia pequeña pero consistente entre fincas. Obteniendo una diferencia de 0.2049 toneladas, expresandose como 204.9 kg de diferencia.

Esta variable representa el aporte real de la plantación a la mitigación del cambio climático, ya que muestra cuánto CO₂ ha sido capturado de la atmósfera y almacenado en la biomasa arbórea.

6.9.Datos recopilados dentro de las dos fincas

Se muestra brevemente los datos obtenidos dentro de las dos fincas para realizar el estudio de evaluación de carbono.

Figura 6. Cuadro de los datos generales obtenidos en la Finca Los Placeres

Finca Los Placeres						Coordenadas	
ID Árbol	DAP	Altura (M)	PT Ho ja	PT Ramas	PT Fuste	X	Y
1	31.5	13.5	45.38	347.48	474.54	0597899	1301718
2	30	15.6	48.14	54.92	508.338	0597931	1301735
3	23	15	38.22	154.72	253.6	0597946	1301746
4	18	12	25.34	126.8	154.42	0597932	1301657
5	18.4	6.15	15.96	108.62	147.26	0597916	1301664
6	22.8	13	28.56	156.08	150.68	0597948	1301633
7	30	16	38.16	117.04	435.12	0597967	1301615

8	24	14.4	25.56	136.68	317.40	0597966	1301593
9	22.5	15	38.76	187	331.22	0597416	1302156
10	28	13.6	38.14	109.18	359.03	0597396	1302163
11	23.5	10	37.62	251.86	248.84	0597416	1302156
12	24	11	33.7	189.92	229.24	0597420	1302125
13	30	11.5	79.86	159.62	527.11	0597410	1302123
14	25	10.5	66.05	41.07	279.46	0597411	1302107
15	31.5	13.8	46.73	316.04	375.24	0597419	1302095
16	24.5	11	48.98	106.88	254.86	0597440	1302078
17	25	10.8	39.44	197.28	298.56	0597434	1302072
18	26.5	14.14	37.42	136.96	384.48	0597421	1302047
19	25.5	10.09	35.62	111.24	*	0597440	1302051

Figura 7. Cuadro de los datos obtenidos en la Finca La Cabrereña

Finca La Cabrereña						Coordenadas	
ID Árbol	DAP	Altura (M)	PT Hoja	PT Ramas	PT Fuste	X	Y
1	17	12.1	14.86	58	250.81		
2	16.5	10.4	15.04	41.38	158.34		
3	17.2	12.8	19.26	68.2	206.04		
4	22	11.9	29.04	102.88	239.78		
5	18.4	12	23.8	50.9	208.46		
6	19	10.1	16.06	60.96	190.3		
7	16.5	12.5	10.14	51.34	165.1		
8	19	11.6	22.24	114.36	255.2		
9	18	10.7	14.38	96.52	189.1		
10	19	10.05	14.06	54.76	192.86		
11	18.6	11.5	17.42	53.22	253.63		
12	16	9.65	14.1	53.42	137.4		
13	26	14	45.38	113.86	423.56		
14	25.6	14	19.3	118.96	421.68		
15	23.5	13	25.48	92.78	335.92		
16	31.5	16	41.88	215.92	507.58		

17	26.8	14.15	27.86	118.96	414.86		
18	21.3	11.74	23.72	102.98	261.78		
19	26.5	15	48.54	74.56	419.32	0597636	1303181
20	23.5	15	33.13	84.86	356.98	0597634	1303156
21	26.4	14.23	35.57	56.25	438.86	0597644	1303161
22	22.9	12.7	28.35	83.03	247.86	0597628	1303130
23	30.5	16.20	88.69	1332.06	680.89	0597649	1303125
24	33.5	17.40	43.40	210.08	560.12	0597668	1303127

La comparación integral de los 43 árboles medidos en ambas fincas muestra conjuntos muestrales cercanos en estructura y dimensiones, con Los Placeres en el rango DAP fue de 18.00–31.50 cm y altura fue de 6.15–16.00 m, y La Cabrereña obtuvo en DAP 16.00–33.50 cm y en altura 9.65–17.40 m. Esta superposición de rangos se refleja en la distribución por clases, la categoría 20–29.9 cm concentra 48.84 % del total ($n = 21$), seguida por 10–19.9 cm con 30.23 % ($n = 13$) y 30–39.9 cm con 20.93 % ($n = 9$). El DAP promedio general es 23.69 cm. Esta estructura combinada, con predominio de clases intermedias y una presencia no marginal de mayor o igual a 30 cm, explica que las diferencias entre fincas en biomasa, carbono y CO_{2e} sean pequeñas y coherentes en el signo, biomasa aérea +0.09 t (4.85 t en Los Placeres vs. 4.76 t en La Cabrereña), biomasa total +0.11 t/ha (5.58 vs. 5.47 t/ha), carbono +0.06 t/ha (2.79 vs. 2.74 t/ha) y CO_{2e} +0.20 t/ha (10.24 vs. 10.04 t/ha).

