



*“Por un Desarrollo
Agrario
Integral y Sostenible”*

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE**

Trabajo de Tesis

Evaluación del potencial productivo y
almacenamiento de carbono del sistema de
plantación forestal en la finca Eco-forestal
de la Empresa Agroforestal S.A; San Juan
del Sur, Rivas

Autor

Br. Marcelo de Jesús Villalobos Flores

Asesores

Ing. Claudio González

MSc. Jannette Gutiérrez

MSc. Javier López

Managua, Nicaragua

2023





*“Por un Desarrollo
Agrario
Integral y Sostenible”*

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE**

Trabajo de Tesis

Evaluación del potencial productivo y
almacenamiento de carbono del sistema de
plantación forestal en la finca Eco-forestal
de la Empresa Agroforestal S.A; San Juan
del Sur, Rivas

Autor

Br. Marcelo de Jesús Villalobos Flores

Asesores

Ing. Claudio González

MSc. Jannette Gutiérrez

MSc. Javier López

Managua, Nicaragua

2023

Hoja de aprobación del tribunal examinador

El presente trabajo de graduación fue evaluado y aprobado por el honorable tribunal examinador designado por la Decanatura de la Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente, como requisito parcial para obtener el título de:

Ingeniero en Recursos Naturales con mención en Gestión Ambiental

Miembros del Tribunal Examinador

Presidente

Secretario

Vocal

Lugar y fecha:

Managua, febrero 2023

DEDICATORIA

A Dios porque me dio la vida, la sabiduría necesaria para sacar adelante esta investigación, me dio la serenidad de afrontar los retos y las situaciones difíciles en el sendero de la vida, por trazar un camino que me ha permitido tener una apertura intelectual y que siempre me ha llevado a un sinfín de oportunidades y nuevos retos.

"El que no sabe lo que busca, no entiende lo que encuentra"

A mi querida madre Elsa María Flores Barboza, a mi abuelo Daniel Narváez Holman, mi abuela Flor Flores Rivera, mi más sincera gratitud por el tiempo, esfuerzo y recursos invertidos en mi formación profesional, por siempre inculcarme valores importantes como la sencillez, el respeto, la honestidad y la dedicación en cada una de mis actividades emprendidas, acciones que me orientaron hacia un buen camino con cada consejo y correcciones que me hicieron. Por todo ello y por el apoyo moral que siempre he tenido de su parte, este logro es dedicado a ustedes con todo el cariño y amor por haber sido mi inspiración y ejemplo en la auto superación y en mi anhelo de seguir adelante en el camino del saber.

"Corona de los viejos son los nietos y honra de los hijos son sus padres." -Proverbios 17:6

A mis tíos Johana Torres Flores, José Daniel Narváez Flores, por ser un ejemplo de superación personal y profesional, por siempre aconsejarme y darme ánimos y fuerzas en los momentos más duros en donde no sabía qué camino tomar, por su apoyo económico incondicional el cual me permitió seguir con mi formación profesional y sobre todas las cosas gracias por siempre creer en mí en todo momento.

"Me has hecho mejor y una persona más sabia, mil gracias por tu apoyo y por compartir conmigo tu sabiduría. "

AGRADECIMIENTOS

Ofrezco mis más sinceros agradecimientos;

A la Universidad Nacional Agraria (UNA). Por acogerme y formarme en valores e intelectualmente, por brindarme la oportunidad ascender un escalón más en la vida. Agradezco a la facultad de Recursos Naturales y el ambiente (FARENA), por compartir sus conocimientos y forjar el intelecto en sus aulas que recordaré por siempre debido a los grandes amigos y profesores que nos dedicaron su tiempo y esfuerzo por hacer este sueño realidad de ser Ing. En Recursos Naturales.

Al Dr. Álvaro Noguera, por ser la persona que tomó las piezas de un rompecabezas que estaba incompleto y lograr la construcción de una persona con una visión diferente de la vida. MSc. Claudio Calero, Por la inmejorable disponibilidad de tiempo y esfuerzo que brindo para atender las dudas o platicar un momento de todo y nada a la vez, por nunca limitarse en compartir sus conocimientos. MSc. Jannette Gutiérrez, por la oportunidad que me brindó de ser su pupilo y alumno ayudante durante estos dos últimos años, por todo ello, mis más sinceros agradecimientos.

Al Br. Byron Robles Reyes y Br. Dayana Jirón Gaitán quienes siempre me motivaron a seguir adelante con esta investigación y muchas veces me quitaron el hambre, por los buenos y malos momentos que compartimos en la UNEN, por todos esos viajes en donde construimos muy buenos proyectos de crecimiento estudiantil, de igual forma recordar los momentos amargos de pánico de los encerramientos que nos dejaron mensajes positivos de que nada en la vida es fácil y siempre uno debe pensar muy bien las cosas y recrear todos los escenarios posibles antes de tomar una decisión. Por todos los momentos que vivimos juntos en la universidad estos 3 últimos años mis más sinceros agradecimientos.

Al Ing. Samir Solís Flores y Ing. Silvio Aguilar mis dos compañeros de clases con los cuales compartí a lo largo de los 5 años de la carrera grandiosos momentos llenos de despertar intelectual y conciencia colectiva, siempre recordare las noches de estudio en el internado en donde encontramos nuestro lugar sagrado en los quioscos de FDR. En donde muchas veces amanecimos terminando trabajos y platicando muchas cosas sobre nuestras vidas, por las giras de campo excepcionales donde siempre destacamos utilizando estrategias de extensión para compartir nuestros conocimientos con las demás personas, por todas las metas que nos hemos puesto como equipo a lo largo de nuestras vidas y que tengo fe de que lograremos muchas cosas positivas en el marco de las ciencias ambientales, solo me queda decirles muchas gracias, más que colegas son hermanos de otra madre a como siempre nos hemos dicho.

INDICE DE CONTENIDO

SECCIÓN	PÁGINA
DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
INDICE DE CONTENIDO	III
ÍNDICE DE CUADROS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE ANEXOS	VII
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
ACRONIMOS	X
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1. GENERAL	3
2.2. ESPECÍFICOS	3
III. MARCO DE REFERENCIA	4
3.1. CONCEPTOS GENERALES	4
3.1.1. Biomasa	4
3.1.2. Carbono fijado	5
3.1.3. Almacenamiento de carbono	5
3.5. EL DIÓXIDO DE CARBONO	8
3.5.1. Dióxido de carbono (CO ₂) y su rol en el efecto de invernadero	8
3.5.2. Opciones de mitigación para las emisiones de dióxido de carbono	9
3.6. PLANTACIONES FORESTALES COMO SUMIDEROS DE CARBONO	9
3.6.1. Métodos para la estimación de la biomasa de Árboles	10
3.7. VALORACIÓN ECONÓMICA AMBIENTAL	12
3.8. GEOESTADÍSTICA	13
3.8.1. Funciones de correlación espacial	15
3.8.2. Kriging	16
3.8.3. Simulación geoestadística	17
3.8.4. Aplicaciones de la geoestadística en el manejo silvicultural	18
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	19
4.1. TIPIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	19
4.2. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	21
4.2.1. Descripción del área	21
4.2.2. Ubicación geográfica	21
4.2.3. Límites de la propiedad y accesibilidad	21
4.3. CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	22
4.3.1. Características del relieve, altura y suelos	22

4.3.2.	Clima del área de estudio	23
4.3.3.	Hidrología del área de estudio	23
4.3.4.	Flora del área de estudio	23
4.3.5.	Fauna del área de estudio	25
4.3.6.	Especies establecidas en lotes de la plantación	26
4.4.	MATERIALES	30
4.4.1.	Materiales y equipos de Campo	30
4.4.2.	Inventario Forestal	31
	B. Levantamiento de datos de campo	35
	C. Medición de variables cuantitativas y descriptivas	36
4.4.3.	Manejo y procesamiento de datos	38
4.4.4.	Estimación del volumen comercial de la plantación	39
4.4.5.	Estimación de la biomasa aérea y raíces de la plantación	40
4.4.6.	Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea	41
4.4.7.	Estimación del carbono almacenado en las raíces	41
4.4.8.	Estimación del carbono total almacenado en la plantación forestal.	41
4.4.9.	Estimación de carbono y volumen mediante el uso de SIG	42
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
5.1.	Estimación del volumen comercial de la plantación	45
5.1.1	Análisis estadístico del diámetro y altura	45
5.1.2.	Correlación entre el DAP y altura comercial.	47
5.1.3.	Comparación entre la distribución de las especies en el año 2005 y 2021	48
5.1.4.	Estimación del volumen de madera en cada lote	50
5.2.	Estimación de la biomasa aérea, raíces y total de los lotes de la plantación	52
5.2.1.	Biomasa aérea	52
5.2.2.	Biomasa de las raíces	53
5.2.3.	Biomasa total	54
5.3.	Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea	56
5.4.	Estimación del carbono almacenado en las raíces	57
5.5.	Estimación del carbono total almacenado en la plantación forestal	58
5.6.	Cartografía de la distribución espacial de variables forestales utilizando SIG	60
VI.	CONCLUSIONES	66
VII.	RECOMENDACIONES	67
VIII.	LITERATURA CITADA	68
XIX.	ANEXOS	71

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO		PAGINA
1	Diversidad faunística presente en la finca	25
2	Especies establecidas en lotes de la plantación	26
3	Principales requerimientos ecológicos de las especies	27
4	Resumen de lotes establecidos por especies y año	27
5	Tabla de materiales utilizados en campo.	30
6	Lotes y parcelas permanentes de monitoreo para su inventario forestal.	34
7	Códigos de variables de campo	36
8	Códigos para describir condiciones propias de la parcela	38
9	Ecuación alométrica utilizada en el cálculo de biomasa aérea en bosques y plantaciones del trópico seco.	40

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		PAGINA
1	Partes de un árbol para medir biomasa	11
2	Mapa de ubicación de la finca eco-forestal.	22
3	Mapa de la distribución de puntos de muestreo.	29
4	Diseño de la unidad de muestreo	31
5	Tamaño y forma de las parcelas establecidas	32
6	Organización del trabajo en campo	33
7	Estimación de altura comercial y total en campo	37
8	Diagrama de flujo metodológico sistema de información geográfica	42
9	Ejemplo análisis de tendencia visual para la variable idr del grupo de datos. tendencia eje yz (izq.) y tendencia eje zx (der).	43
10	Histograma del dap y altura, con densidad de probabilidad	45
11	Diagrama de dispersión y coeficiente de correlación lineal.	47
12	Comparación de datos de abundancia porcentual 2005-2021.	49
13	Agrupación de lotes por su rango de volumen en m ³ .	50
14	Agrupación de los lotes en rangos de biomasa aérea	52
15	Agrupación de los lotes en rangos de biomasa de las raíces	53
16	Agrupación de los lotes en rangos de biomasa total	54
17	Carbono aéreo almacenado en los lotes ordenado por rangos.	56
18	Carbono de las raíces almacenado en los lotes ordenado por rangos.	57
19	Carbono total almacenado en los lotes ordenado por rangos.	58
20	Mapa de la distribución de la densidad de volumen de la finca eco-forestal, en el periodo 2021-2022	61
21	Mapa de la distribución de la densidad de carbono, de la finca eco-forestal, en el periodo 2021-2022.	63

ÍNDICE DE ANEXOS

SECCIÓN		PAGINA
1	Diseño del inventario forestal y distribución de roles de trabajo	72
2	Levantamiento de datos en campo	72
3	Formato de campo	74
4	Plano de campo de los lotes en la finca eco-forestal	75
5	Inscripción de la plantación forestal	76
6	Tabla de cálculo de volumen m ³ .	77
7	Tabla de biomasa aérea, raíces y total estimado por el método de ecuaciones alométricas.	78
8	Tabla de cálculo de carbono aéreo, raíces y total almacenado en cada lote	79

RESUMEN

Los sistemas forestales y agroforestales son unos de los grandes sumideros del CO₂, que contribuye al secuestro de carbono atmosférico para la realización de su fotosíntesis y acumulación de biomasa. El manejo técnico de las plantaciones forestales comerciales (PFC), fundamentado en herramientas silvícolas confiables, es la base que garantiza la rentabilidad de la inversión y la adecuada planeación del manejo forestal para un aprovechamiento sostenido a largo plazo. Este trabajo tuvo como principales ejes de investigación la de estimar el volumen comercial, la biomasa aérea, subterránea y el Carbono almacenado en una plantación mixta, San Juan del Sur, Rivas, Nicaragua. Se utilizó información dasométrica de 7455 árboles que conformaron el inventario forestal, de entre 12, 16 y 23 años de establecidas. Se determinó que las poblaciones son estadísticamente diferentes en términos de forma o densidad esto por la diferencia en años de establecimiento de los lotes. El coeficiente de correlación de Pearson (relación altura/diámetro) obtenido fue positivo de 0.45, indicando que hay una correlación positiva moderada. El presente estudio tiene el objetivo de estimar el potencial productivo y estimar el almacenamiento de carbono mediante método de interpolación espacial kriging ordinario logarítmico, en sistema de plantación forestal mixta de 20 años de establecimiento en el trópico seco de Nicaragua, con la finalidad de generar mapas bastante precisos. Se estimó el potencial productivo de la plantación estimando el volumen en m³, que estaba presente en cada parcela permanente de muestreo de 0.25 hectárea y se hizo la proyección tomando en cuenta ese dato y la extensión en área de cada lote, obteniendo un volumen total de la plantación aproximado de 122,288.75 m³, aprovechables con un diámetro promedio de 20 cm. Para la estimación de carbono fijado en las fuentes de la biomasa aérea y Raíces, se ubicaron parcelas rectangulares de 2 500 m² en los lotes de la plantación forestal. Para la estimación de la biomasa aérea, se utilizó una ecuación alométrica realizada en los bosques secos de Costa Rica con vegetación y condiciones edafoclimática muy parecidas al área de estudio por el Dr. Fonseca G. en el año 2016. La biomasa de las raíces se estimó en base a un porcentaje (15 %) con respecto a la biomasa aérea (H.W. Vogelmann, 1995). Para el cálculo de carbono almacenado de la biomasa aérea y raíces, se utilizó un factor de carbono de 0.5, aprobado por el IPCC. El sistema de plantación estudiado presentó un almacenamiento de carbono total de (12,836 tC/ha), entre las que se puede dividir en carbono aéreo total almacenado (11,160 tC/ha), y carbono total de las raíces almacenado (1674 tC/ha).

Palabras clave: Ecuaciones alométricas, cambio climático, geoestadística, interpolación espacial, kriging ordinario logarítmico

ABSTRACT

Forestry and agroforestry systems are one of the great sinks of CO₂, which contributes to the sequestration of atmospheric carbon for the realization of its photosynthesis and accumulation of biomass. The technical management of commercial forest plantations (PFC), based on reliable silvicultural tools, is the basis that guarantees the profitability of the investment and the adequate planning of forest management for a sustained use in the long term. This work had as main lines of research to estimate the commercial volume, aboveground and underground biomass and stored Carbon in a mixed plantation, San Juan del Sur, Rivas, Nicaragua. Dendrometric information of 7455 trees that made up the forest inventory, between 12, 16 and 23 years old, was used. It was determined that the populations are statistically different in terms of shape or density, due to the difference in years of establishment of the lots. It was determined that the populations are statistically different in terms of shape or density, due to the difference in years of establishment of the lots. The Pearson correlation coefficient (height/diameter ratio) obtained was positive of 0.45, indicating that there is a moderate positive correlation. The objective of this study is to estimate the productive potential and estimate carbon storage using the logarithmic ordinary kriging spatial interpolation method, in a 20-year-old mixed forest plantation system in the dry tropics of Nicaragua, in order to generate maps pretty accurate. The productive potential of the plantation was estimated by estimating the volume in m³, which was present in each permanent sampling plot of 0.25 hectare and the projection was made taking into account this data and the area extension of each lot, obtaining a total volume of the approximate plantation of 122,288.75 m³, usable with an average diameter of 20 cm. For the estimation of carbon fixed in the sources of aerial biomass and roots, rectangular plots of 2 500 m² were located in the forest plantation lots. For the estimation of the aerial biomass, an allometric equation was used, carried out in the dry forests of Costa Rica with vegetation and edaphoclimatic conditions very similar to the study area by Dr. Fonseca G. in 2016. The biomass of the roots was estimated based on a percentage (15 %) with respect to aerial biomass (H.W. Vogelmann, 1995). For the calculation of carbon stored in aerial biomass and roots, a carbon factor of 0.5, approved by the IPCC, was used. The plantation system studied presented a total carbon storage of (12,836 tC/ha), which can be divided into total aerial carbon stored (11,160 tC/ha), and total root carbon stored (1674 tC/ha).

ACRONIMOS

Universidad Nacional Agraria (UNA)

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio climático (IPCC)

Gestión ambiental (G.A)

Plantaciones forestales comerciales (PFC)

Dióxido de carbono (CO₂)

Metano (CH₄)

Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA)

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)

Reducing emissions from deforestation and forest degradation (REDD+)

Comisión centroamericana de ambiente y desarrollo (CCAD)

Gases de efecto Invernadero (GEI)

Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES)

Toneladas (t)

Hectárea (Ha)

Incremento Medio Anual (IMA)

Milímetros (mm)

Diámetro a la altura del pecho (DAP)

Área Basal (AB)

Recursos Naturales (RRNN)

Biomasa Aérea (BA)

Biomasa de las raíces BR)

Carbono en la biomasa aérea (CBA)

Carbono en la biomasa de las raíces (CBR)

I. INTRODUCCIÓN

En el ámbito mundial existe preocupación por el calentamiento de la tierra, debido a las emisiones de gases causando el efecto invernadero. Las principales causas de este cambio climático a grandes rasgos son las siguientes: los cambios en el uso del suelo, la deforestación y el aumento de las actividades industriales ha provocado un aumento en la producción de gases con efecto invernadero. Estos gases son: metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y dióxido de carbono (CO₂), (Fernández, 1991).

Con el propósito de mitigar la emisión de CO₂, el cual ha sido clasificado como uno de los gases con efecto invernadero más abundante en el planeta, se ha considerado a las plantaciones como una forma viable de compensación de los daños provocados por la acumulación de este gas. La fijación de carbono se genera en el proceso de fotosíntesis realizado por las hojas y otras partes de las plantas que capturan el CO₂ de la atmósfera, liberan oxígeno y dejan carbono que se utiliza para el proceso de crecimiento, aumentando su masa vegetal y radicular (Cuéllar et al., 1999).

Una de las opciones para prevenir el cambio climático es la captura y almacenamiento de Carbono; es un método con un alto potencial para reducir los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera (Benea, 2017). CO₂ es absorbido por la vegetación a través de la de fotosíntesis y el suelo de los ecosistemas por medio de la dinámica del carbono que consta de los aportes de material vegetal muerto, su pérdida por mineralización y su acumulación por humificación, siendo los suelos los que almacenan mayor cantidad (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2015).

De acuerdo con (Morales, 2001), establecer sistemas forestales contribuye al almacenamiento de carbono, que con un buen manejo de la plantación puede controlar los niveles de CO₂ en la atmósfera. Otras actividades de uso de la tierra que pueden contribuir a este fin son: el manejo forestal; conservación y rehabilitación de los bosques nativos; forestación, reforestación; agricultura y la agroforestería puede hacer una contribución significativa en el control de los niveles de CO₂ en la atmósfera (Cubero y Rojas, 1996).

La importancia del estudio es brindar información confiable para el manejo silvícola sostenible mediante los resultados obtenidos de la investigación dará lugar a elevar la competitividad y productividad maderable, establecimiento de plantaciones forestales comerciales (PFC) y el manejo forestal sostenible de los bosques naturales, deberán estar

basados en herramientas técnicas confiables por esta razón este estudio toma como punto de partida el levantamiento de un inventario forestal y lista de cotejos de calidad de sitio.

La información recopilada y la metodología expresada en esta tesis permitirá facilitar información de utilidad para la venta de carbono producto de la plantación exótica de caoba africana (*Khaya senegalensis*) y demás plantaciones de especies nativas que administra la Empresa Agroforestal S, A. las relaciones funcionales entre las variables del árbol son confiables en la estimación del volumen total y comercial, además el ajuste de sus expresiones matemáticas maximiza el volumen a obtener y ayuda a los dueños e inversionistas a tomar mejores decisiones.

El presente estudio pretende generar información de campo, sobre la capacidad de fijación de carbono en el sistema de plantación forestal (Eco-forestal), así mismo, conocer la potencialidad del servicio ambiental de fijación de carbono, para futuras venta de carbono en el mercado internacional.

II. OBJETIVOS

2.1. General

Generar información para evaluar el potencial productivo y almacenamiento de carbono en la plantación forestal de la finca Eco-forestal de la Empresa Agroforestal, S.A. para la toma de decisiones y gestión de los recursos económicos.

2.2. Específicos

1. Analizar estadísticamente el comportamiento de las variables dasométricas que contribuyen a mejorar el manejo forestal y la producción de madera de la empresa Agroforestal S.A.
2. Determinar el carbono almacenado en la biomasa aérea y raíces en plantaciones forestales comerciales mediante la aplicación de ecuaciones alométricas.
3. Crear cartografía de la distribución espacial de variables dasométricas en las plantaciones de la empresa Agroforestal S.A; utilizando métodos de geoestadística.

III. MARCO DE REFERENCIA

3.1. Conceptos generales

3.1.1. Biomasa

El total de materia orgánica seca o el contenido almacenado de energía de los organismos vivos (Zamora et al., 2000).

La biomasa se refiere al peso o masa del tejido de una planta viva (Walker et al., 2011) que se generó a partir de procesos fotosintéticos (Nájera, 1999) y se clasifica en biomasa aérea y subterránea (Schlegel et al., 2000; Walker et al., 2011). La estimación más común es el cálculo de biomasa seca, la cual es el peso del tejido de la planta después de quitar por completo el agua. Aproximadamente, el 50 % de la biomasa seca total es Carbono (Walker et al., 2011).

La estimación de la biomasa y su dinámica de acumulación en el tiempo contribuyen al conocimiento de la evolución del ecosistema, los flujos de energía y nutrientes permiten determinar el potencial de los sistemas forestales (Dieguez-Aranda et al., 2009) y la cantidad de Carbono capturado por unidad de superficie (Schlegel et al., 2000) ya sea en bosques naturales o Plantaciones forestales comerciales (PFC).

La biomasa total por árbol y su distribución por componente (hojas, ramas y tallo) es influenciada por los factores climáticos y edáficos, la competencia por luz dentro del rodal o plantación (densidad) y la carga genética por individuo (Villegas-Jiménez et al., 2013). Dicha estimación es expresada en cantidad de materia orgánica (volumen en m³) existente en un ecosistema por unidad de superficie (Schlegel et al., 2000; Dieguez-Aranda et al., 2009; Walker et al., 2011).

La modelación de la biomasa y Carbono de los rodales forestales se puede hacer mediante funciones lineales, alométricas, logarítmicas (Dieguez-Aranda et al., 2009; Picar et al., 2012) o exponenciales que incluyen variables independientes como el diámetro a la altura de 1.3 m y la altura total del árbol en la estimación confiable de estas variables dependientes (Velasco et al., 2012) para poder tomarlas en cuenta en la planeación de las actividades de manejo forestal.

Las variables volumen, biomasa, y cantidad de Carbono por hectárea estimados de manera precisa son una herramienta esencial en la planeación del manejo forestal que le permiten al administrador, identificar y considerar factores diversos de crecimiento y rendimiento simultáneamente en el tiempo y espacio para lograr un aprovechamiento sostenido a largo plazo de las PFC establecidas.

3.1.2. Carbono fijado

Se refiere a la cantidad de carbono que una unidad de área cubierta por vegetación tiene la capacidad de captar en un período de tiempo determinado (Segura, 1999).

3.1.3. Almacenamiento de carbono

Se refiere a la capacidad del bosque para mantener una determinada cantidad promedio de carbono por hectárea, que será liberado gradualmente a la atmósfera en un tiempo determinado. La unidad de medida es mega gramo de carbono (Mg C). Ejemplo: Carbono en suelo forestales (Segura, 1997 citado por Pérez. et al., 2005).

3.2. Los gases de efecto invernadero antropogénicos y el riesgo al cambio climático

El informe más reciente del IPCC concluyó que el balance de la evidencia sugiere una influencia humana discernible en el clima. Este mismo informe señala que un incremento en la temperatura media global de 2 °C en el presente siglo significaría, un incremento potencial del nivel del mar hasta de un metro, afectando así cuantiosas zonas costeras, también se espera una mayor incidencia de eventos climáticos extremos y menor cantidad de precipitación, lo cual afectaría directa o indirectamente a todos los sectores productivos del país como se expone en un documento publicado antes por el Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales (MARENA 2001) sobre el impacto del cambio climático en Nicaragua.

Se ha identificado que las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de las actividades humanas son la principal causa del cambio climático global. Los gases de efecto invernadero inducidos por las actividades humanas son principalmente los siguientes: Dióxido de carbono (CO₂), Metano (CH₄) óxido nitroso (N₂O). De estos el dióxido de carbono es el mayor contribuyente al calentamiento global.

Una de las actividades humanas que más contribuyen a agravar el efecto invernadero es el consumo de energía. No sólo representa el 65% de las emisiones de (CO_2), sino parte importante de las emisiones de metano (en las explotaciones de gas natural y carbón) y de las emisiones de óxidos nitrosos, principalmente por las centrales energéticas que utilizan carbón. Cantidades enormes de CO_2 entran cada año a la atmósfera como consecuencia de la quema generalizada de combustibles fósiles (carbón, petróleo o gas natural) (Ibrahim et al., 2007).

3.3. Cambio climático

Por cambio climático se entiende, un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural observada del clima durante períodos de tiempo comparables (Pérez et al., 2005). Las variaciones climáticas están influenciadas por cambios naturales, como por el efecto del desarrollo de las sociedades humanas (Pérez et al., 2005).

Con el inicio de la era industrial, a mediados del siglo XVIII, la actividad humana aceleró su incidencia sobre los recursos naturales para crear los productos y servicios que demanda la sociedad. De tal manera que el desarrollo industrial, como parte del desenvolvimiento socioeconómico, ha alterado directa o indirectamente la composición de la atmósfera mundial, la cual es responsable de una modificación del intercambio energético entre el sol, la superficie terrestre y el espacio sideral, a través del fenómeno llamado efecto invernadero (Pérez et al., 2005).

El cambio climático según el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) se refiere a cualquier cambio del clima en el transcurso del tiempo ya sea por razón de su variabilidad natural o como resultado de actividades humanas. Una de las causas principales del cambio global del clima, es el incremento de las concentraciones del carbono atmosférico. Los ecosistemas forestales juegan un rol fundamental; posteriormente, actuando como reservorios de carbono (al fijar carbono a través de la fotosíntesis), y no ópticamente, como fuentes de carbono (a través de la deforestación, descomposición y respiración del suelo).

Los mayores flujos de CO_2 entre océanos, bosques y atmósfera, ocurren naturalmente. Pero las emisiones producto de la quema de combustibles fósiles, y la producción de cemento

alteran el balance natural y aumentan el nivel de CO₂ de la atmósfera, modificando la estabilidad climática. El impacto humano sobre los suelos y los bosques es un factor clave, la plantación de árboles remueve el CO₂ atmosférico a medida que la vegetación crece, en un proceso llamado fijación de carbono según (Carranza et al., 1996); citado por (Cubero y Rojas, 1996).

3.4. Efecto invernadero

El efecto invernadero es un fenómeno natural, provocado por el hombre en una amenaza para su propia seguridad, al ser alterado debido principalmente al consumo de energía generada por la combustión de derivados del petróleo, gas natural y carbón mineral, además de la destrucción de bosques, particularmente en el trópico (Pérez et al., 2005). Es un fenómeno natural que ha permitido el desarrollo de la vida en el planeta. Es causado por la presencia de gases en la atmósfera, principalmente vapor de agua y gas carbónico, permitiendo la retención de parte de la energía calórica que recibe del sol, y el mantenimiento de una temperatura dentro de límites que han permitido el desarrollo de la vida (Landeta, 2009).

El efecto invernadero no es, por sí mismo, una amenaza a la vida en la tierra. El problema actual radica en que la actividad humana ha aumentado la concentración de CO₂ y otros gases en la atmósfera. Una mayor cantidad de energía calórica solar tiende así a permanecer atrapada en la atmósfera, elevando la temperatura promedio del planeta (Castro y Calvas, 2005).

La energía solar que atraviesa la atmósfera en forma de luz visible debe liberarse al espacio dentro de determinado periodo de tiempo en las mismas proporciones en que fue absorbida por la tierra, no obstante, parte de esta energía es retenida por el vapor de agua y otros gases presentes en la atmósfera, impidiendo que esta sea devuelta de inmediato y dando lugar al fenómeno llamado “efecto invernadero” (Pérez et al., 2005).

Si persisten las tendencias actuales, se pronostica que la concentración de CO₂ en la atmósfera se duplicara respecto al nivel de la revolución pre – industrial llegando a unos 260 ppm para el año 2065. Esto influirá en el clima global y regional probablemente. Se pronostica un aumento de 2 a 5 °C, aumentando más con la latitud y tendrá mayores efectos en los ecosistemas septentrionales IPCC, citado por Andrade, (1999).

3.5. El dióxido de carbono

Gas producido naturalmente, también es un derivado de la quema de combustibles fósiles y de la biomasa, así como de los cambios de uso de suelo y otros procesos industriales.

Es un gas natural y el principal resultante de acciones antropogénicas del planeta ocasionando de efecto invernadero que afecta a la temperatura de la tierra. Es el gas de referencia sobre el cual los otros gases de efecto invernaderos son catalogados con un potencial de calentamiento global. El dióxido de carbono constituye aproximadamente un 0.036% de la composición de la atmósfera (Pérez et al., 2005).

3.5.1. Dióxido de carbono (CO₂) y su rol en el efecto de invernadero

El CO₂ es considerado uno de los gases de mayor influencia en el efecto de invernadero, se considera necesario e importante conocer un poco acerca del comportamiento del carbono en la superficie de la tierra y su papel en la atmósfera, la cual de forma resumida parte del ciclo del carbono.

El ciclo del carbono es considerado como un conjunto de cuatro depósitos interconectados: la atmósfera, la biosfera terrestre (incluyendo los sistemas de agua dulce), los océanos y los sedimentos (incluso los sedimentos fósiles). Estos depósitos son fuentes que cumplen la opción de liberar el carbono, o de ser sumideros que absorben carbono de otra parte del ciclo (Ciesla., 1996).

La emisión antropológica del carbono en la atmósfera perturba el equilibrio del ciclo del carbono y contribuye a la acumulación de 3.4 mil millones de toneladas de carbono por año en la atmósfera, lo que representa un crecimiento en la tasa de carbono atmosférico en el orden de 0.5 % por año (Locatelli, 1999).

El carbono se encuentra en la atmósfera en forma de dióxido de carbono y es removido de esta durante la fotosíntesis para la formación principalmente de carbohidratos (a esta acción se le conoce como captura, almacenamiento o secuestro).

La tasa de producción de biomasa potencial de una planta depende entre otras cosas, de su tasa de formación de carbohidratos, la velocidad de crecimiento y duración de su ciclo de vida (IPPC, 2001 a).

Tomando en cuenta que todas las plantas y animales realizan respiración, este proceso causa una disminución de oxígeno y un incremento de Dióxido de carbono atmosférico (Hall et al., 1994). Cuando una planta o una parte de ella mueren, la liberación del carbono fijado en tejidos vivos es liberada a la atmósfera en forma de Dióxido de carbono por medio del proceso de descomposición (Finnegan et al., 1997).

La captura de carbono está asociada con la restauración de la vegetación después del abandono de las tierras deforestadas, el crecimiento de los bosques jóvenes ya sean plantaciones o bosques secundarios, y el crecimiento neto de bosques primarios. Desde el punto de vista del cambio de uso de la tierra, la liberación del carbono a la atmósfera está asociada con la tala del bosque para la agricultura, la explotación comercial de los bosques y el incremento de la oxidación de la materia orgánica en los suelos (Ericsson et al., 1993).

3.5.2. Opciones de mitigación para las emisiones de dióxido de carbono

Una de las medidas de mitigación para disminuir o mantener los niveles actuales de CO₂ es la conservación de los bosques tropicales y el manejo de los sistemas forestales. Lo anterior, basado en que las plantas a través del proceso de fotosíntesis toman el dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera, incorporan el carbono (C) a su estructura y liberan oxígeno (O₂).

Las plantaciones forestales, ya sean para la producción de madera industrial, producción de leña, protección de áreas seleccionadas, recuperación de tierras degradadas o el fortalecimiento de prácticas agroforestales, contribuyen a contrarrestar el efecto invernadero, sirven como mecanismos de captación de CO₂ y disminuyen la presión sobre los bosques naturales, preservándolos como depósitos de carbono (Castro y Calvas, 2005).

3.6. Plantaciones forestales como sumideros de carbono

Una plantación forestal se define, según FAO (2001), como un bosque establecido mediante plantación y/o siembra en el proceso de forestación o reforestación. Está integrada por especies introducidas o en algunos casos autóctonas. Además, 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 ser ecosistemas cuyo manejo se orienta a

maximizar el volumen en madera por unidad de área, lo que da como resultado una fijación de carbono elevada y por ende contribuyen a la limpieza de la atmósfera.

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 (Kanninen y Montero, 2007). Asamadu (1999) citado por Calderón, (2003) estima que una plantación arbórea sana y en los mejores sitios absorbe alrededor de 10 t C ha⁻¹ año⁻¹ de la atmósfera, dependiendo de las condiciones del lugar. Además de una tasa de producción de biomasa alta y otra característica importante a tomar en cuenta es el tiempo de permanencia de la plantación hasta su aprovechamiento final (Beaumont 1999; Finegan y Delgado 1997) citado por Calderón, 2003.

La cantidad de carbono acumulado en las plantaciones forestales está directamente relacionada con el Incremento Medio Anual (IMA) en biomasa de fustes, de ramas y en follaje (Cubero y Rojas, 1999). La tasa de fijación de carbono está en función de la especie, el índice de sitio, el turno, el índice anual de fijación de carbono es más alto en las plantaciones jóvenes; es decir, las que se encuentran en pleno crecimiento (Morales, 2001).

3.6.1. Métodos para la estimación de la biomasa de Árboles

Para determinar la biomasa de los árboles y generar sus ecuaciones alométricas se utilizan métodos directos o destructivos que implican la destrucción de los árboles evaluados, ya que como lo indican Fehse, et al. (2002) los métodos directos se basan en el derribo y pesaje de la vegetación. Por ello, debido a que no siempre es posible derribar y destruir los árboles a evaluar para generar sus ecuaciones alométricas, la mayoría de los trabajos acerca del tema Acosta et al. (2002); Díaz et al. (2007); Juárez (2008); Avendaño et al. (2009); han utilizado métodos destructivos para estimar la biomasa y se han enfocado en evaluar principalmente especies de interés maderable.

Las reservas de carbono se estiman a partir de la biomasa del árbol, es decir, a partir de la masa seca de materia orgánica. Para obtener el valor de biomasa es necesario por tanto pesar todos los elementos constitutivos de un árbol (Figura 1). Estas medidas se hacen difíciles o imposibles a escala de bosque por dos razones: (1) se trata de mediciones destructivas y, por lo tanto, es indeseable o está prohibido efectuarlas a gran escala, (2) el costo y el tiempo necesario para el trabajo son excesivos. Con respecto a la biomasa subterránea, además, el

trabajo de medición es aún más desafiante y, muchas veces, en lugar de medirla directamente, se calcula a través de factores de multiplicación específicos a partir de la biomasa aérea.

Otro método más accesible para obtener una estimación de la biomasa de un árbol consiste en utilizar la relación existente entre el diámetro del árbol y de la biomasa. Es en este nivel las ecuaciones entran en juego. La alometría estudia las relaciones existentes entre las características dimensionales de los individuos en una población.

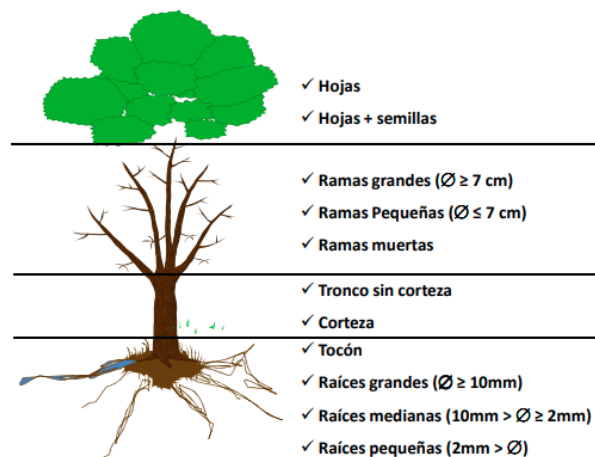


Figura 1. Partes de un árbol para medir biomasa

Fuente: (Velasco et al., 2012)

De hecho, existe una relación estadística entre cantidades fáciles de medir a gran escala (diámetro, altura, densidad de madera) y variables difíciles de medir, como la biomasa o el volumen. Por lo tanto, las mediciones costosas y destructivas podrán ser limitadas a una muestra de árboles y tendrán como objetivo identificar estadísticamente los parámetros alométricos para todo el conjunto de árboles presente en el área de investigación.

“La validez de las ecuaciones alométricas está basada en el hecho de que existe una relación proporcional entre los crecimientos relativos de los componentes de un individuo.” (“Resumen del manual de construcción de ecuaciones ... - GlobAllomeTree”) La biomasa de un árbol está relacionada con su diámetro.

3.7. Valoración económica ambiental

“La valoración económica ambiental permite asignar valores cuantitativos a los bienes y servicios proporcionados por recursos naturales, independientemente de si existen o no precios de mercado que ayuden a hacerlo (Convención Ramsar, 1997).” (“Alcances y Limitaciones de la Valoración Económica Ambiental”) Es decir, la misma corresponde a una traducción de la importancia de los servicios proporcionados por la naturaleza, en términos económicos.

En particular, en el contexto de la valoración económica de bienes y servicios del ecosistema, la estimación del valor se hace con base en las variaciones en el bienestar social por efecto de cambios en la calidad o cantidad de servicios ecosistémicos.

En este sentido, es preciso identificar claramente cuál es el servicio ecosistémico que está siendo afectado, en qué sentido se podría afectar el bienestar social (positiva o negativamente), cuáles son las características de la población afectada, cuál es el mecanismo a través del cual se presentará dicho cambio y qué información hay disponible para la valoración.

Una vez se tiene claro este contexto y se ha seleccionado la metodología, ésta se debe aplicar de forma estricta, seleccionando adecuadamente la muestra, utilizando la mejor información disponible, haciendo un buen diseño econométrico y reduciendo al máximo las posibles fuentes de errores y sesgos de medición. “Para cada metodología existe un conjunto de buenas prácticas que deben ser tenidas en cuenta para garantizar que los valores estimados sean los más robustos posibles.” (“Alcances y Limitaciones de la Valoración Económica Ambiental”)

Teniendo en cuenta lo anterior, la valoración económica ambiental permite estimar los beneficios y costos asociados a los cambios en los ecosistemas que afectan el bienestar social, al conmensurar las variaciones del bienestar a través de unidades monetarias. (“Alcances y Limitaciones de la Valoración Económica Ambiental”) Una vez cuantificadas, estas afectaciones pueden ser incorporadas como indicadores que aportan información en los procesos de toma de decisiones relacionadas con la evaluación social de proyectos o políticas públicas; en particular, aquellas decisiones relacionadas con el aprovechamiento sostenible del ambiente y la conservación de los recursos naturales.

Otro aspecto estratégico para almacenar carbono es el mercado de carbono conocido como Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD+), que otorga beneficios económicos a los propietarios que protejan sus recursos forestales, mejoren su gestión y los utilicen de manera sostenible (Finanzas Carbono 2017).

Desde finales del siglo pasado se evaluó el potencial de carbono fijado y capturado para los países de Centro América con el fin de medir su potencial con respecto a la mitigación de los efectos de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), como se plantea en el documento elaborado para Costa Rica en 1998 (PROARCA y CAPAS 1998).

Son estudios de la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD) que operan dentro del marco de trabajo sobre cambio climático a nivel regional, con el fin de facilitar el proceso de fortalecimiento de las capacidades para desarrollar las oportunidades que tiene este mercado de carbono.

3.8. Geoestadística

La geoestadística tiene como objetivo proporcionar descripciones cuantitativas de variables naturales, distribuidos en el espacio o, en el tiempo y espacio (Chilès and Delfiner, 2012, p. 1). Ejemplos de tales variables son:

- Leyes de mineral en un depósito mineral.
- Profundidad y espesor de una capa geológica.
- Porosidad y permeabilidad en un medio poroso.
- Densidad de árboles de una determinada especie en un bosque.
- Propiedades del suelo en una región.
- Precipitación sobre una zona de captación
- Presión, temperatura y velocidad del viento en la atmósfera.
- Concentraciones de contaminantes en un sitio contaminado.

La Geoestadística tuvo sus inicios en Sudáfrica con el trabajo de H.S Sichel, con una aplicación de la distribución log-normal a una mina de oro. Este fue seguido por la famosa contribución de D.G. Krige y se consolidó con la tesis doctoral de G. Matheron en 1965, con el desarrollo de la “Teoría de variables regionalizadas”.

La geoestadística es entendida como el estudio de las variables numéricas distribuidas en el espacio cuyo estimador es el kriging, término creado por G. Matheron en 1962, que tiene como objetivo encontrar el mejor estimador lineal insesgado. El uso de la geoestadística se ha generalizado en los últimos años convirtiéndose en una herramienta útil para explicar la variación de propiedades en el espacio, donde se conoce el rango de influencia de la propiedad, se estima su valor en sitios donde no existe información y, por último, permite calcular el error de la estimación efectuada (González et al., 2007).

Desde que Matheron (1970) formula su Teoría de Variables Regionalizadas en 1970, los métodos geoestadísticos han tenido una progresiva y amplia aceptación en un amplio espectro del ámbito científico, como metodología capaz de dar una respuesta adecuada a problemas “prácticos” relacionados con la estimación o simulación de variables espaciales. Esta teoría se fundamenta en la interpretación de las variables experimentales como variables regionalizadas, es decir como variables caracterizadas por una distribución espacial y una estructura de variabilidad espacial (o de correlación espacial) (Olmo, 2005).