Estas magnitudes son expectables en plantaciones jóvenes–intermedias de *Tectona grandis* cuando la mayor parte de los individuos aún no migra masivamente a clases superiores, dado que los modelos alométricos DBH–H son particularmente sensibles a incrementos marginales de diámetro en ese tramo (Marroquín-Morales et al., 2023)

La consistencia entre la estructura diamétrica observada y los resultados de biomasa y carbono sugiere que las pequeñas diferencias entre fincas obedecen a un ligero mayor aporte de individuos en la clase 30–39.9 cm en el conjunto que incluye a Los Placeres. Esta lectura es compatible con la evidencia publicada para plantaciones de teca, donde el aumento del diámetro y la incorporación de altura en la ecuación alométrica elevan el volumen individual y, por extensión, la biomasa por árbol. (Fernández Moya, 2014; Marroquín-Morales et al., 2023)

Las existencias reportadas aquí se ubican en el rango esperado para etapas de desarrollo temprano–intermedio cuando se emplean fracciones de carbono definidas y ecuaciones calibradas al trópico. Por consiguiente la similitud estructural entre fincas respalda la validez de las comparaciones y sugiere que las diferencias observadas obedecen al leve mayor aporte de individuos en clases altas.

VI. CONCLUSIONES

La evaluación de la biomasa aérea en los componentes arbóreos (fuste, ramas y hojas) evidenció un desarrollo estructural favorable en ambas fincas analizadas. No obstante, la finca Los Placeres mostró una ligera superioridad en la acumulación de biomasa, lo cual podría atribuirse a condiciones edáficas más propicias y a la implementación de prácticas de manejo forestal más eficientes.

Las plantaciones de Teca en ambas fincas demostraron una notable capacidad de captura de carbono, validada mediante ecuaciones alométricas. Los resultados obtenidos confirman su papel como sumideros climáticos efectivos, subrayando el valor ecológico de estos sistemas forestales frente al cambio climático.

La comparación de los contenidos de carbono almacenado entre las fincas Los Placeres y La Cabrereña reveló una diferencia marginal de 55.8 kg de carbono y 204.9 kg de CO₂, ligeramente favorable a Los Placeres. Aunque mínima, esta variación pone de relieve el papel crucial que desempeñan las condiciones locales y las prácticas silviculturales en la eficacia de las plantaciones como mecanismos de mitigación ambiental.

VII. RECOMENDACIONES

Promover investigaciones sobre el contenido de carbono en el suelo y la materia orgánica la que conlleve a obtener una estimación más integral del almacenamiento total de carbono en las plantaciones de Teca, complementando así los datos existentes sobre biomasa aérea.

Promover estudios comparativos en plantaciones de Teca y replicar esta metodología la que permitirá contribuir a la creación de redes de monitoreo sistemáticas, fortaleciendo así las bases de datos nacionales relacionadas con dinámica forestal y captura de carbono.

Incorporar ecuación alométrica a los sistemas de productividad en las plantaciones de Teca para evaluar el potencial de las plantaciones forestales comerciales como servicios ambientales a fin de mitigar las emisiones de CO₂.

VIII. LITERATURA CITADA

Acero, C. P. M., & Martin, L. T. C. (s. f.). *DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y DINÁMICA DE LA BIOMASA DEL BOSQUE ALTO ANDINO EN GUASCA, CUNDINAMARCA*.

Ashton, M. S., Tyrrell, M. L., Spalding, D., & Gentry, B. (Eds.). (2012). *Managing Forest Carbon in a Changing Climate*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2232-3>

Brown, S. (with FAO). (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer*. FAO.

E. Jiménez, A. Landeta. (2010). “Producción de biomasa y fijación de carbono en plantaciones de teca. Litoral: Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción.

Ecologistas en acción. (Septiembre de 2023). Obtenido de Captura y almacenamiento del carbono: <https://www.ecologistasenaccion.org/22923/captura-y-almacenamiento-del-carbono/>

Eggleston, H. S. (Ed.). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Institute for Global Environmental Strategies.