Algunas características importantes de las variables regionalizadas se detallan a continuación (Matheron, 1963, p. 1249):

- Es localizada.
- Puede mostrar mayor o menor continuidad en su variación espacial. En algunas circunstancias, esta continuidad no será confirmada y se habla de “efecto pepita”.
- Puede mostrar diferentes tipos de anisotropías, es decir, en una dirección no muestra una variación significativa, mientras que en otra dirección varía rápidamente.

La geoestadística asocia la aleatoriedad con la variable regionalizada en sí, mediante el uso de un modelo estocástico en el que la variable regionalizada se considera una de las muchas posibles realizaciones de una función aleatoria (Chilès and Delfiner, 2012, p. 3). En la literatura una función aleatoria es también llamada proceso estocástico cuando x varía en un espacio 1D (tiempo) y es definido como un campo aleatorio cuando x varía en un espacio de más de una dimensión (Chilès and Delfiner, 2012, p. 12).

El análisis espacial de datos experimentales constituye un tema importante en cualquier proyecto relacionado con el estudio del medioambiente. Con gran frecuencia, este análisis persigue el objetivo de crear información temática cartográfica, a modo de mapas que representen de la forma más fiable posible la distribución de la variable experimental en el

área de estudio. Además, es muy posible que dicha información sea posteriormente integrada con otras informaciones incluidas en la base de datos SIG (Olmo, 2005).

Los interpoladores espaciales pueden dividirse en dos grupos: determinísticos y estadísticos.

- a) **Métodos determinísticos:** No se le asigna ningún comportamiento aleatorio o estocástico a la variable de interés y las predicciones obtenidas dependen del grado de similitud o suavizamiento entre los puntos (Torres, 2017). El interpolador determinista más utilizado es el Inverso de la Distancia Ponderada (IDW), que, para la predicción de lugares no muestreados, utiliza informaciones de puntos muestreados que circundan el lugar de la predicción, es decir, los puntos muestreados vecinos (Guedes et al., 2012).

- b) **Métodos estadísticos:** Emplean las propiedades estadísticas de los datos para predecir, se conocen como la familia de los Kriging, encontrándose el ordinario, simple, universal, probabilístico, indicador, disyuntivo, entre otros (Torres, 2017). El “krigado” es un interpolador estadístico que estima valores en puntos no muestreados a partir de informaciones de los puntos muestreados, considerando la estructura de dependencia espacial de la característica en estudio (Guedes et al., 2012).

Las técnicas de estimación geoestadística como los krigeados son los mejores estimadores lineales recomendados dado que minimizan la estimación en la varianza del error, pero presentan fuerte dependencia en el número de datos, la posición espacial y no reproducen la correlación espacial (Torres, 2017).

“Cuando el objetivo es hacer predicción, la geoestadística opera básicamente en dos etapas.” (“Capítulo Dos - eio.usc.es”) La primera es el análisis estructural, en la cual se describe la correlación entre puntos en el espacio. En la segunda fase se hace predicción en sitios de la región no muestreados por medio de la técnica Kriging. Este es un proceso que calcula un promedio ponderado de las observaciones muestrales. Los pesos asignados a los valores muestrales son apropiadamente determinados por la estructura espacial de correlación establecida en la primera etapa y por la configuración de muestreo (Giraldo, 2002).

3.8.1. Funciones de correlación espacial

La primera etapa en el desarrollo de un análisis geoestadístico es la determinación de la dependencia espacial entre los datos medidos de una variable. Esta fase es también conocida

como análisis estructural. Para llevarla a cabo, con base en la información muestral, se usa principalmente la función de semivariograma.

Es obvio que un gran número de las variables forestales y, en general, medioambientales pueden ser interpretadas como variables regionalizadas, área basal, biomasa y la producción maderable. Estas variables poseen un carácter aleatorio, que induce a la noción de variable aleatoria (pero sin asumir la independencia entre variables como preconiza la estadística clásica) y un carácter estructural, propio de cada fenómeno estudiado o regionalización, definido por la función variograma.

El semivariograma (también denominado variograma por simplicidad), es un modelo estadístico de dependencia espacial estructural, es la herramienta más común en geoestadística para caracterizar la continuidad espacial (Akhavan et al., 2010). El variograma indica el grado de similitud entre los valores de una variable cuando las muestras están en incrementos de distancia secuenciales llamados distancias de retardo, alejadas unas de otras y en una dirección específica. (Webster y Oliver citados por Akhavan et al., 2010).

Para interpretar el semivariograma experimental se parte del criterio de que a menor distancia entre los sitios mayor similitud o correlación espacial entre las observaciones. Por ello, en presencia de autocorrelación se espera que para valores de h pequeños el semivariograma experimental tenga magnitudes menores a las que esta toma cuando las distancias h se incrementan (Giraldo, 2002).

3.8.2. Kriging

“La palabra kriging (expresión anglosajona) procede del nombre del geólogo sudafricano D. G. Krige, cuyos trabajos en la predicción de reservas de oro, realizados en la década del cincuenta, suelen considerarse como pioneros en los métodos de interpolación espacial.” Kriging encierra un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción (Giraldo, 2002).

Kriging es el método geoestadístico de predicción. La correlación espacial permite predecir valores para sitios no muestreados desde los datos muestreados. Si las muestras no están correlacionadas en el espacio, el mejor estimador de $Z(x)$ sería la media global $E[Z(x)] = m$. El kriging usa el variograma o la función de covarianza como modelo de la continuidad geoespacial y estima los puntos no muestreados sobre esta base (Zhang and Yao, 2008, p. 183).

La predicción por kriging es una suma lineal ponderada de los datos. Las predicciones se pueden realizar para puntos o bloques, usando kriging puntual o kriging de bloques, respectivamente.

Kriging ordinario

“El kriging ordinario es el más general y utilizado de los métodos kriging y es el predeterminado.” (“Cómo funciona Kriging-ArcGIS Pro | Documentación - Esri”) Presupone que el valor medio constante es desconocido. “El kriging ordinario se usa cuando la variable es estacionaria con covarianza conocida y media desconocida.” (“Kriging Ordinario e Inverso A La Distancia | PDF - Scribd”) (“Kriging Ordinario e Inverso A La Distancia | PDF - Scribd”) Aunque el proceso es similar al del Kriging simple, no se puede centrar la variable, ya que no se conoce μ , así que es necesario trabajar directamente con la variable en estudio Z (Bohórquez, 2012).

Previo a la realización del kriging o predicción de la variable de interés es necesario realizar las siguientes actividades:

- Análisis exploratorio de datos.
- Análisis de outliers.
- Cálculo del variograma experimental en una o varias direcciones.
- Ajuste del variograma experimental a un modelo teórico para obtener el variograma ajustado.
- Generación de la grilla (puntos no muestreados) para definición del sector a predecir.

3.8.3. Simulación geoestadística

Una simulación consiste en construir una variable regionalizada parecida a la variable de estudio, es decir, que reproduce su continuidad espacial y también coincide con los valores medidos en los sitios con datos. Se recurre a las técnicas de simulación porque el conocimiento exhaustivo de la variable real es imposible, por falta de tiempo y presupuesto o a causa de obstáculos naturales. Estas técnicas se apoyan en la interpretación de la variable aleatoria como una realización de una función aleatoria y en el modelamiento de su distribución espacial (Emery, 2013, p. 95).

Las simulaciones permiten cuantificar la incertidumbre asociada al desconocimiento de los valores reales de una variable regionalizada, mediante la construcción de diversos escenarios

equiprobables de dicha variable. Según se consideren o no los datos originales al momento de simular se hablará de simulación condicional o no condicional, respectivamente.

3.8.4. Aplicaciones de la geoestadística en el manejo silvicultural

El proceso de inventario forestal continuo es el método de muestreo utilizado por las empresas para supervisar el crecimiento del bosque. Sin embargo, el uso de métodos de inventario forestal solo puede garantizar una buena precisión en las estimaciones si el bosque es homogéneo para la variable de interés. Cuando hay variabilidad, el error de muestreo se puede reducir a través de la estratificación, es decir, dividiendo el rodal en subáreas más homogéneas con respecto a la variable de interés (Raimundo et al., 2016).

De esta manera, la geoestadística mediante la aplicación de kriging ordinario puede ser una alternativa para la estratificación de rodales forestales con respecto a la variable de interés (Alvarenga et al. 2012), aplicando técnicas de interpolación sobre ésta y permitiendo que el rodal se divida en estratos de crecimiento y/o productividad (Akhavan et al. 2010).

El conocimiento exacto de las estructuras espaciales es necesario para informar directrices y tomar decisiones sobre la gestión silvícola, buscando obtener la sostenibilidad en el largo plazo para el manejo de los bosques.

En este sentido, estimar la variación debido a la dependencia espacial ha proporcionado una base para el diseño de experimentos, donde la geoestadística se ha utilizado para optimizar el diseño de muestreo. Así mismo la estimación y mapeo de recursos forestales basado en el muestreo a escala forestal, ha permitido la producción de mapas con datos georreferenciados de área basal, densidad o volumen en pie, a escalas donde estas variables generalmente muestran autocorrelación espacial (Akhavan et al., 2010).

Los métodos geoestadísticos, basados en la teoría de variables regionalizadas y variograma que cuantifican la autocorrelación espacial, se pueden utilizar para representar por ejemplo la variabilidad espacial del índice de sitio forestal (IS).

El índice de sitio se usa a menudo para evaluar directamente la calidad de los bosques en un sitio específico, sin embargo, es imposible e innecesario determinar un índice de sitio en el campo para cada "subcompartimento" en un área grande. De esta manera, para reducir el trabajo de campo, el diseño de muestreo está enfocado a la recolección de un conjunto de datos, para usarlos posteriormente en ubicaciones y predicciones de áreas no observadas mediante la combinación de SIG y métodos de interpolación como Kriging (Tang, 2009).

Varios estudios en el ámbito forestal han utilizado la geoestadística mediante la aplicación de diversas técnicas, buscando información adicional para la caracterización espacial del bosque (Singh et al., 2014). En el 2009, Palmer et al. Utilizó el método de Kriging ordinario aplicado para predecir el volumen medio, el incremento anual y altura máxima media para *Pinus radiata*, mientras que Viana et al. (2012) realizó un estudio para la estimación de biomasa en la copa en rodales de *Pinus pinaster*.

El Kriging ordinario, entre otras técnicas, ha sido aplicado no solo para delinear rodales forestales sino también para estudiar el stock de carbono en la capa orgánica de los suelos del bosque boreal (Muukkonen et al. 2008), por otro lado (Galeana J, 2012), elaboro un mapa de contenido de carbono para conocer la distribución espacial a través del suelo de conservación mediante métodos geoestadísticos. El interpolador seleccionado fue Kriging Ordinario ajustado a un modelo esférico con un error cuadrático medio estandarizado de 0.9429.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Tipificación de la investigación

Existen diversas formas de clasificar los diferentes tipos de investigaciones según algunas características asociadas con el momento en que se realiza el estudio, el tipo de información que se utiliza o recopila, la población en estudio y la manipulación de variables entre otras.

De acuerdo con (Hernández et al.,1996), las investigaciones se pueden dividir en cuatro tipos: estudios exploratorios, estudios descriptivos, estudios correlacionales y estudios explicativos, correspondiéndose la presente investigación al tipo de investigación Descriptiva al permitir realizar predicciones acerca del rendimiento potencial de plantaciones comerciales de especies forestales.

(Méndez, et al., 1990) mencionan diferentes aspectos que caracterizan a los estudios descriptivos, siendo éstos los siguientes:

- a) **Información recolectada:** Se recolecta la información de campo, de acuerdo con los criterios del investigador y para los fines específicos de la investigación, después de

su planificación. El proceso de levantamiento de la información se realiza para cada uno de los elementos señalados en la sección de operacionalización de la investigación.

- b) **Las etapas metodológicas del estudio:** Se levantará información de campo una sola vez en un momento dado. Esta característica describe un componente muy importante del estudio, ya que la información recopilada en este caso se corresponde con la medición y registro de variables dasométricas que caracterizan la plantación comercial de árboles evaluada en el año 2021. Esta información puede ser comparada con otros datos de la plantación obtenidos previamente; lo que no invalida la posible aplicabilidad futura de la información recolectada y analizada la realidad encontrada para las especies evaluadas.

- c) **La población en estudio:** El estudio sólo cuenta con una población que sería la plantación forestal y unidades de muestreo que en este caso serían los lotes y las parcelas de muestreo definidas para cada lote, los que serán considerados como universo y población de estudio.

- d) **Alcance del estudio:** En este tipo de estudios el investigador puede describir o medir el fenómeno estudiado y a la vez puede realizar cálculos y proyecciones de variables que pueden ser estimadas a partir de la información recopilada en campo.

La presente investigación se realiza a nivel experimental ya que se evalúan relaciones de causa efecto en cuanto al crecimiento y rendimiento potencial de las plantaciones forestales.

De acuerdo con el Método de Investigación, se define como una Investigación del tipo Cuantitativa, ya que serán manipuladas las variables de investigación establecidas y el análisis se traducirá a términos matemáticos (medición y cálculos).

En base a Barrantes (2008) la investigación cuantitativa se basa en la observación y cuantificación de variables estadísticas.

Por el método de estudio, la investigación es del tipo observacional y de acuerdo con el período y secuencia de las observaciones que se realizan, la investigación es del tipo transversal al realizarse una única evaluación en un momento dado (muestreo).

Con respecto al marco donde tiene lugar la investigación ésta es una investigación de campo, dada la evaluación de situaciones naturales y la libertad de accionar que tiene el investigador respecto a la definición de las áreas de muestreos.

4.2. Caracterización del área de estudio

4.2.1. Descripción del área

La finca Eco-forestal cuenta con una extensión total de 1,592.80 ha, el área de uso de plantación es de 874 ha equivalente al 55.5% de la propiedad, los demás usos están repartidos en bosque de regeneración natural, infraestructura y potreros. La finca es administrada por la empresa Agroforestal S.A, cuyo representante legal es el señor Clemente Marie Poncon G, el estado de la propiedad es privada.

4.2.2. Ubicación geográfica

El área de estudio está ubicada en las coordenadas 11°18'58" N y 85°54'25" W y en las hojas cartográficas: Rivas 3050-III y San Juan del Sur 3049-IV. La comarca es Majagual, municipio San Juan del Sur, departamento de Rivas.

4.2.3. Límites de la propiedad y accesibilidad

La propiedad limita al norte con tierras de Coyolito propiedad de Alberto Cordón, al sur con Océano Pacífico, al este con finca La Cruz y La Esperanza, al oeste con finca de Brito.

La accesibilidad se realiza por la carretera Managua –San Juan del Sur, a la altura del km 142, de donde se toma un camino de todo tiempo de material selecto de aproximadamente 10 km.

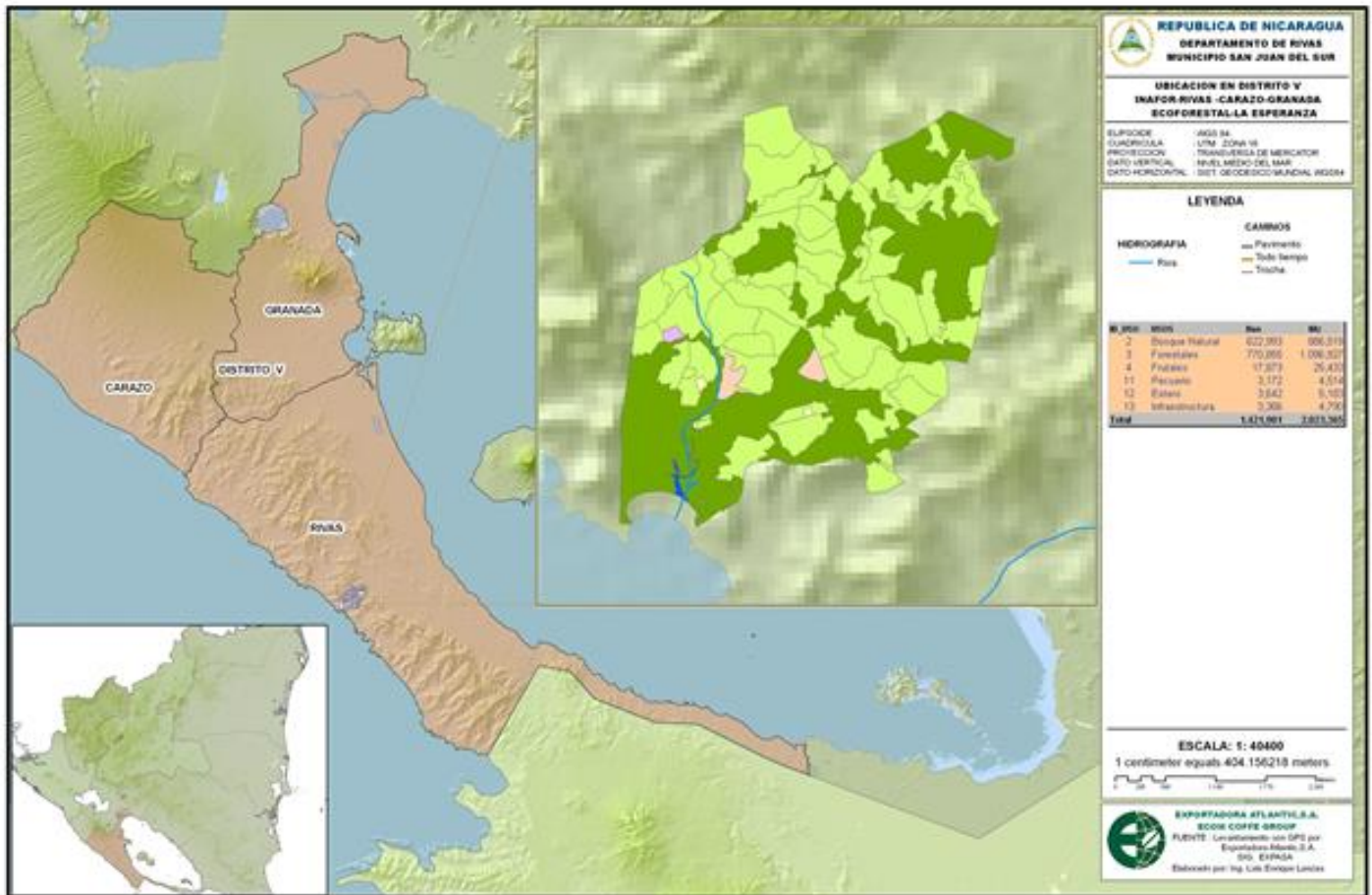


Figura 2. Mapa de ubicación de la finca Eco-Forestal.

Fuente: (Plan de manejo Eco-Forestal, 1999-2019)

4.3. Características biofísicas del área de estudio

4.3.1. Características del relieve, altura y suelos

Según la zona de vida de Holdridge (1978), la vegetación florística de la Finca Eco-forestal se encuentra en la formación de: Bosque Premontano Tropical húmedo y Bosque Subtropical Seco. Particularmente los terrenos de la finca son irregulares, con pendientes de 10 – 60 % de inclinación. Derivado de tierras coluviales, profundos de 60 – 70 cm., Pero algunas áreas tienen profundidad de 20 – 30 cm.

El suelo superficial o subsuelo es franco arcilloso de textura fina, en las áreas profundas tienen una textura arcillo limosa. Son suelos bien drenados, tienen una permeabilidad

moderada a moderadamente lenta, capacidad de humedad disponible. Zona radicular superficial a moderadamente profunda.

4.3.2. Clima del área de estudio

La temperatura media anual es de 28 °C, la máxima temperatura es en abril la cual promedia 30°. La precipitación media anual oscila los 1,550 mm, la máxima incidencia de esta es los meses de septiembre a octubre, y la mínima es en los meses marzo – abril.

4.3.3. Hidrología del área de estudio

El área de reforestación es atravesada por cursos de agua permanente en los cuales corre agua durante todo el año de las partes altas.

4.3.4. Flora del área de estudio

El área está compuesta por cuatro ecosistemas los cuales están muy bien marcados en toda la parte del pacifico sur de Nicaragua. De los cuatro, el que abarca mayor tamaño es el Bosque Tropical Deciduo Latifoliado de Bajura, uno de los ecosistemas más amenazados y con menos representatividad en estado natural en todo el pacífico.

A. Bosque tropical deciduo latifoliado de bajura

Es el más extenso de todos, abarca aproximadamente un 50 % del área, se caracteriza principalmente por sus árboles latifoliados que se desfolian en la época seca, tienen corteza gruesa y fisurada. Las especies de flora más comunes son el Guácimo (*Guazuma ulmifolia*), Jocote Jobo (*Spondias mombin*), Pochote (*Bombacopsis quinatum*), Ceiba (*Pseudobombax septenatum*), Madroño (*Calycophyllum candidissimum*), Roble (*Tabebuia rosea*) entre otras.

Entre los animales se encuentran: Conejo (*Sylvilagus sp.*), Ardilla (*Sciurus sp.*) Mono araña (*Ateles geoffroyi*), Mono Congo (*Alouatta palliata*), Coyote (*Canis latrans*), Venado (*Odocoileus virginianus*). Es el ecosistema natural del Venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), el Garrobo negro (*Ctenosaura similis*) y la Iguana verde (*Iguana iguana*).

El bosque actualmente es cuidado y manejado, no obstante, existe algún grado de presión por parte de personas proveniente de ciertas comunidades vecinas como La Chocolata, El Bastón y La Chorrera que entran de manera furtiva a cazar animales silvestres para el autoconsumo.

Estos tipos de ecosistemas además de ser poco representados en el Pacífico (en estado natural), juegan un papel muy importante en la recarga de acuíferos y corrientes superficiales, por lo tanto, deberían ser prioritarios a la hora de escoger áreas para la conservación de biodiversidad.

B. Bosque semidecidual aluvial de galería

Es característico en los márgenes de los ríos generalmente en galería, se integra de especies que se desfolian solo parcialmente en la época más seca, este tipo de vegetación contrasta con los sitios más seco de los alrededores. La composición florística en estos lugares varía de acuerdo con los rangos altitudinales, en este caso está ubicado dentro de un ecosistema deciduo.

Las especies de árboles más comunes son Guayabón (*Terminalia oblonga*), Brasil (*Caesalpinia velutina*), Guapinol (*Hymenaea courbaril*) y otras que se desarrollan en lugares bastante húmedos a la orilla de ríos o en lugares que se inundan estacionalmente como en este en particular.

Igual al tipo de bosque anterior está en una regeneración continua y tiene menos presiones por parte de la gente de los alrededores, gracias a su ubicación en el centro de la propiedad. Su tamaño equivale a un 5 % del total del área.

C. Manglar limoso del Pacifico

Está en la orilla de la costa marina y se extiende algunos metros hasta donde las mareas inundan los pequeños ramales estuarinos. Su tamaño se restringe a un 4 % del total de la zona.

La vegetación encabezada por *Rhizophora mangle* (Mangle Rojo) es relativamente joven, lo que indica que este sistema natural fue muy alterado en el pasado. Otros ejemplares que dominan la zona son el Palo de Sal (*Avicennia germinans*), Manzana de Playa (*Hippomane mancinella*) y Espino de Playa (*Pithecellobium dulce*).

Los manglares son muy importantes para el ciclo biológico de los camarones y otros crustáceos, albergan una variedad de conchas y otros bivalvos filtradores que son indispensables para el equilibrio ecológico. Estas especies mencionadas son escasas en la zona, pero se espera que, con el modelo de recuperación, en poco tiempo las poblaciones aumenten considerablemente.

4.3.5. Fauna del área de estudio

(Plan de manejo Eco-Forestal, 1999-2019), en el cual se identificaron 112 especies animales agrupadas en 55 familias.

De las clases faunísticas la más representada es la de aves con 59 especies en 28 familias, esto equivale a un 9.16 % del total de especies reportadas para Nicaragua (ENB, 2001) y a un 95 % de las especies reportadas para el Área Protegida La Flor.

Cuadro 1. Diversidad faunística presente en la finca

Diversidad Faunística		
Clase	Familia	Nº de especies
Aves	28	59
Mamíferos	17	31
Reptiles	7	18
Anfibios	2	3
Crustáceos	1	1
Total	55	112

Fuente: (Plan de manejo Eco-Forestal, 1999-2019)

Las especies más comunes de aves son Gallinas de monte (*Tinamus major*), Gavilán Pollero (*Buteo brachyurus*), Pocoyos (*Chordeiles minor*), Palomas San Nicolás (*Columbina talpacoti*), Salta Piñuela (*Campylorhynchus rufinucha*), Güis (*Pitangus sulphuratus*), entre otras. Las menos comunes son Pavón (*Crax rubra*), Cotorra frente Blanca (*Amazona albifrons*), Lora Nuca Amarilla (*Amazona auropalliata*) y Tucanes. Otra especie que pudimos observar fue la *Ara macao* (Lapa Roja), pero no se reporta en la lista ya que fueron introducidas (dos parejas) por el dueño de la finca hace algunos años y al parecer se adaptaron al medio ambiente

De la lista identificamos 18 especies que están en las listas de CITES (16 en el Apéndice II y 2 en el Apéndice III), siendo la mayoría de la familia Psittacidae. Es posible que más

especies sean vistas en los alrededores, sin embargo, se necesita de estudios más detallados y si se puede, hacerlos en ambas estaciones del año para lograr más representatividad.

Los mamíferos son bien representados por las 31 especies encontradas, agrupadas en 17 familias. De estas 31 especies, 17 están en las listas de CITES (6 en el Apéndice I, 2 en el Apéndice II y 9 en el Apéndice III).

Los animales más comunes son Venado (*Odocoileus virginianus*), Mono Congo (*Alouatta palliata*), Zorro Cola Pelada (*Didelphis virginiana*), Conejo (*Sylvilagus floridanus*), Mapachin (*Procyon lotor*) y Ardilla (*Sciurus variegatoides*). Los más escasos son la Guardatinaja (Agouti paca), el Mono araña (*Ateles geoffroy*), Mono Cara Blanca (*Cebus capucinus*) y todos los felinos (*Hepailurus yagouarundi*, *Felis wiedii*, *Leopardus wiedii* y *Leopardus pardalis*).

En cuanto a los reptiles se identificaron 18 especies pertenecientes a 7 familias, siendo las más abundantes la *Colubridae* y la *Iguanidae*. De esta clase (Reptiles) hay 9 especies en las listas de CITES, o sea, que el 50 % de los reptiles reportados están bajo riesgo. De los especímenes listados en CITES 2 están en el Apéndice I, 4 en el Apéndice II y 3 en el Apéndice III.

Los anfibios son representados únicamente por 3 especies agrupadas en 2 familias. Ninguna de estas está contemplada en las listas de CITES. De crustáceos solo se reportó una especie que es el Camarón de Río, este tampoco está presente en los Apéndices de CITES, no obstante, son muy escasos debido a las alteraciones que ha sufrido su ecosistema natural.

4.3.6. Especies establecidas en lotes de la plantación

Cuadro 2. Especies establecidas en lotes de la plantación

Nº	Nombre Común	Nombre Científico	Familia
1	Roble	<i>Tabebuia rosea</i>	<i>Bignoniaceae</i>
2	Caoba del pacifico	<i>Tabebuia rosea</i>	<i>Meliaceae</i>
3	Caoba africana	<i>Khaya senegalensis</i>	<i>Meliaceae</i>
4	Pochote	<i>Bombacopsis quinata</i>	<i>Bombacaceae</i>
5	Ñambar	<i>Dalbergia retusa</i>	<i>Fabaceae</i>
6	Cedro real	<i>Cedrela odorata</i>	<i>Meliaceae</i>
7	Teca	<i>Tectona grandis</i>	<i>Verbenaceae</i>
8	Coyote	<i>Platymiscium pleiostachyum</i>	
9	Laurel	<i>Cordia alliodora</i>	<i>Boraginacea</i>
10	Acetuno	<i>Simarouba glauca</i>	<i>Simaroubaceae</i>
11	Cortez	<i>Tabebuia chrysantha</i>	

Fuente: (Plan de manejo Eco-Forestal, 1999-2019)

La información de las características botánicas, distribución ecológica, edafológica, usos, etc. De las especies utilizadas para el establecimiento se extrajeron de la revisión bibliográfica y comparativa de varios autores, debido a la información diferenciada entre los autores, a sí mismo se obtuvo información de escritos no referenciados y experiencia propia de los trabajadores de la empresa.

Cuadro 3. Principales requerimientos ecológicos de las especies

Especies	Factores ambientales		
	PP (mm)	T° (°C)	Altitud msnm
Roble	1500	26	1000
Caoba del pacifico	1100 – 1400	24	5 – 500
Caoba Africana	650 – 1250	25	100 – 600
Pochote	800 – 2200	20 – 27	100 – 600
Ñambar			100 – 900
Cedro Real	1200 – 3000	24	
Teca	1250 – 2500	23 – 28	800
Coyote			1000 – 1880
Laurel	1000 – 4000	18 – 32	1500
Acetuno	1000 – 2000	24 – 28	5 – 2000
Cortez	500 – 1200	20 – 35	
Neen	500 – 1200	20 - 35	1000

Fuente: (Plan de manejo Eco-Forestal, 1999-2019)

Las especies que más predominan en los lotes de la plantación son Caoba Africana, Caoba del Pacífico, Pochote, Roble y Cedro Real. En este estudio se realizaron parcelas de monitoreo permanentes en los lotes de la plantación obteniendo las variables necesarias para estimar volumen comercial y carbono almacenado.

Cuadro 4. Resumen de lotes establecidos por especies y año

N°	Especies	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Total	%
1	Roble	59,32	41,573	253,131	143,766	0	25,648	0	523,444	36.37
		7								
2	Caoba del pacifico	3,823	0	12,876	0	0	53,478	18,309	88,436	6.15
3	Caoba Africana	0	28,852	101,070	81,096	0	0	0	211.018	14.66

4	Pochote	191,4 47	205,82 9	0	0	0	0	0	397,276	27.60
5	Ñambar	9,889	48,926	0	0	0	0	0	58,815	4.09
6	Coyote	0	0	0	270	0	0	0	270	0.02
7	Cedro	0	12,125	0	0	0	0	0	12,125	0.84
	Real									
8	Laurel	36,40 3	0	0	0	0	0	0	36,403	2.53
9	Neen	0	33,915	5,505	0	0	0	0	39,420	2.74
10	Teca	39,57 9	0	0	0	0	0	0	39,579	2.75
11	Acetuno	0	15,305	0	0	0	0	0	15,305	1.06
12	Cortez	0	17,100	0	0	0	0	0	17,100	1.19
	Total	340,4 68	403,62 5	372,582	225,132	0	79,126	18,3 09	1,439,24 2	100

En el cuadro 4 se observa que en los primeros cuatro años con respecto al plan de cosecha la mayoría de los lotes la especie que más se estableció es el Roble con un 36,37%, seguida del Pochote con un 27.60%, y la Caoba Africana con un 14.66%. El modelo de siembra en los lotes es de combinación de especies para evitar la competencia, pero también se establecieron lotes puros de una sola especie.

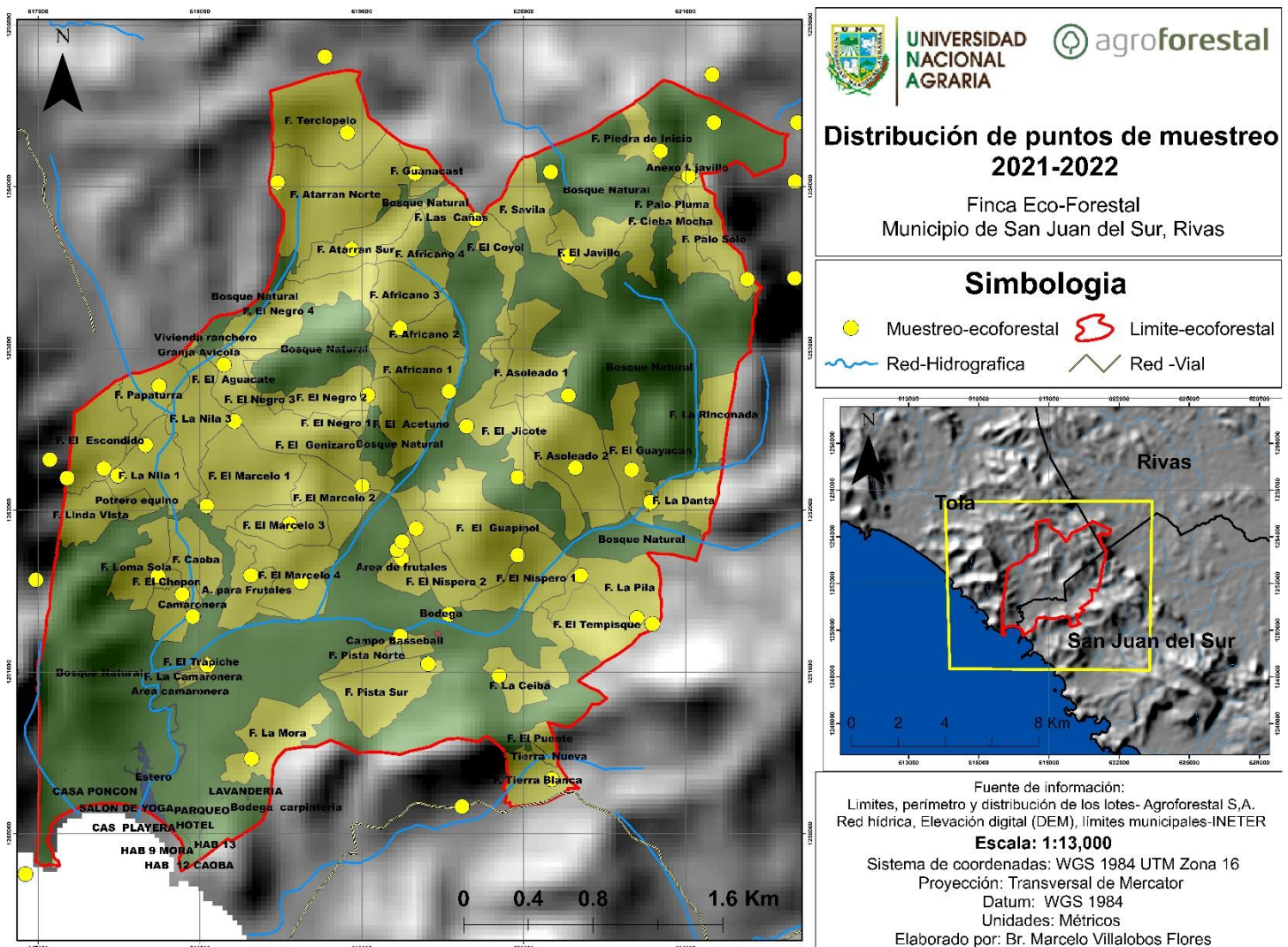


Figura 3. Mapa de la distribución de puntos de muestreo.

Fuente: elaboración propia

En los 42 lotes tomados en cuenta para el inventario se establecieron en cada uno entre 1, 2, 3 o 4 parcelas permanentes de monitoreo esto en dependencia de la extensión en área de los lotes, es decir entre más área presentara un lote se establecerían más parcelas de esta forma el levantamiento de información será representativo, siguiendo esta lógica se logró establecer un total de 74 parcelas, para representar los datos de las variables dasométricas obtenidas en el inventario de forma lógica y ordenada en el mapa se trabajó con la media de los datos de cada lote.

4.4. Materiales

Las actividades de, recolección de muestras, análisis de muestras, toma de coordenadas geográficas para la elaboración de mapas, caracterización del área de esta investigación, establecimiento de parcelas, inventario forestal, se utilizaron diferentes materiales y equipos de importancia para lograr con éxito las acciones propuestas y plasmarla en el presente documento.

4.4.1. Materiales y equipos de Campo

Cuadro 5. Tabla de materiales utilizados en campo.

Materiales	Cantidad	Descripción
Cinta biodegradable	2	Se utilizaron las cintas para marcar las parcelas permanentes de monitoreo.
Forfícula	2	Se utilizó este instrumento ya que es de uso práctico y tiene una alta precisión para medir el diámetro de los árboles.
GPS Garmin	2	GPS gamín etrex 10, el cual cuenta con satélites GPS y GLONASS para adquirir la posición de forma más rápida.
Cinta métrica	2	Se utilizó cintas métricas de 50m.
Formato de campo	800 hojas	El formato presento los campos donde se plasmó las características de cada lote y las variables tomadas en cuenta en este estudio.
Tabla de campo	3	Se utilizó para tomar más cómodo los datos.
Machete	2	Este instrumento se utilizó para abrirse paso en algunas parcelas y por seguridad en campo.

Vara de medición	2	Se utilizó una vara graduada que se extendía desde los 2m hasta los 6m de altura.
Brújula	3	Se utilizó para ubicar el norte y cuadrar la parcela.
Espray	18	Para marcar los árboles que estaban a la par de las estacas de la parcela.

Fuente: elaboración propia

Se utilizaron los materiales mencionados en el cuadro número 2, los integrantes de cada cuadrilla dividieron los equipos y materiales de forma que cada cuadrilla llevara lo necesario para levantar los datos de una manera eficiente.

4.4.2. Inventario Forestal

A. Tamaño y forma de las unidades de muestreo

Se utilizó como unidad de muestreo parcelas rectangulares de 50 x 50 m (0.25 ha) dentro de cada parcela se consideró las siguientes variables: diámetro a la altura del pecho (DAP; a 1,30 m) altura comercial, altura total de cada árbol, calidad de fuste.

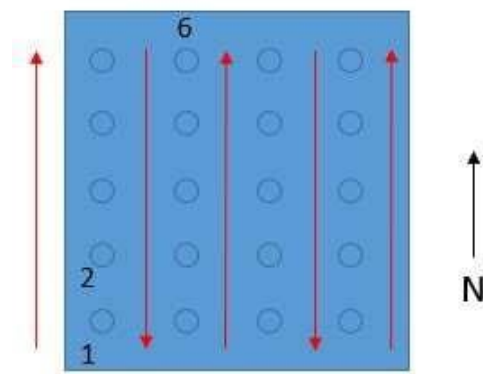


Figura 4. Diseño de la unidad de muestreo

Fuente: elaboración propia

La figura 4 indica la unidad de muestreo que se utilizó para establecer las parcelas permanentes de monitoreo, siguiendo siempre una lógica de ubicar siempre el norte e iniciar el inventario de derecha a izquierda, tomando la coordenada de la entrada a la parcela y del primer árbol inventariado.

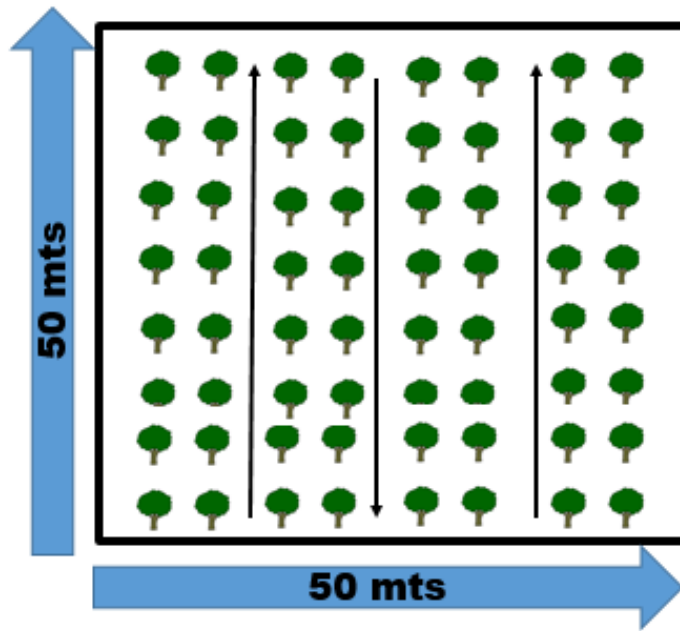


Figura 5. Tamaño y forma de las parcelas establecidas

Fuente: elaboración propia

El operario de campo eliminó la vegetación arvense que dificultaba la medición de los árboles. Desde el punto georreferenciado de la parcela, el líder colocó la dirección norte con la brújula y el asistente de campo se dirigió con la cinta hacia la distancia de 50m en esta dirección. Luego el operario hace 50m en la dirección este, y lo mismo en la dirección sur y oeste para cerrar la parcela cuadrada de 2 500 m². El árbol más cercano del punto georreferenciado de la ubicación de la parcela es el árbol número 1.



Figura 6. Organización del trabajo en campo

- ✓ Responsable de inventario: organizar el inventario forestal, coordinación, manejo de presupuesto, garantizar logística, capacitar, supervisar, recibir la información de campo con la calidad requerida, análisis de la información y formulación de los documentos.
- ✓ Líder cuadrilla: coordinar el trabajo de campo con el ingeniero forestal, localización de parcelas de muestreo con GPS, levantamiento de inventario (conforme a la metodología), medición de árboles, registro de información y garantizar la calidad de la información digitalizada.
- ✓ Asistente de campo: garantizar la medición dasométrica de cada árbol dentro de la parcela.
- ✓ Machetero: apertura hacia cada lote de medición, y localización de las parcelas o unidades de muestreos (UM).

Cuadro 6. Lotes y parcelas permanentes de monitoreo para su inventario Forestal.