Fernández Moya, J. (2014). *Gestión de la fertilidad de suelos y la nutrición de plantaciones de teca (Tectona grandis L.f.) en América Central* [PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.30870>

Fonseca, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 51(2), 91. <https://doi.org/10.15359/rca.51-2.5>

García, B. R. K. A. (Julio, 2019). Cuantificación de la biomasa, dióxido de carbono (CO₂) y carbono almacenado en bosques y sistemas silvopastoriles en siete fincas del municipio de Boaco - Camoapa. Universidad Nacional Agraria.

- Ipcc. (2022). *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty* (1.^a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>
- López, H. G. (2018). Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía costarricense*, 1-2.
- Marroquín-Morales, P., Jiménez-Pérez, J., Yarena-Yamallel, J. I., & Reyes-Reyes, J. (2023). Modelos alométricos para estimar biomasa aérea en una plantación de *Tectona grandis* L. F. en Yucatán. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2).
<https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3566>
- Para, C., & Glosario, E. (s/f). Con el apoyo de. Locomotive.works. Recuperado el 20 de octubre de 2023, de
https://cdn.locomotive.works/sites/5ab410c8a2f42204838f797e/content_entry5bd2cef214ad66059b9ca126/6011fbb92d5f3d00a53803fa/files/20210111_C40_CAP_Lexicon_Spanish.pdf?1616500485
- Pérez-López, Eloísa, Santiago-García, Wenceslao, Quiñonez-Barraza, Gerónimo, Rodríguez-Ortiz, Gerardo, Santiago-García, Elías, & Ruiz-Aquino, Faustino. (2019). Estimación de distribuciones diamétricas para *Pinus patula* con la función Weibull. *Madera y bosques*, 25(3), e2531626. Epub 15 de mayo de 2020.<https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531626>
- Pérez-Vázquez, Z. R., Ángeles-Pérez, G., Chávez-Vergara, B., Valdez-Lazalde, J. R., & Ramírez-Guzmán, M. E. (2021). Enfoque espacial para modelación de carbono en el mantillo de

bosques bajo manejo forestal maderable. *Madera y Bosques*, 27(1).

<https://doi.org/10.21829/myb.2021.2712122>

Bra. Ronda Yuri Connolly Wilson Br. Carlos Abel Corea Siu. (2007). Cuantificación de la captura y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales y forestales en seis sitios de cuatro municipios de Nicaragua. Universidad Nacional Agraria.

Rodríguez, B. R. D. F. (Diciembre 2016). Evaluación del Carbono Almacenado en la biomasa, necromasa y carbono orgánico del suelo de tres diferentes hábitats en la península de osa, Costa Rica. Universidad Nacional.

Sáenz Reyes, J. T., Rueda Sánchez, A., Benavides Solorio, J. de D., Muñoz Flores, H. J., Castillo Quiroz, D., Sáenz Ceja, J. E., Sáenz Reyes, J. T., Rueda Sánchez, A., Benavides Solorio, J. de D., Muñoz Flores, H. J., Castillo Quiroz, D., & Sáenz Ceja, J. E. (2021). Ecuaciones alométricas, biomasa y carbono en plantaciones forestales tropicales en la costa de Jalisco. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 12(65), 26-44.

<https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.856>

Suárez, L. N. (2015). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en armero-guayabal, tolima, colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 1.

IX. ANEXOS

I. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Cuadro 1. Tiempo necesario para realizar el estudio



VIII. PLANOS DE CAMPO

Cuadro 2. Formato para levantamiento de datos

Nombre de la Finca:						Coordenadas	
ID Árbol	DAP	Altura (M)	PT Hoja	PT Ramas	PT Fuste	X	Y

Cuadro 3. Formato para registros de datos GPS y otras observaciones.

ID Árbol:			
Nº Troza	Mayor (M)	Menor (M)	Long Troza (M)

1. PRESUPUESTO

Viáticos de Alimentación.	Cantidad	Costo Unitario	Total \$
Docentes	4	30	270
Estudiantes	4	12	108
Baquianos	4	20	180
Materiales			
Resmas de papel	2	5	10
Memoria USB 8 GB	1	5	5
Tabla de Campo	2	3	6
Libreta	1	2	2
Fotocopia	60	0.050	3
Elaboración de Tesis			
Impresión de Hojas de Color	120	2	240
Pre Defensa	2	3	6
(Documento engargolado)			
Defensa	4	5	20
(Documento Engargolado)			
Documento final	8	10	80
(Empastado)			
Total			930