Nombre de los Lotes	Edad (Años)	Área (ha)	N.º Parcelas	Especie	Coordenada UMT	
					X	Y
Tempisque	2016	15.25	3	Pochote	620677	1251302
Las Pilas	2008	17.11	4	Caoba A.	620796	1251297
La Rinconada	2008	9.17	4	Caoba P	620352	1251597
El Plátano	2002	3.8	2	Caoba A	619267	1251878
El Cuadro	2000	2.76	2	Caoba A	619247	1251701
Las Banderas	2005	36	2	Caoba A	620277	1252709
La sábila	2008	31	4	Caoba A	620168	1254091
La Nancitada	2011	78.86	4	Caoba A.	618479	1254026
La cincuenta	2005	18.05	3	Caoba A.	621176	1254397
El Níspero	2002	25.59	2	Pochote	619538	1251356
La Cañas	2000	8.42	1	Caoba A, Caoba P	619704	1253798
Guapinol	2002	40	2	Pochote, Caoba A	619969	1252221
El Sorgo	2002	1.71	1	Caoba A	619250	1251806
El Javillo	2002	30	2	Caoba A	620276	1253570
Los Negros	2002	35	2	Caoba A	619038	1252712
La mora	2002	24.13	2	Pochote	618319	1250464
Las Caobitas	2010	3.58	1	Caoba A	617956	1251343
La pista norte	2012	27.3	3	Caoba A, Roble	619238	1251223
El Aguacate	2002	6.64	1	Pochote	618148	1252900
La ceiba	1999	10.21	1	Pochote	619849	1250976
Cenízaro	2000	22.01	1	Pochote	619297	1251883
Africano	2000	51	1	Caoba P-.	619539	1252735
Palo Pluma	2012	2.48	1	Roble, Caoba P.	621019	1254064
Jiñote	2005	24.68	1	Caoba A.	619648	1252518
La Nila	2008	18.65	1	Caoba A.	618213	1252550
Pista Sur	2012	6	2	Pochote, Caoba A.	619411	1251049
Camaronera	1999	12.96	1	Caoba A.	618046	1251040
Marcelo 4	2012	6.56	2	Caoba A, Caoba P.	618625	1251555
Loma sola	2010	35.97	2	Caoba A	617741	1251593
Papaturro	2012	12.48	1	Pochote	617664	1252403
Atarran	1999	20	1	Caoba A	611388	1253432
Palo solo	1999	11.87	2	Pochote	611388	1253432
La asoleada	1999	30	1	Pochote	620321	1252262
La danta	1999	12.83	1	Caoba A	620785	1252049

Guayacán	2002	15	1	Caoba A	620668	125224
Linda vista	2010	13.9	2	Caoba A	617492	1252214
Escondido	1999	18.8	1	Caoba A		
Márceles	2011	62.08	1	Pochote,	619003	1252150
Piedra del Indio	2013	6.16	3	Pochote, Roble,	620846	1254221
Tierra nueva	2017	11.53	2	Pochote	620175	1250336

Fuente: elaboración propia

En el cuadro número 6, se plasma los lotes que se establecieron las parcelas permanentes de muestreo y la cantidad de parcelas en cada uno, de igual forma se identificó las especies forestales que conforman cada lote y se tomó una coordenada en cada unidad de muestreo.

B. Levantamiento de datos de campo

La marcación del DAP, dependiendo del lugar de medición con respecto a la base del suelo, se tomó en cuenta condiciones especiales:

- ✓ **Árbol inclinado:** el DAP se marca perpendicularmente al eje del árbol, con 1,3 m como la distancia más corta sobre el suelo paralela al fuste (caso 2).
- ✓ **Bifurcaciones:** cuando la bifurcación ocurre por debajo de la altura del DAP, las ramas se consideran como dos árboles por separado y se marcan individualmente (caso 5).
- ✓ **Engrosamiento:** si se presenta una anomalía en el fuste a la altura del DAP (ensanchamiento, protuberancia, bifurcación, etc.), se marca a la altura inmediatamente superior desplazando el punto de medición (4, 7, 8). En casos donde por malformaciones del fuste, el desplazamiento deba ser mayor a los 30 cm, se realizarán dos mediciones del DAP, uno por encima del DAP original y otro por debajo, luego se debe sacar un promedio de las dos mediciones. Ambas marcas deben ser pintadas.
- ✓ **Condición normal:** 2, 3 y 6, inclinación del árbol o del terreno, se toma la medida en el punto más cercano a la superficie del suelo; 4 protuberancias, se desplaza la medición del punto a al punto b, en casos excepcionales se toman dos mediciones y se promedian; 5, bifurcación por debajo del DAP se considera como dos árboles

diferentes; 7 y 8, presencia de raíces o aletones en la base, se desplaza el punto de la medición.

La marcación inicial del DAP se llevó a cabo con la cinta diamétrica o forcípula. Al finalizar las mediciones de los árboles se dejaron marcas permanentes con la ayuda de espray color amarillo, determinando el punto exacto de medición del DAP.

C. Medición de variables cuantitativas y descriptivas

A todos los individuos de la parcela se les registro información cualitativa y/o descriptiva. Dado que estas características parten de apreciaciones personales del ingeniero o encargado de la calificación descriptiva, se deben acordar criterios unificados entre los equipos de trabajo, de modo que sean en alto grado compatibles las calificaciones realizadas por los equipos.

- a) Condición
- b) Posición
- c) Calidad fustal

Cuadro 7. Códigos de Variables de campo

Variable	Código	Condición
Condición	1	Vivo
	2	Muerto
	4	Extraído por intervenciones silvícolas
	5	Quebrado
Posición	1	Dominante
	2	Codominante
	3	Intermedio
Calidad fustal	1	Bueno: árbol recto, cilíndrico, libre de ramas gruesas.
	2	Regular: árbol con inclinaciones leves, o un poco torcido.
	3	Malo: árbol con defectos de forma, bifurcaciones y muy torcidos.

Las variables se midieron por el ingeniero líder de la cuadrilla de campo y se procura hacer una medición cruzada con la ayuda de otro de los integrantes del equipo para garantizar la calidad de la medición. A todos los árboles de la parcela se les mide el diámetro a los 1.30 m de altura, la medición se realizó con la cinta diamétrica o forcípula.

Las mediciones de diámetro se ejecutaron siempre en forma perpendicular al eje del fuste, cuidando de hacerla exactamente en la marca. Se recomienda en casos donde las protuberancias o deformidades del fuste conlleva desplazar la medición 20 cm por encima de la marca original, hacer dos mediciones debajo y encima de la marca original y sacar valor promedio.

En cada parcela se midió la altura (Ht) de todos los árboles dentro de la parcela utilizando una vara graduada de medición y un clinómetro.

Los árboles inclinados deben ser medidos por su costado y no en el plano de inclinación. El punto de medición debe garantizar la fácil visualización del extremo superior del fuste. La toma de la altura se puede desarrollar en dos pasos teniendo siempre como referencia el punto del DAP, donde la primera medición se realiza al extremo superior del árbol y la segunda al punto del DAP. La altura total será la relación existente entre las dos medidas (suma o resta) anteriores más el 1.3 m del DAP.

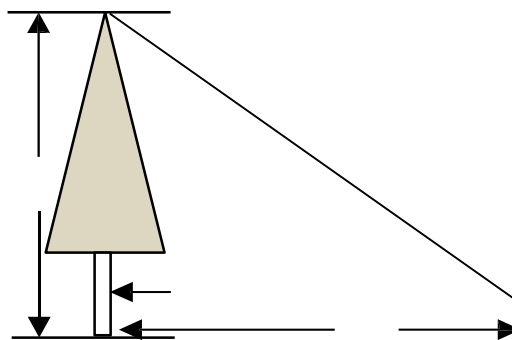


Figura 7. Estimación de altura comercial y total en campo

Generalmente, la altura comercial se define como la distancia desde el nivel del suelo hasta la bifurcación principal que marca el inicio de la copa. Una de las finalidades es llevar antecedentes propios de terreno de cada una de las parcelas, se registraron las observaciones de terreno mediante la siguiente pauta.

Cuadro 8. Códigos para describir condiciones propias de la parcela

Ítem	Código	Descripción
Desarrollo de la plantación	1	Bueno
	2	Regular
	3	Malo
Daños en la parcela	1	Cosechada
	2	Vientos
	3	Incendio o verano
	4	Sin daño
Intervenciones silvícolas	1	Sin manejo
	2	Podas
	3	Raleo
	4	Podas y Raleo
Sotobosque	1	Herbáceo
	2	Arbustivo
	3	Arbóreo
Pendiente	1	0-3%: Plana
	2	3-7% Moderadamente inclinada
	3	7-12% Inclinada
	4	12-25% Fuertemente inclinada
	5	25-50% Escarpada
	6	>50% Muy escarpada
Accesibilidad	1	Buena
	2	Regular
	3	Mala

El inventario se realizó en dos equipos para reducir el tiempo de toma de mediciones. Un equipo se compone del técnico forestal de la Cumplida y dos trabajadores de campo. El otro equipo estaba conformado por el Tesista y dos trabajadores de campo.

4.4.3. Manejo y procesamiento de datos

Los datos de los lotes, número de parcelas, su edad, junto con los datos de diámetro, altura y factor de forma para cada árbol medido, se ingresaron en una hoja de cálculo de Microsoft Excel para disponer de la base de datos original para su procesamiento.

Se elaboró una base de datos en el programa Ms Excel, en la cual, se introdujeron las variables de entrada DAP, Altura T, Altura C, Especie, para el cálculo de la biomasa seca por árbol encontrado en la parcela, luego, se realizó la sumatoria de la biomasa seca por parcela, luego, se estimó el contenido de carbono en tonelada por hectáreas y lotes de la plantación utilizando ecuaciones alométricas.

Los análisis de datos y visualizaciones gráficas se realizaron en el programa computacional R (R Core Team, 2022); como recurso específico para la visualización se utilizó el paquete ggplot2 (Wickham, 2016). Con la finalidad de generar los gráficos.

4.4.4. Estimación del volumen comercial de la plantación

a. Volumen

Con los datos de diámetro se hicieron los cálculos de área basal (m^2), para posteriormente, con los datos de altura y factor de forma, calcular el volumen (m^3) para cada árbol, parcela y lote.

El cálculo del área basal y volumen del árbol se realizaron con la finalidad de conocer el árbol promedio por unidad de muestreo partiendo con los valores obtenidos en su fuste (diámetro y altura). Para el cálculo se utilizaron las fórmulas empleadas por (García, 1996):

$$\text{Área basal (m}^2 \text{ /ha):} \quad \text{AB: } 0,7854 \times (\text{DAP})^2$$

$$\text{Volumen (m}^3 \text{ /ha):} \quad \text{V: AB} \times \text{H} \times \text{f}$$

Donde:

AB: Área basal

DAP: Diámetro a la altura del pecho

V: Volumen del fuste

H: altura del fuste

f: factor de forma (0.7)

b. Cálculo de Incremento Medio Anual (IMA)

Con la medición del crecimiento de diámetro y altura y el volumen calculado en el año 2021, se hizo el cálculo del IMA a cada árbol por cada una de las variables referidas. Este cálculo estuvo basado en la aplicación de la siguiente fórmula:

$$\text{IMA} = \text{Crecimiento 2021} / \text{Edad del árbol}$$

Para hacer los cálculos de ICA e IMA por parcela y lote se utilizaron los datos promedio de diámetro, altura y volumen de todos sus árboles.

4.4.5. Estimación de la biomasa aérea y raíces de la plantación

Para la estimación de la biomasa aérea, se utilizaron modelos generales, específicos y tabla de rendimiento estándar tales como: (tablas de biomasa por especie y uso de tabla de rendimiento estándar) para los diferentes sistemas estudiados. A todas las especies encontradas dentro de las parcelas, se registraron la variable del diámetro normal, diámetro basal y altura total. Para el caso del factor de expansión y densidad de la madera, se utilizó información sugerida de la literatura

Cuadro 9. Ecuación alométrica utilizada en el cálculo de biomasa aérea en bosques y plantaciones del trópico seco.

Componente	Ecuación	Fuente	R ²
Bosque y plantaciones del trópico seco	$B_{\text{total}} = \text{Exp} (1,53009 + 2,17632 * \ln (DAP))$	Fonseca G. W et al, 2016. Costa Rica	0.90

Clave: R², coeficiente de determinación, ln (DAP), Logaritmo natural del diámetro.

Dado a que no se dispone de un método específico propio del país para la estimación de biomasa seca de Caoba Africana, Caoba del pacifico, Pochote, que permita ser usada para las estimaciones de biomasa en Nicaragua, se procedió a utilizar un modelo de ecuación específica para ecosistemas de bosque de trópico seco, muy parecidas a las condiciones de sitio en estudio, desarrollada en Costa Rica por el Dr. William Fonseca G, con un coeficiente de determinación de 90 % de confiabilidad. Esta ecuación tiene como variable dependiente la biomasa seca total y como única variable independiente el diámetro normal del árbol, lo que la hace una ecuación simple, se estima la biomasa seca por árbol y después por parcela

de 2 500 m², luego se extrapola y se estima la biomasa seca por hectáreas para finalmente determinar por cada lote de la plantación.

4.4.6. Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea

Se calculó la biomasa aérea de cada lote de la plantación mediante la ecuación alométrica según Fonseca G. Et al, (2016), partiendo de esto se procedió a multiplicarla por la fracción de carbono (0.5), sugerido por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), cuando no se tienen datos directos del laboratorio.

$$CBA = BA \times 0.5 \text{ (Factor)}$$

Donde:

CBA = Carbono biomasa aérea (tCha-1)

BA = Biomasa Aérea

Al obtener los datos del carbono almacenado en la biomasa aérea de cada lote se procedió a realizar la suma total del CBA, de la plantación forestal.

4.4.7. Estimación del carbono almacenado en las raíces

La estimación del carbono subterráneo (raíz), fue mediante el método de (H.W. Vogelmann, 1995) donde afirma que la biomasa de raíz equivale al 15 % de la biomasa aérea, luego multiplicarla por la fracción de carbono (0.5).

$$CBR = CBA \times 0.15 \text{ (15 \% de la biomasa aérea)}$$

Donde:

CBR = Carbono en la biomasa raíces (tCha-1)

CBA = Carbono biomasa aérea (tCha-1)

4.4.8. Estimación del carbono total almacenado en la plantación forestal.

Al estimar el carbono total almacenado en la biomasa aérea y biomasa de las raíces en cada parcela de la plantación, se procedió a sumar los resultados para determinar el carbono total por parcela y de esta manera estimar el carbono total que está almacenado en la plantación forestal en el periodo 2021- 2022. Para lograr esto se utilizó el programa EXCEL.

4.4.9. Estimación de carbono y volumen mediante el uso de SIG

A continuación, se presenta el diagrama de trabajo a desarrollar, donde se plantea el uso de métodos probabilísticos (Krigeados), mediante el procesamiento de datos a partir del software ArcGIS 10.8.

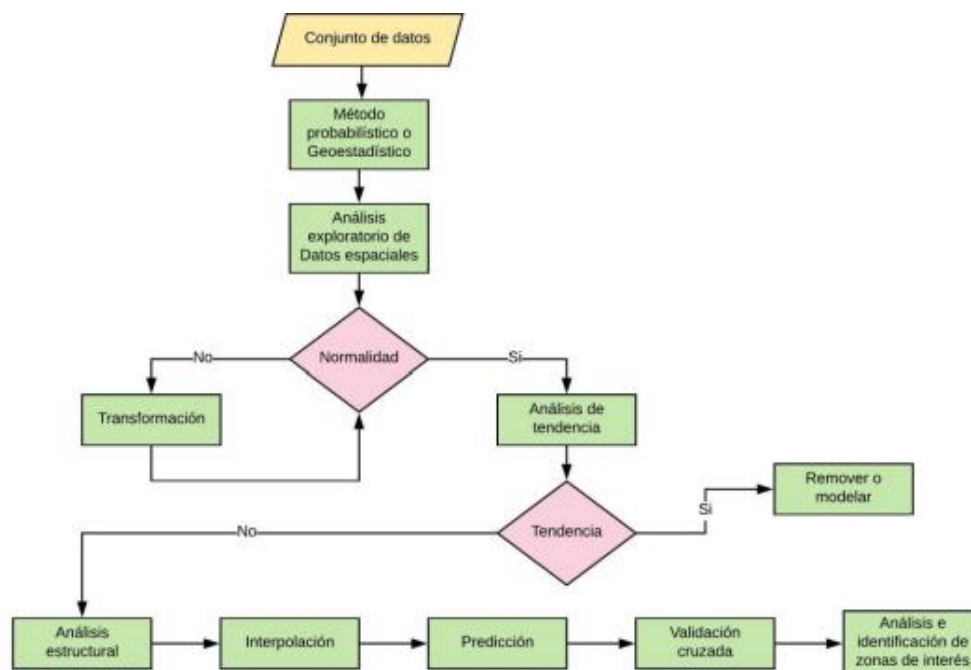


Figura 8. Diagrama de flujo metodológico sistema de información geográfica

Fuente: elaboración propia

Como hipótesis de partida se asume que las variables experimentales forestales: área basal, volumen del tronco, biomasa, carbono almacenado, etc.; son variables regionalizadas; es decir, son variables que tienen una distribución espacial y que presentan una estructura de variabilidad, o de correlación, caracterizada por la función variograma; características que, sin lugar a duda, posee cualquiera de las variables del inventario forestal mencionadas.

Se trabajó con el promedio de volumen y carbono obtenido de las parcelas permanentes de monitoreo y se calculó por 1 ha, se utilizó la extensión geoestadística del software ArcGIS 10.8, en donde se incluirán todos los métodos para separar algunos puntos de muestreo que coincidan, la distribución de los datos se realizara de forma logarítmica.

Para la transformación de los grupos de datos que no presentaron una distribución normal, se efectuó una inspección visual de transformación mediante la herramienta Histogram del

paquete Geostatistical Analyst/Explore Data del software ArcGIS 10.8, con el fin de conocer el tipo de transformación y parámetros necesarios para su inclusión en el modelado posterior.

A. Interpretación visual del análisis de tendencia

La finalidad de este análisis es descubrir la tendencia global que siguen los datos, es decir, si los datos pueden ser ajustados por funciones de primer (lineal, no tiene máximo ni mínimo), segundo (cuadrática, un máximo o un mínimo) o tercer grado (cúbica, dos máximos y un mínimo), para que luego en el posterior análisis estructural se le indique a la herramienta que sea removida. En términos representativos es un gráfico de dispersión visto en tres dimensiones, en donde los datos se proyectan en dos direcciones: N-S sobre un plano Y, Z y la dirección E-W sobre un plano X, Y, el cual se obtiene mediante la herramienta Trend analysis del paquete Geostatistical Analyst/Explore Data del software ArcGIS 10.8.

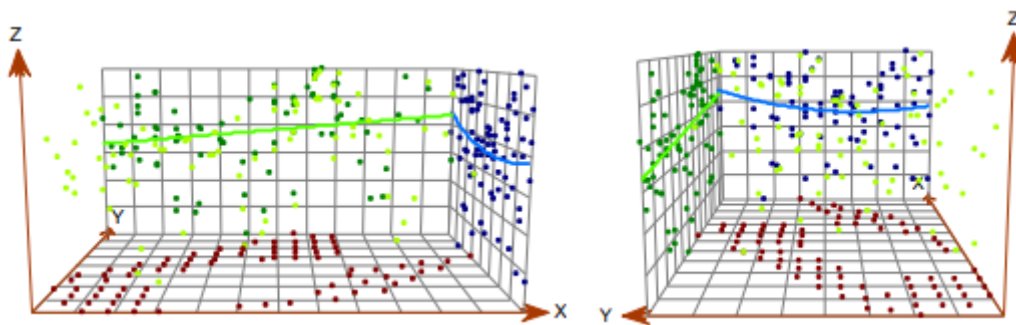


Figura 9. Ejemplo análisis de tendencia visual para la variable IDR del grupo de datos. Tendencia eje YZ (Izq.) y tendencia eje ZX (Der).

Fuente: (Chilès and Delfiner, 2012)

Cuando no existe tendencia, el método de interpolación puede ser Kriging Simple cuando la media es conocida, o Kriging Ordinario cuando la media es desconocida.

B. Análisis estructural

Posterior al análisis exploratorio de los datos, se continúa con el análisis estructural para validar los modelos de dependencia espacial, es decir se construyen los semivariogramas, y haciendo uso del método de validación cruzada se selecciona el modelo de dependencia espacial con menor error, obteniendo así el mapa de interpolación.

Se utilizó la extensión Geoestadística Wizard Kriging, como método de interpolación Kriging/co_kriging, para el manejo de las muestras coincidentes se incluyó el promedio, mínimos y máximos con la finalidad de remover 2 o más puntos de muestreo existentes en una misma localización.

De esta manera a través de la herramienta Geostatistical Wizard disponible en el paquete Geostatistical Analyst de ArcGIS 10.8., se busca realizar un modelo geoestadístico con los datos mediante la aplicación del método Ordinary Kriging → Prediction Map. El kriging ordinario se basa en el modelo $Z(s) = \mu + \varepsilon(s)$, donde μ es una constante desconocida. Se utiliza para datos que no tienen tendencia y cuya media es desconocida. “El kriging ordinario usa semivariogramas o covarianzas (que son formas matemáticas de expresar la autocorrelación)”. También permite transformaciones de los datos, eliminación de tendencias y proporciona medidas de error (Cañada, 2006).

El tipo de Kriging utilizado es el ordinario, transformando de forma logarítmica los datos, el modelo de predicción que se ejecuto es el de semivariograma y se dejó por defecto los otros valores. Una vez que se presiona la tecla Finish (terminar) aparece el mapa de predicción o Kriging.

C. Zonificación y cuantificación de áreas

Dado que las superficies generadas a partir de Kriging no se encuentran en un formato que permita el cálculo de áreas, se hace necesaria la transformación de las superficies obtenidas a partir del proceso geoestadístico, hacia un formato vector que permita la cuantificación de las zonas por cada lote.

De esta manera, a través de la herramienta ArcToolbox de ArcGIS 10.8. Se diseñó un modelo que permitiera realizar las transformaciones, divisiones y cálculos necesarios para convertir de raster a vector. Se realizó la transformación de los ráster obtenidos en los procesos de interpolación, a un formato vector que permita la cuantificación en hectáreas de las variables obtenidas del Kriging.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Estimación del volumen comercial de la plantación

5.1.1 Análisis estadístico del diámetro y altura

En la figura 14 se presenta un gráfico de dos paneles, cada uno con un histograma, representando los diámetros (cm) y las alturas (m) en los ejes X y la densidad de probabilidad en porcentaje de que los DAP o alturas de agrupan en una determinada clase en el eje Y, elaborado con todos los datos del inventario forestal. En este se visualiza que la mayoría de los diámetros están concentrado entre 10 y 15 cm; con mejor frecuencia se observaron árboles con diámetros mayores a 20 cm y muy escasos entre 40 y 50 cm. También se observa que la mayoría de las alturas están concentrado entre 3 y 5 m; con menor frecuencia se observaron árboles con diámetros mayores a menores a 3 y mayores a 5 m.

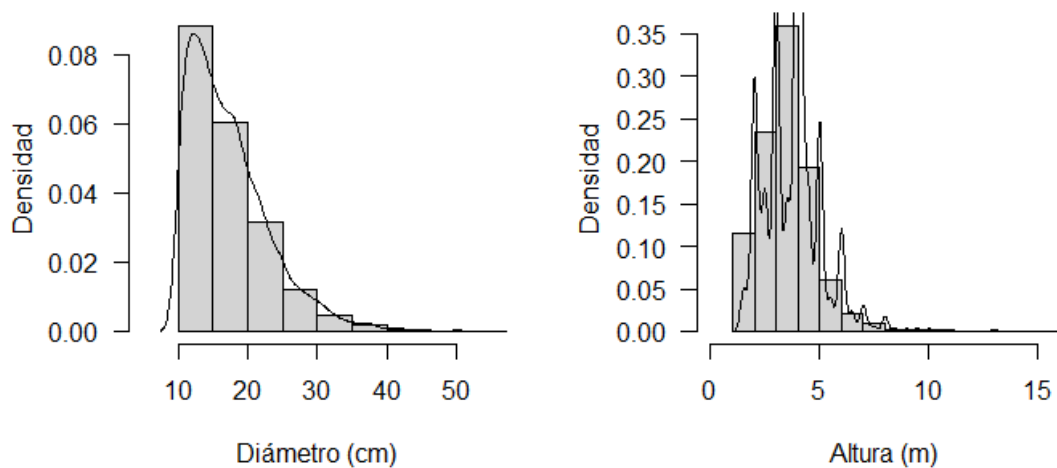


Figura 10. Histograma del DAP y Altura, con densidad de probabilidad

La distribución del DAP y altura comercial está ligado a factores externos y de calidad entre los que podemos destacar la buena genética de la semilla, manejo de la plantación, tormentas tropicales, compactación del suelo, nutrientes en el suelo, disponibilidad de agua. Otro factor es que la plantación se estableció en el rango de tiempo de 1999- 2006 los lotes no comparten uniformidad sumado a esto los factores externos mencionados anteriormente. Los lotes establecidos en el año 1999- 2000 presentan los DAP (30 cm) y alturas (14 m) óptimas para

su aprovechamiento entre los cuales destacan Camaronera, El Aguacate, El Cuadro, Asoleado y Africanos.

De acuerdo al estudio realizado por (Télles, 2019), a medida que los mercados se han preocupado cada vez más por la calidad de la madera suministrada por las plantaciones, ha aumentado el interés por los efectos sobre las propiedades de la madera, del ambiente en las que se cultivan las plantaciones (Briggs, 2010), se incluyen factores del sitio, como fertilidad del suelo y el clima, así como los efectos de las prácticas silvícolas que se aplican para promover el crecimiento de las plantaciones. Se ha prestado especial atención a los efectos sobre la densidad básica de la madera y dureza, ya que la dureza de la madera está mayormente correlacionada con la densidad de la especie (Watt et al., 2010).

Por otra parte, la silvicultura intensiva por ejemplo manejando fertilización o control de vegetación arvense en comparación con la silvicultura tradicional, reduce el estrés ambiental durante los primeros años de la plantación, lo que da lugar a un aumento significativo del crecimiento y la capacidad de adaptación y supervivencia de los árboles, tal es el caso de especies del trópico seco (Villalba et al., 2010; Campoe et al., 2014).

La aceleración de la tasa de crecimiento del diámetro del fuste a menudo conduce también a una reducción de densidad básica de la madera como lo indican Park et al. (2012) en una plantación clonal de *Picea glauca*; aunque no siempre, como lo señalan Muñoz et al. (2010) en plantaciones de *Eucalyptus nitens*, evidenciaron que ocho años después del aclareo, éste no tuvo efecto significativo; con base en lo anterior West (2014) indica que existe poca evidencia que los tratamientos silviculturales por sí mismos conduzcan a efectos en las propiedades de la madera.

La productividad de las plantaciones forestales está en función del suministro, captura y eficiencia en el uso de los recursos (Richards et al., 2010); de acuerdo con lo antes mencionado Fisher y Binkley (2000) señalan que para mantener la productividad forestal es esencial conservar los nutrientes del suelo, los cuales dependen del balance positivo entre las entradas y salidas de estos nutrientes en el sistema. West (2014) menciona que los primeros años de crecimiento de una plantación son particularmente cruciales para el suministro de nutrientes, cualquier escasez que ocurra en el suministro de nutrientes puede ser compensada por la fertilización.

5.1.2. Correlación entre el DAP y altura comercial.

En la figura 15 se presenta un gráfico de correlación en el eje x se encuentran las alturas de todo el inventario forestal, y en el eje y se presentan los diámetros de todos los árboles que se encuentran en el inventario. En este se visualiza una correlación positiva dispersa entre las dos variables esto indica que las variables DAP, Alt; aumentan simultáneamente es decir que tienen una relación directa, por lo tanto, el Coeficiente de Pearson es positivo (0.46), indicando que estas dos variables se relacionan estrechamente ya que los árboles tienen el espacio suficiente o densidad adecuada, así como las condiciones edafoclimáticas y de manejo para fomentar su crecimiento.

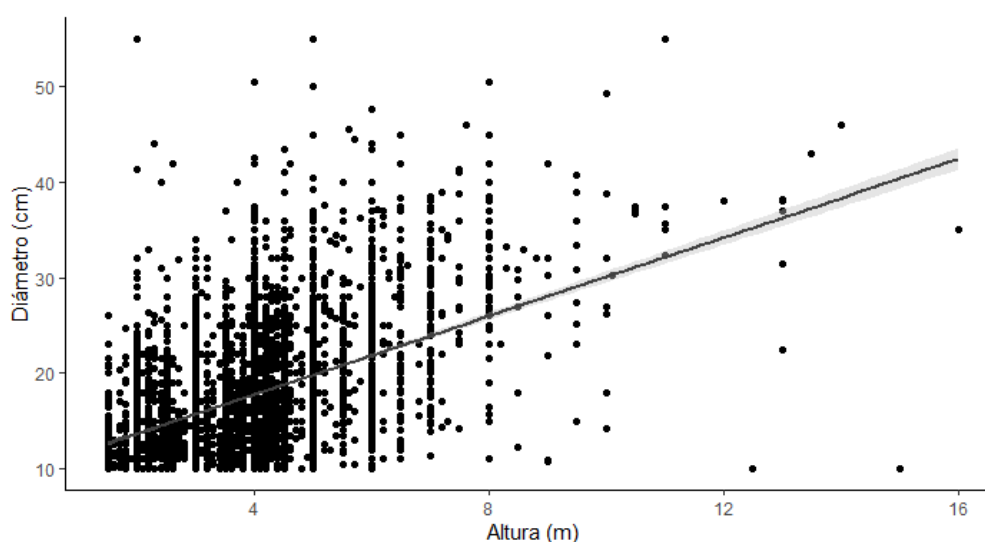


Figura 11. Diagrama de Dispersión y coeficiente de correlación lineal.

El diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura (h) son las principales variables medidas en los inventarios forestales, las cuales son requeridas en la toma de decisiones para el manejo de plantaciones forestales, así como para la investigación de modelos de crecimiento, caracterización de la estructura del lote, estimación del rendimiento de la madera y determinación de la altura predominante, con el fin de evaluar la calidad del sitio en términos productivos.

Este análisis nos indica que a medida que aumenta el DAP, también aumenta la altura del árbol, la gráfica de dispersión confirma esta relación, ya que los puntos se distribuyen a lo largo de una línea ascendente. La línea de regresión muestra que, en promedio, un aumento de 1 cm en el DAP se asocia con un aumento de 3 metros en la altura del árbol.

El coeficiente de Pearson que se obtuvo es de 0.46 es decir un 46% de relación directa de crecimiento óptimo, estos resultados son consistentes con estudios anteriores que han encontrado una relación positiva entre el DAP y la altura del árbol en diferentes especies de árboles. Esta relación puede explicarse por el hecho de que un mayor DAP indica un mayor diámetro del tronco, lo que permite al árbol soportar un mayor peso y crecer más alto.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta relación no siempre es lineal y puede variar según la especie y las condiciones ambientales. Además, el coeficiente de Pearson solo mide la relación lineal entre dos variables, por lo que no proporciona información sobre otros factores que puedan influir en la altura del árbol.

Las condiciones ambientales que aceleran el crecimiento del fuste de los árboles, ya sea debido a las características del sitio o a prácticas silvícolas, conducen a menudo a la producción de madera con una dureza reducida de acuerdo con Watt et al. (2011); sin embargo, el efecto no siempre ocurre y el aclareo no tiene ninguna consecuencia sobre el crecimiento de los árboles como lo exponen Gagné et al. (2012) sobre plantaciones de *Picea glauca* ésta práctica silvícola no tuvo efectos sobre el crecimiento.

5.1.3. Comparación entre la distribución de las especies en el año 2005 y 2021

En la figura 12 se presenta un gráfico de barras en el eje X se encuentran distribuidas las especies en el año 2005 y 2021, en el eje Y está la escala de porcentaje, el año 2005 representa el % de individuos plantados por especie y su representación del total de la plantación, el año 2021 representa el inventario forestal que se realizó y los porcentajes de abundancia de las especies que se encontraron en este.

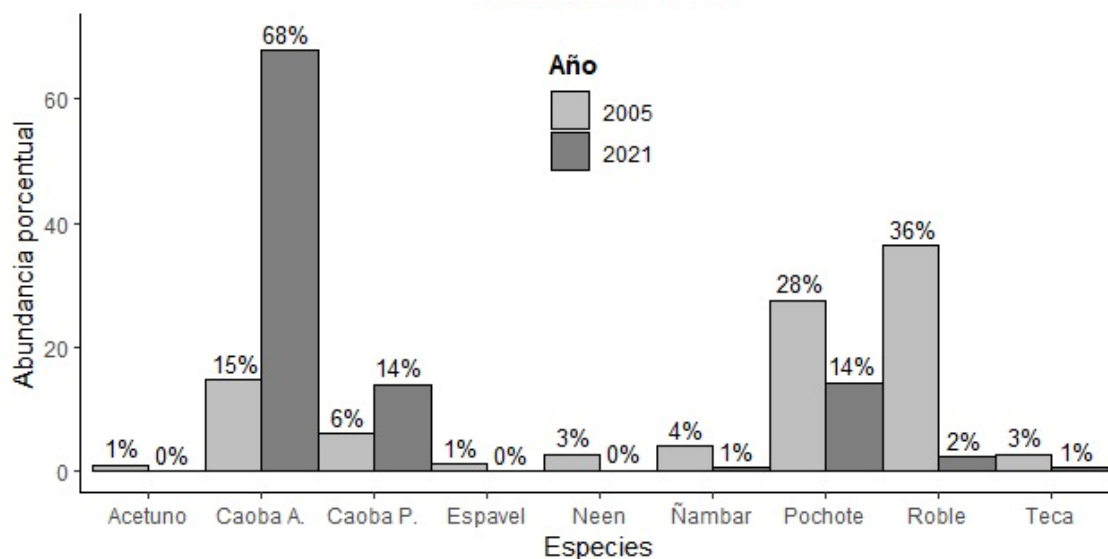


Figura 12. Comparación de datos de abundancia porcentual 2005-2021.

La abundancia que se identificó en este inventario de 7473 datos es que el 67.84% representa Caoba africana, seguido del pochote con una abundancia del 14.35%, de igual forma la caoba del pacifico muy parecida su abundancia con un 14.03%, lo cual nos indica que la caoba africana presento una gran adaptación a la zona ya que representa la mayoría de árboles que se estará cosechando o aprovechando y que implica mayor cantidad de madera, si hacemos la comparación del plan de siembra se establecieron del año 1999 al 2005 un total de 211,018 plántulas obteniendo una sobrevivencia del 95%, no obstante la caoba del pacifico y pochote también presentan un buen crecimiento.

Acorde al plan de manejo en todos los lotes se realizó su raleo en tiempo y forma, de acuerdo con el plan de siembra de la plantación podemos determinar que el Roble presenta un porcentaje bajo de desarrollo del 15%, ya que se establecieron del año 1999 a 2005 un total de 523, 445 plántulas de las cuales sobrevivieron un estimado de 15% lo que es bastante bajo en comparación con la Caoba africana o el Pochote.

Varios rasgos diferentes pueden modificarse a través del mejoramiento genético, como un crecimiento más vigoroso, resistencia a plagas o enfermedades o la calidad del producto (madera en árboles). La mayoría de los principales programas de plantaciones forestales de todo el mundo tienen un programa de mejoramiento genético. En los árboles, los rasgos cuantitativos incluyen la tasa de crecimiento de los árboles, densidad de la madera del fuste o la resistencia al ataque de algunas plagas y enfermedades (West, 2014).

5.1.4. Estimación del volumen de madera en cada lote

En la figura 13 se presenta un gráfico de barras en el eje X se encuentran distribuidos los 44 lotes agrupados según rangos de valores del eje Y, esta agrupación de rangos se realizó analizando los valores mínimos, medios y máximos con respecto al volumen en m^3 por cada lote, obteniendo un gráfico más ordenado y representativo.

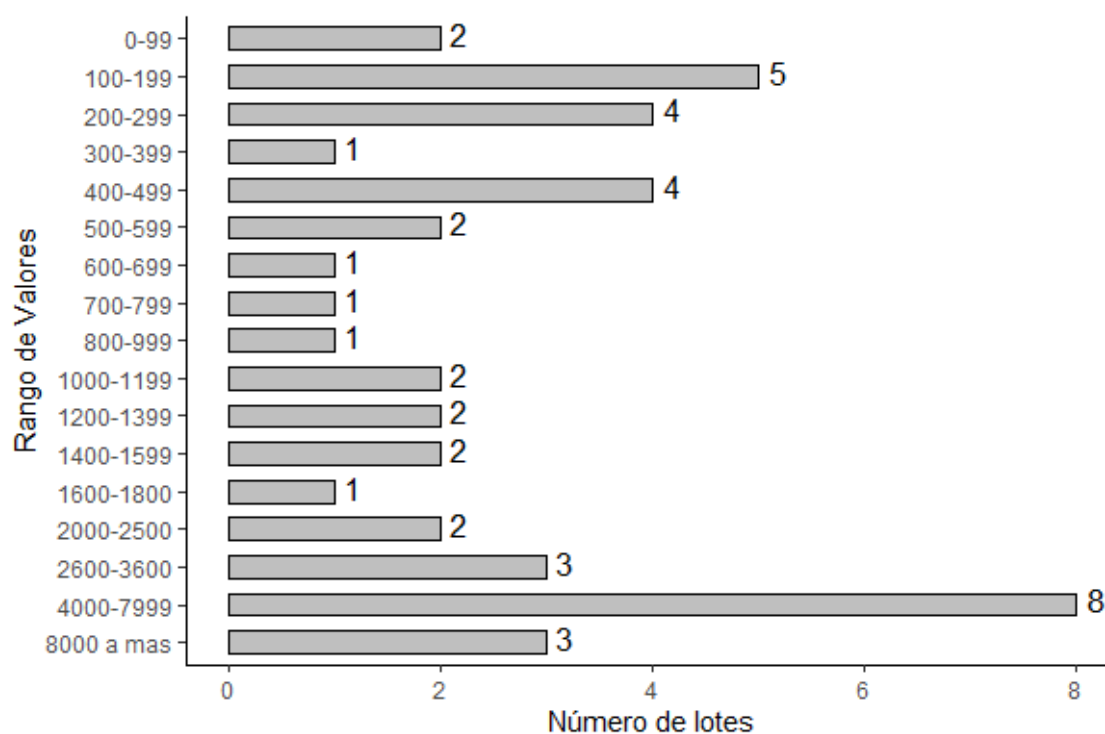


Figura 13. Agrupación de lotes por su rango de volumen en m^3 .

En la figura 13, podemos apreciar que se determinó en el inventario realizado en los diferentes lotes de la plantación que en las 52 parcelas establecidas se obtuvo una estimación total de $1,272.11 m^3$, haciendo el análisis por hectárea se encontró que el total de m^3 por cada hectárea de cada lote, al obtener este resultado se realizó una proyección con este dato y la extensión en ha de cada lote, obteniendo que la plantación cuenta con un aproximado de $122,288.75 m^3$, aprovechables. Esto nos indica que esta plantación es sostenible en la línea del tiempo ya que mientras van aprovechando los diferentes lotes de la plantación de igual forma van restableciendo las áreas, obteniendo un sistema sostenible de aprovechamiento.

En este gráfico podemos apreciar los lotes más representativos de la plantación en cuanto a volumen aprovechable, en su mayoría son lotes que cuentan con una extensión en área mayor a 10 ha, la especie que predomina es el pochote y la caoba africana, son las dos especies que

cuentan con un mayor crecimiento en comparación a las demás especies, de igual forma los lotes que presentan un mayor volumen son los lotes mixtos que están conformados por 2 o más especies.

En el gráfico se observa que 8 lotes se encuentran entre los 4000 – 8000 m³ de volumen aprovechable de madera entre los cuales destacan según su extensión en Ha, Dap y Altura comercial los siguientes: El Javillo, La Mora, Las Banderas, La Cincuenta, Los negros. También la plantación cuenta con 3 lotes muy productivos que cuentan con más de 8000 m³ aprovechables los cuales son: La Nancitada, Savila, Marcelos, estos lotes algunos ya se están aprovechando ya que la empresa necesita generar ingresos para seguir la línea de rentabilidad económica y así mismos aprovechar la alta demanda en el mercado internacional de madera certificada procesada o trasformada en muebles, puertas, piso, sillas, etc.

Podemos decir que la producción de madera en rollo de las plantaciones forestales en el año 2012 fue aproximadamente de poco más de 200 millones de m³, en América del Sur de 193 millones de m³, Asia 165,300 millones de m³, y América del Norte y Central 171,700 Mm³. El Caribe y África septentrional produjeron considerablemente menos, entre 300 y 47 Mm³. Las regiones de Oceanía, África y Asia albergan países con plantaciones forestales intensivas altamente desarrolladas usando especies exóticas de rápido crecimiento (Payn et al., 2015).

La necesidad global de producción de madera ha llevado a las plantaciones de especies seleccionadas sobre la base de su capacidad de adaptación a las condiciones locales y a su rápido crecimiento (Dodet y Collet, 2012). Para evaluar las tasas de crecimiento, el propietario de una plantación necesitará alguna forma de medir y expresarlos (West, 2014).

De acuerdo con el estudio realizado por (Télles A, 2019), los modelos de crecimiento y producción permiten predecir el desarrollo de los árboles y/o masas forestales a los silvicultores y gestores forestales (Diéguez et al., 2009). A través de la información de crecimiento se estima la edad de rotación óptima para cosecha y decidir cuándo y con qué intensidad aplicar tratamientos silvícolas como aclareos y podas (de Groot y van der Meer, 2010).

5.2. Estimación de la biomasa aérea, raíces y total de los lotes de la plantación

5.2.1. Biomasa aérea

En la figura 14 se presenta un gráfico de barras en el eje X se encuentran distribuidos los 44 lotes agrupados según rangos de valores del eje Y, esta agrupación de rangos se realizó analizando los valores mínimos, medios y máximos con respecto a la Biomasa aérea en ton/lote, obteniendo un gráfico más ordenado y representativo. Se observa la agrupación mayor de 0-99 con 17 lotes, seguida de una agrupación media de 6 y 5 lotes entre los rangos de 100- 199, 900- 1500, y una agrupación en los rangos máximos de 3 lotes que se encuentran entre 1600- 3200.

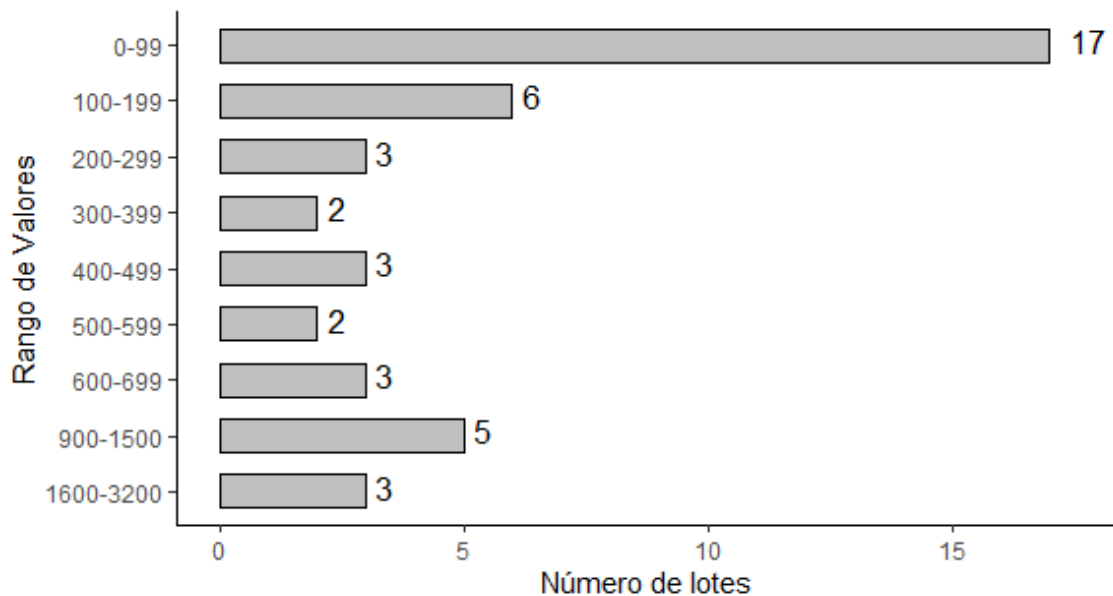


Figura 14. Agrupación de los lotes en rangos de biomasa aérea

En la figura 14, podemos apreciar que la mayoría de los lotes, 17 se encuentran en el rango de 0-99 toneladas de biomasa aérea esto debido a factores del sitio, calidad o genética de la semilla, manejo de los lotes y extensión en ha de los lotes. Los lotes El Sorgo, El Cuadro, Las Cañas, presentan muy buena relación de DAP, altura y densidad; pero no cuentan con extensión de área mayor de 10 ha. Al contrario de otros lotes que cuentan con mayor área establecida, pero con menos desarrollo de las variables dasométricas de interés para su aprovechamiento.

Es importante mencionar que 5 lotes se encuentran en el rango de 900 a 1500 toneladas de biomasa: Las Banderas, Las Pilas, La Cincuenta; los cuales son lotes que cuentan con buena relación entre su DAP y altura y un área entre 15 a 18 hectáreas indicándonos la viabilidad de su aprovechamiento, los lotes más productivos de la plantación son los siguientes: Marcelos, Savila, La Nancitada, destacando el lote Savila ya que de los 3 es el que cuenta con menos área 31 ha, pero cuenta con buen desarrollo del DAP, altura y densidad de árboles por hectárea.

5.2.2. Biomasa de las raíces

En la figura 15 se presenta un gráfico de barras en el eje X se encuentran distribuidos los 44 lotes agrupados según rangos de valores del eje Y, esta agrupación de rangos se realizó analizando los valores mínimos, medios y máximos con respecto a la Biomasa aérea en ton/lote, obteniendo un gráfico más ordenado y representativo. Se observa la agrupación mayor de 0-19 con 19 lotes, seguida de una agrupación media de 8 y 4 lotes entre los rangos de 20- 49, 50- 79, y una agrupación en los rangos máximos de 2 lotes que se encuentran entre 400- 500 toneladas.

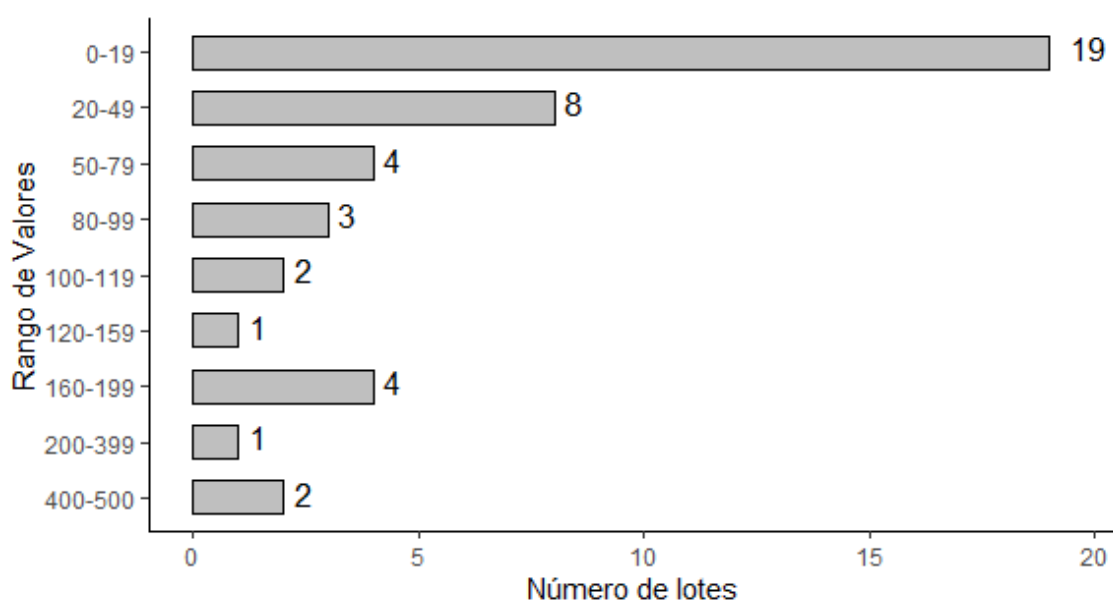


Figura 15. Agrupación de los lotes en rangos de biomasa de las raíces

En el gráfico 15, podemos apreciar que la mayoría de los lotes se encuentran en el rango de 0-19 toneladas de biomasa en las raíces, esto debido a factores del sitio, calidad o genética de la semilla, compactación de suelo, disponibilidad de nutrientes y extensión en ha de los lotes, entre estos lotes podemos destacar los siguientes: Espavel, El Sorgo, El aguacate, El

Cuadro, El Plátano. Estos lotes no superan las 10 ha, pero cuentan con buena densidad de árboles por hectárea.

Tomando en cuenta que para calcular la biomasa de las raíces se utilizó el factor de 0.15 es decir que la biomasa de las raíces representa el 15% de biomasa aérea, esto nos indica que entre más desarrollado en términos de altura y DAP este un árbol mayor será su biomasa de raíces. Los lotes que presentaron el mayor rango de 400- 500 toneladas de biomasa son Savila y La Nancitada; destacando el lote Savila el cual presenta menor extensión de área en hectáreas, pero una muy buena densidad de árboles por hectárea, también una relación homogénea entre el DAP y altura, dando como resultado un valor elevado de biomasa de raíces.

5.2.3. Biomasa total

En la figura 16 se presenta un gráfico de barras en el eje X se encuentran distribuidos los 44 lotes agrupados según rangos de valores del eje Y, esta agrupación de rangos se realizó analizando los valores mínimos, medios y máximos con respecto a la suma de biomasa aérea y de las raíces de cada lote, obteniendo un gráfico más ordenado y representativo. Se observa la agrupación mayor de 0-99 toneladas con 17 lotes, seguida de una agrupación media de 4 y 5 lotes entre los rangos de 100- 199, 200- 299 toneladas, y una agrupación en los rangos máximos de 3 lotes que se encuentran entre 1600- 3200.

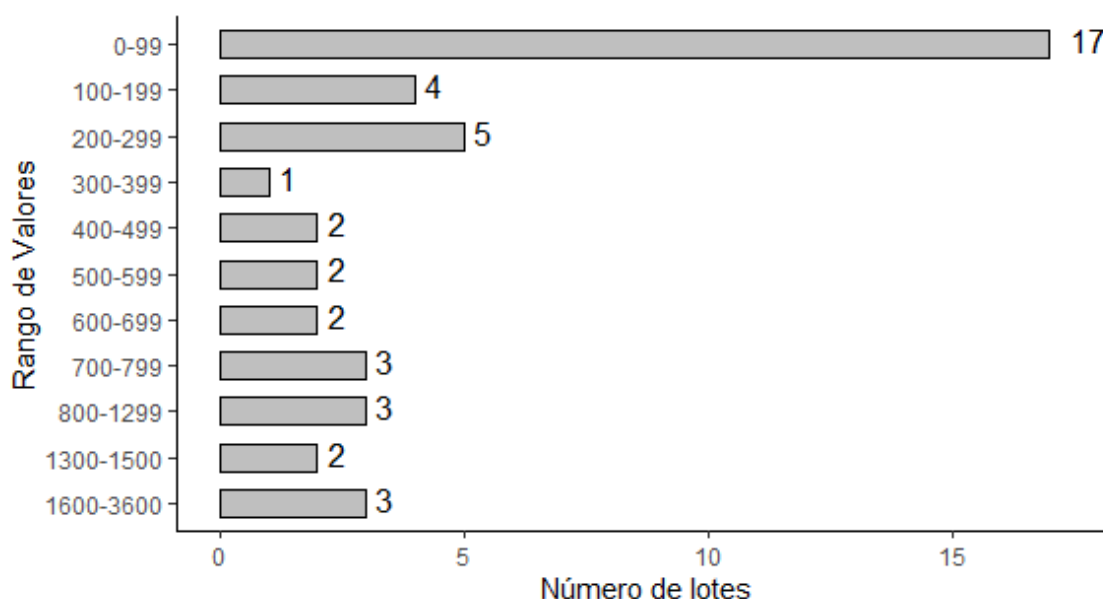


Figura 16. Agrupación de los lotes en rangos de biomasa total

En la figura 16, la mayoría de los lotes 17 se encuentran en el rango de 0-99 toneladas de biomasa total esto debido a factores del sitio, calidad o genética de la semilla, manejo de los lotes y extensión en hectárea de los lotes.

Los lotes El Sorgo, El Cuadro, Las Cañas, presentan muy buena relación de DAP, altura y densidad; pero no cuentan con extensión de área mayor de 10 ha. Al contrario de otros lotes que presentan mayor área establecida, pero con menos desarrollo de las variables dasométricas de interés para su aprovechamiento.

Como en el análisis anterior, 5 lotes se encuentran en los rangos de 800 a 1299, 1300-1500, toneladas de biomasa respectivamente Las Banderas, Las Pilas, La Cincuenta; cuentan con buena relación entre su DAP y altura y su extensión es bastante regular entre 15 a 18 hectáreas indicándonos la viabilidad de su aprovechamiento, los lotes más productivos de la plantación son los siguientes Márceles, Savila , La Nancitada, destacando el lote Savila ya que de los 3 es el que cuenta con menos área 31 ha, pero cuenta con buen desarrollo del DAP, altura y densidad de árboles por hectárea.

Cámara et al. (2013) reportan una altura total de 5.96 m y un dap promedio de 11.04 cm en una plantación de *G. arborea* de cuatro años con una densidad de 906 árboles ha-1 establecida a 20 m en Tabasco México, señalan que la altura total y el dap influyen en la cantidad de biomasa y de carbono acumulado en el arbolado, estos resultados son diferentes de los obtenidos en *G. arborea* la cual se encuentra establecida a 694 m.

La biomasa del componente fuste fue de 72.54 %, ramas 18.37 % y raíz 9.09 % de forma general en la plantación en las diferentes edades evaluadas, estos resultados concuerdan con lo reportado por Emanuelli y Milla (2014) quienes indican que el componente fuste aporta entre 55-70 %, y el componente hojas entre 10-37 %, la distribución de biomasa por componentes en el arbolado de *G. arborea* coincide con López-Reyes et al (2016), estos autores obtuvieron un promedio de 70.20 % en el componente fuste y 29.83 % en el componente ramas y manifiestan que los resultados evidenciaron diferencias estadísticas significativas en plantaciones de *Hevea brasiliensis* Müell. Arg. de diferentes edades, establecidas en Tabasco, México.

5.3. Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea

En la figura 17 se presenta en el eje X se encuentran distribuidos los 44 lotes agrupados según rangos de valores del eje Y, esta agrupación de rangos se realizó analizando los valores mínimos, medios y máximos con respecto a la biomasa aérea de cada lote se multiplico por el factor 0.5, obteniendo un gráfico más ordenado y representativo. Se observa la agrupación mayor de 0-99 toneladas de carbono con 23 lotes, seguida de una agrupación media de 5 y 5 lotes entre los rangos de 100- 199, 200- 299, y una agrupación en los rangos máximos de 3 lotes que se encuentran entre 900- 1600.

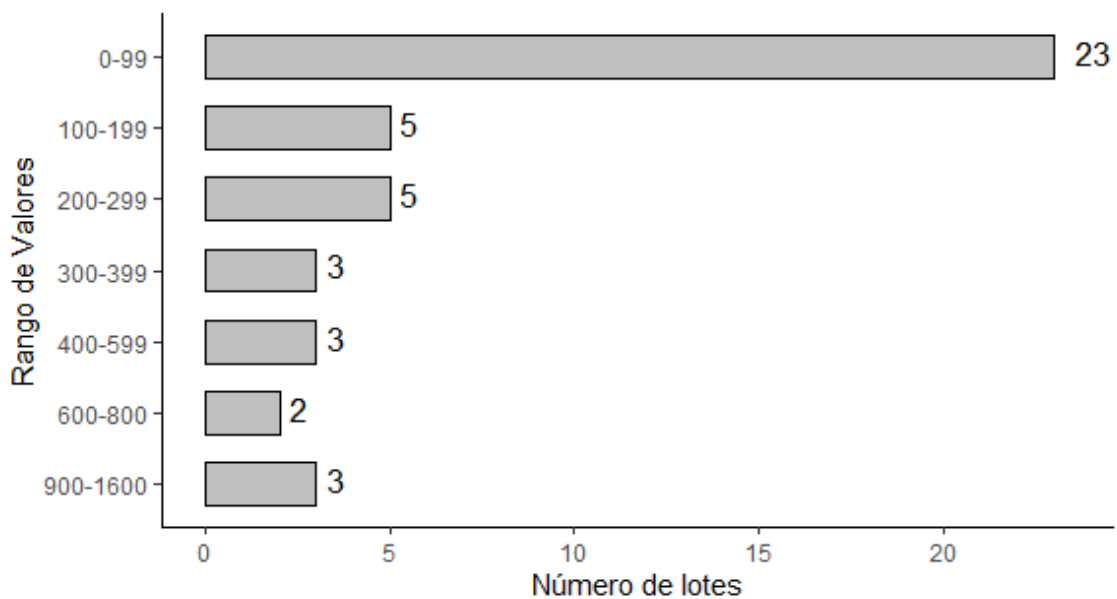


Figura 17. Carbono aéreo almacenado en los lotes ordenado por rangos.

En la figura 17, la mayoría de los lotes 23 se encuentran en el rango de 0-99 toneladas de carbono aéreo esto debido a factores del sitio, calidad o genética de la semilla, manejo de los lotes y extensión en hectáreas de los lotes. El Plátano, El Sorgo, El Cuadro, cuentan con buena relación de carbono almacenado por hectárea, pero cuentan con poca área ya que son los lotes más pequeños. La plantación cuenta con 11,160 toneladas de carbono aéreo almacenado el cual es un resultado bastante significativo ya que en términos ambientales y económicos representa una buena oportunidad a nivel internacional de aplicar a bonos de carbono.

5.4. Estimación del carbono almacenado en las raíces

En la figura 18 se presenta un gráfico de barras en el eje X se encuentran distribuidos los 44 lotes agrupados según rangos de valores del eje Y, esta agrupación de rangos se realizó analizando los valores mínimos, medios y máximos con respecto a la biomasa de las raíces de cada lote, se multiplico por el factor de carbono 0.5, obteniendo un gráfico más ordenado y representativo. Se observa la agrupación mayor de 0-19 toneladas de carbono con 26 lotes, seguida de una agrupación media de 8 lotes entre los rangos de 20-49, y una agrupación en los rangos máximos de 3 lotes que se encuentran entre 150- 250.

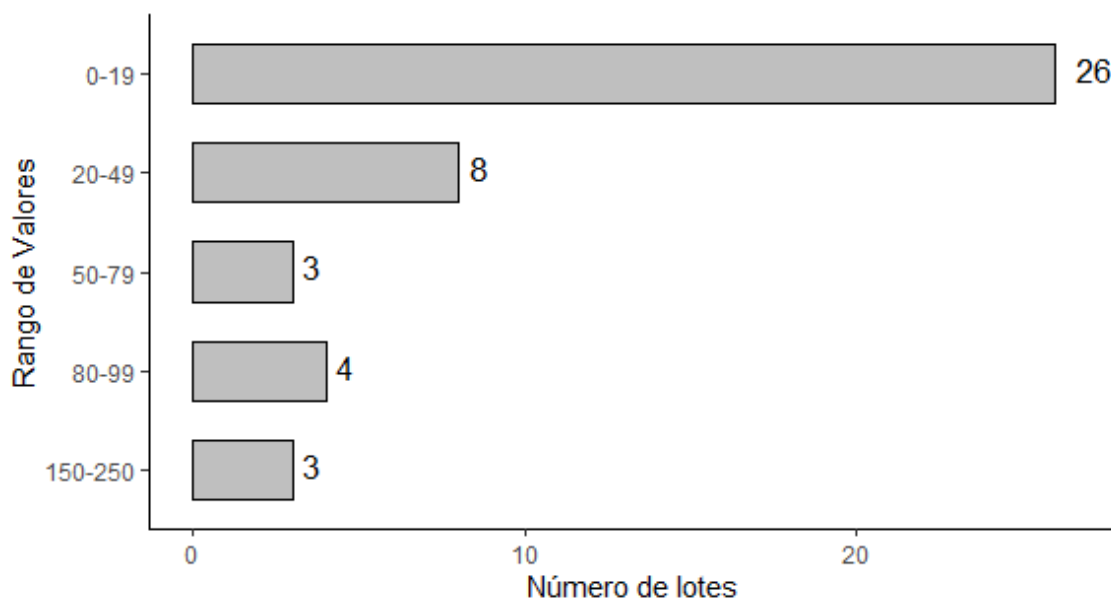


Figura 18. Carbono de las raíces almacenado en los lotes ordenado por rangos.

En la figura 22 la mayoría de los lotes 26 se encuentran en el rango de 0-19 toneladas de carbono almacenado en las raíces, esto debido a factores del sitio, calidad o genética de la semilla, compactación de suelo, disponibilidad de nutrientes y extensión en ha de los lotes, se destacan los lotes. Espavel, El Sorgo, El aguacate, El Cuadro, El Plátano.

Estos lotes no superan las 10 ha, pero cuentan con buena densidad de árboles por hectárea, también tomando en cuenta que para calcular la biomasa de las raíces se utilizó el 15% de la biomasa aérea y se multiplico por el factor de carbono 0.5 IPCC, esto nos indica que entre más desarrollado en términos de altura y DAP este un árbol mayor será el carbono almacenado en las raíces. Los lotes que presentaron el mayor rango de almacenamiento de carbono son Savila, La Nancitada; destacando el lote Savila el cual presenta menor extensión de área en hectáreas, pero una muy buena densidad de árboles por hectárea, también una

relación homogénea entre el DAP y altura, dando como resultado un valor elevado de carbono almacenado. Al sumar el carbono almacenado en las raíces de los 44 lotes de la plantación nos da un valor de 1.674 toneladas almacenadas, siendo bastante representativo y de suma importancia para venta de bonos de carbono.

En el caso de la presente investigación se obtuvo un total de 1,674 tC/PFC, teniendo una media de 1.92 tC/ha. Obteniendo un resultado bastante bajo en relación con otras investigaciones realizadas en el trópico seco esto debido a que los lotes presentan diferentes edades de establecimiento y densidades de árboles plantados en los lotes.

5.5. Estimación del carbono total almacenado en la plantación forestal

En la figura 19 se presenta un gráfico de barras en el eje X se encuentran distribuidos los 44 lotes agrupados según rangos de valores del eje Y, esta agrupación de rangos se realizó analizando los valores mínimos, medios y máximos con respecto a la suma de carbono aéreo y de las raíces de cada lote, obteniendo un gráfico más ordenado y representativo. Se observa la agrupación mayor de 0-99 toneladas de carbono almacenado con 21 lotes, seguida de una agrupación media de 6, 4 y 5 lotes entre los rangos de 100- 199, 200- 299, 300-399 toneladas de carbono, en los rangos máximos de 3 lotes que se encuentran entre 1000- 1800 toneladas.

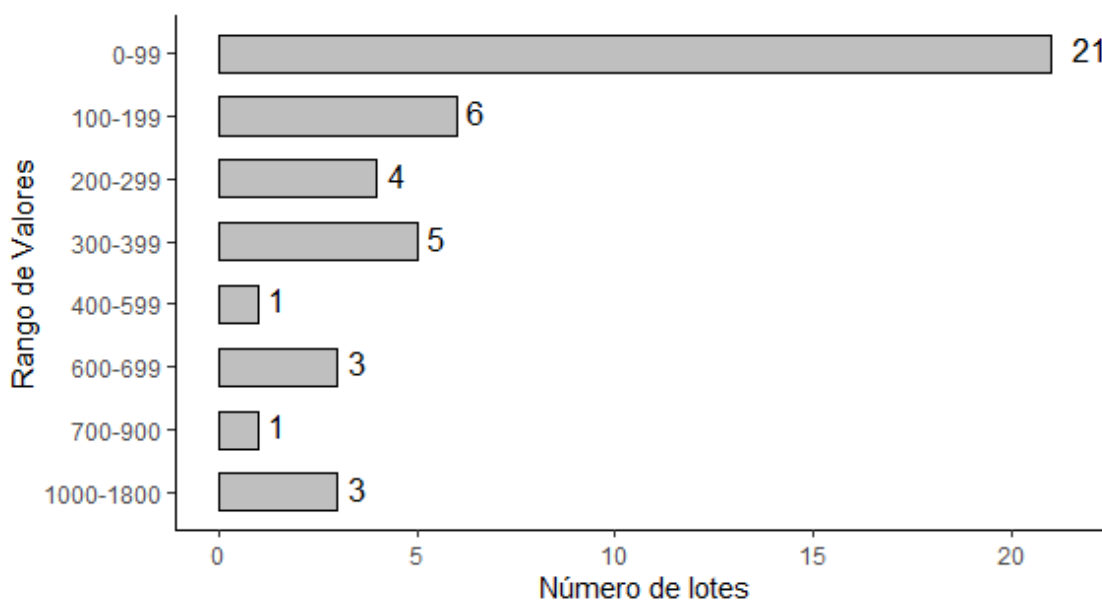


Figura 19. Carbono total almacenado en los lotes ordenado por rangos.

En la figura 19, la mayoría de los lotes 21 se encuentran en el rango de 0-99 toneladas de carbono total seguido de un rango medio de 6, 5 y 4 lotes para un total de 15 lotes entre el rango de 100- 399 toneladas, 3 lotes, en el rango mayor de 1000-1800 toneladas de carbono

total almacenado. Al hacer la suma de carbono almacenado aéreo y de las raíces de cada lote tenemos un total de carbono almacenado es de 12,836 toneladas.

López-Reyes et al. (2016) determinaron el carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de *H. brasiliensis* establecidas en Tabasco de distintas edades con el ajuste de ecuaciones alométricas, determinaron que el carbono varía para cada edad, ante ello estimaron que en la plantación de cinco años de edad el carbono almacenado es de 26.28 ton ha⁻¹ con una densidad de 491 árboles ha⁻¹, este resultado es diferente a lo obtenido para *G. arborea* establecida en Tlatlaya, Estado de México la cual almacena 8.31 ton ha⁻¹ a la edad de tres años.

Cámara et al. (2013) reportan carbono acumulado en los componentes del arbolado de la plantación de *G. arborea* a los tres años fue de 6.07 ton ha⁻¹ en el fuste, 1.49 ton ha⁻¹ en las ramas, 0.76 ton ha⁻¹ en las raíces y 8.31 ton ha⁻¹ de carbono total acumulado, este resultado es menor a lo reportado por Jiménez (2016) quien determino que el carbono almacenado es de 15.54 ton ha⁻¹ en plantaciones de *G. arborea* en condiciones similares.

Forero et al. (2018) estimaron la captura de carbono en la biomasa de *G. arborea* en una plantación establecida en Colombia, determinaron que a la edad de cinco años el carbono almacenado es de 41.6 ton ha⁻¹.

Cámara et al. (2013) emplearon ecuaciones para cuantificar el carbono almacenado en plantaciones establecidas en Tabasco de *Eucalyptus europhylla* S. T., determinaron que el carbono almacenado es de 14.75 ton ha⁻¹ y 68.29 ton ha⁻¹ respectivamente, las condiciones edafoclimáticas del área de estudio de la plantación son parte de factores que determinan la capacidad de almacenar carbono.

Según Brown (1988), el bosque tropical seco tiene por término medio 27 tC/ha, en América Latina. Aunque la cantidad reportada por el sistema de PFC, es menor a la estimada por Brown 15.03 tC/ha, de igual forma no se puede realizar una comparación debido a que es un dato generalizado para toda América Latina (Andrasko K., 1990).

De los estudios realizados en este tipo de sistema sobre carbono se puede mencionar investigación realizada por Siu et al., (2001), sobre la estimación y almacenamiento de carbono en el refugio de vida silvestre Chacocente, con la finalidad de estimar el contenido de carbono y almacenamiento en el bosque en diferentes niveles de edades; de cero, doce, veinte y cincuenta años. Los resultados obtenidos en esta investigación mostraron estimación

de carbono en el nivel cero años de 212.05 tC/ha, nivel doce 216.4 -297.4tC/ha, nivel de veinte 231.2 – 312.1 tC/ha, y el nivel de cincuenta años 244.9 - 306.4 tC/ha.

El promedio obtenido en la PFC es de 15.03 tC/ha, si lo comparamos con los resultados obtenidos por Brown (1988), es ligeramente menor al promedio indicado por el autor, por otro lado, Wilson y Siu (2007), obtuvieron resultados mayores a los presentados por Brown. Pero en este aspecto se tiene que valorar que los autores en las investigaciones anteriores realizaron un stock de carbono muy completo y detallado en donde se tomaron en cuenta factores como biomasa aérea, biomasa de raíces, hojarasca, suelo. Mientras que en la presente investigación solo se tomó en cuenta biomasa aérea y biomasa de las raíces por esta razón el stock de carbono de la PFC es relativamente bajo en comparación a otros estudios en zonas de trópico seco.

5.6. Cartografía de la distribución espacial de variables forestales utilizando SIG

En la figura 20 se presenta un mapa de distribución de la densidad de volumen de los 44 lotes de la finca eco-forestal agrupados según 5 categorías desde muy bajo, menor a 40 m³, hasta muy alto, mayor a 200 m³.

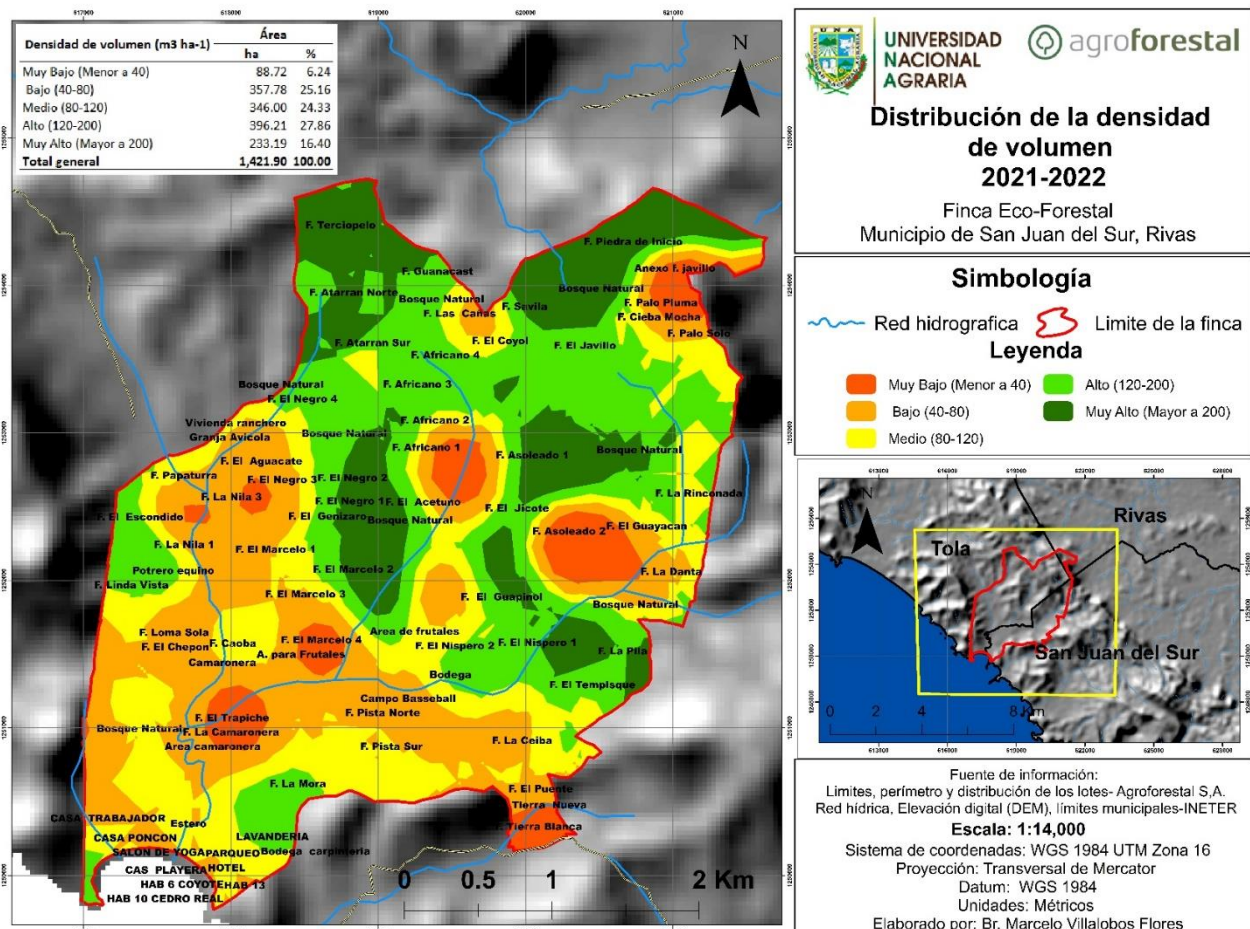


Figura 20. Mapa de la distribución de la densidad de volumen de la finca Eco-Forestal, en el periodo 2021-2022

En la figura 20, se observa una distribución homogénea en cuanto a disponibilidad de madera para ser aprovechada en los diferentes periodos de extracción estipulados en el plan de cosecha de la plantación, tenemos que un 16.48 % del área de la propiedad se encuentra en un rango entre 200 a más m^3 , de madera por hectárea, seguido de un 28 % se encuentra en un rango alto entre los 120 a 200 m^3 aprovechables por hectárea, de igual forma un 25 % se encuentra en un rango medio de producción maderable entre los 80 a 120 m^3 . Esto nos indica que la plantación cuenta con una línea sólida de aprovechamiento a lo largo del tiempo ya que en su mayoría los lotes poseen arboles con diámetros disponibles entre 15 a 25 cm para aprovechar, solo un 6.24% del área posee muy bajo volumen para aprovechar.

La cartografía generada permitió predecir la distribución de volumen, lo cual es notable en los lotes Terciopelo, Piedra de indio, Ataran, africano, el Negro, La Pila, El Níspero, que se encuentran entre la escala de Alto y Muy Alto, esto permitirá a la empresa que pueda tomar decisiones acertadas en el aprovechamiento de los árboles de lotes mencionados anteriormente.

Hay una serie de estudios que emplean la Geoestadística en el mapeo de la biomasa aérea y el volumen, por ejemplo, en el estudio de Maselli & Chiesi (2006) se estimó el volumen de la madera, derivado de información obtenida de los sitios de muestreo del inventario forestal, mediante Kriging ordinario ajustado a un modelo exponencial y no asumiendo efecto pepita en un bosque de Toscana en Italia. Los resultados muestran un error cuadrático medio de $99.4m^3$ /ha y una correlación entre el volumen estimado y el medido de 0.56, por lo que concluyen que este método es limitado en la estimación de parámetros cuyos valores varían abruptamente

Liu et al. (2008) exploraron el potencial de usar los datos de estado de sucesión del Inventario Forestal en un bosque del oeste de Oregón (Estados Unidos), mediante métodos de modelamiento geoestadístico y redes neuronales. Los árboles de decisión y las redes neuronales presentan menor incertidumbre que los métodos tradicionales utilizando imágenes satelitales. Concluyen que la relación mediante imágenes tiene la limitante de sólo poder separar este estado en las etapas de joven, maduro y viejo, así el uso multitemporal de imágenes puede mejorar la precisión de conocer el estado de sucesión del bosque.

Dong (2003) relacionó estadísticamente mediante sensores remotos el método de interpolación Kriging Simple la biomasa aérea y subterránea de datos de inventarios de 167 provincias y estados de 6 países (Canadá, Finlandia, Noruega, Rusia, Estados Unidos y Suecia) además de evaluar los alcances de los modelos de regresión como método para establecer esta relación y encontró una correlación de moderada a baja ($r^2 = 0.47$) concluyendo que la validez de dicha relación es todavía una incógnita.

Existe una serie de trabajos que relacionan la coherencia con la biomasa aérea y volumen, por ejemplo, en el estudio de Luckman et al. (2000), se analizó la relación entre la coherencia obtenida utilizando métodos geoestadísticos de interpolación con la densidad de la biomasa estimada en campo en un bosque tropical del Amazonas en Brasil, donde resultaron altas correlaciones, por lo que concluyen que la interpolación presenta una relación más sensible respecto a la biomasa.

Tansey et al. (2004) estimó el volumen de bosques de Siberia (Rusia), Reino Unido y Suecia a partir de un algoritmo de interpolación logarítmica calibrado con la coherencia derivada de imágenes ERS, donde resultó en una fiabilidad del 86% del bosque de Rusia, 71% en Reino Unido y 70% en Suecia, por lo que concluyen que estos resultados muestran que el algoritmo de clasificación obtiene una representación precisa y realista para diferentes tipos de masas forestales.

Santoro et al. (2007) examinaron la relación entre el volumen de plantaciones comerciales de Siberia en Rusia y la coherencia derivada de un algoritmo de interpolación logarítmica calibrado con la coherencia derivada de imágenes ERS, y encontraron que la variabilidad de la coherencia resultante del volumen es principalmente dada por las condiciones ambientales en el tiempo de la adquisición y que el uso de estos datos es muy conveniente para la estimación del volumen en bosques y plantaciones que presentan un manejo silvícola.

Sales et al. (2007) mapeó la distribución espacial de la biomasa forestal usando Kriging con deriva externa, el cual es un estimador multivariado pues se auxilia de variables externas relacionadas con las de interés para una mejor estimación. En este estudio se consideró la textura del suelo, el tipo de bosque y la altitud en la Amazona Brasileña. Los resultados muestran un error cuadrático medio de 35.4, por lo que concluyen que el empleo de la geoestadística es más apropiado para estimar la distribución de la biomasa aérea que el uso de un promedio simple o técnicas estadísticas que no contemplan la correlación espacial.

En la figura 21 se presenta un mapa de distribución de la densidad de carbono de los 44 lotes de la finca Eco-forestal agrupados según 5 categorías desde Muy Bajo menor a 5 tC/ha, hasta Muy Alto mayor a 50 tC/ha.

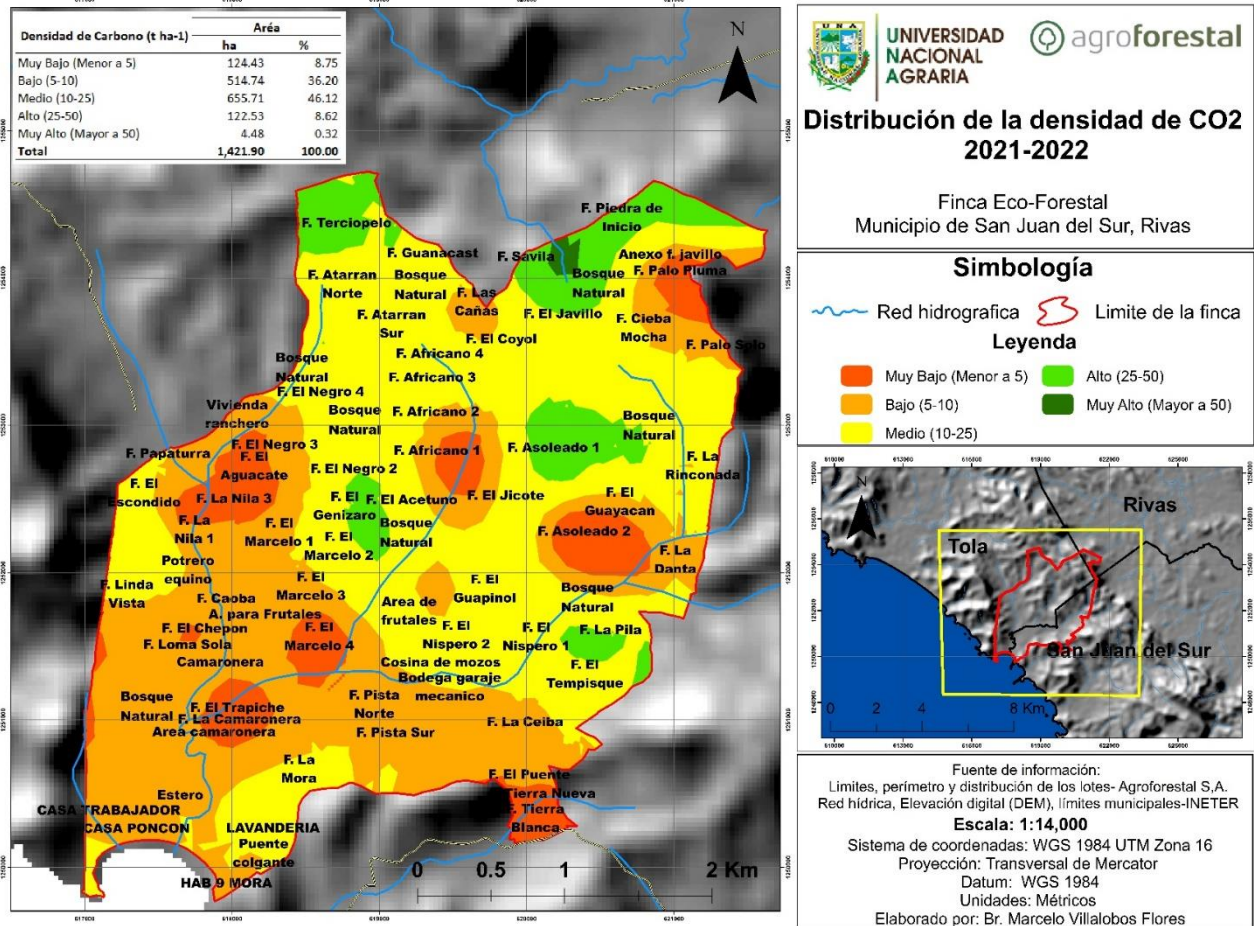


Figura 21. Mapa de la distribución de la densidad de carbono, de la finca Eco-forestal, en el periodo 2021-2022.

En la figura 21, no se presenta una distribución homogénea en cuanto a almacenamiento de carbono, tenemos que un 8.75% del área de la propiedad se encuentra en un rango Muy Bajo de captura de carbono menor a 5 tC/ha, seguido de un 36.20% en un rango Bajo de captura entre 5 a 10 tC/ha, el rango más representativo es un almacenamiento Medio de 10 a 25 tC/ha representado el 46% del área total, de 25 a 50 tC/ha apenas un 8.32%, habiendo solo 0.32% (4ha), en un rango Muy Alto de captura de CO₂.

En cuanto a la distribución espacial de carbono en la plantación forestal es poco homogéneo debido a la diferencia de edades en el establecimiento presentando un almacenamiento medio en los lotes establecidos entre los años 2000 a 2002 y alto los establecieron en 1998

y 1999. Los lotes que se encuentran en el rango de Bajo y Muy Bajo son los que se establecieron en los años de 2008 a 2012, actualmente están en procesos de raleo.

Coulibaly et al. (2008) mapeó la biomasa aérea mediante Kriging Ordinario ajustando el variograma experimental con 5 modelos teóricos (lineal, esférico, circular, exponencial y gaussiano) en bosques de Nueva Inglaterra en Estados Unidos. Los resultados muestran la mejor interpolación se da usando el modelo Gaussiano con un valor error cuadrático medio de 39.18%, por lo que concluyen que es una estimación aceptable debido a la discontinuidad que se presenta en los bosques, además de que deberían explorarse otros métodos de interpolación univariados y multivariados.

Melo (2015) estimó con ecuaciones alométricas y modelos basados en interpolación de variables (radiación fotosintéticamente activa, temperatura, disponibilidad de agua en el suelo, etc.), que la plantación forestal de *G. arborea* con una densidad de arbolado de 1 100 árboles ha⁻¹ de seis años de edad establecida en Colombia a una altitud de 595 m almacena 24.39 ton ha⁻¹.

Por su parte Douterlungne et al. (2013) determinaron que los mejores predictores son el dap y el diámetro de la base en el ajuste de ecuaciones para estimar biomasa y carbono mediante métodos de interpolación en plantaciones con fines de restauración de *Guazuma ulmifolia* Lam., *Trichospermum mexicanum* (DC.) Baill., *Inga vera* Wild. y *Ochroma pyramidale* (Cav. Ex Lam) con densidades de 1 600 árboles ha⁻¹ establecidas en Chiapas, establecieron que las plantaciones de *T. mexicanum* y *G. ulmifolia* presentan más eficiencia como sumideros de carbono y concluyen que las tasas de acumulación no son extrapolables para cuantificar el carbono almacenado a largo plazo.

Lugo et al. (2004) mencionan que la tasa anual de acumulación de biomasa y carbono declina con la edad de la plantación al aumentar la competencia entre los árboles.

Galeana Pizaña (2012). Un mapa de contenido de carbono para conocer la distribución espacial a través de la cuenca mediante métodos geoestadísticos de interpolación Kriging Ordinario ajustado a un modelo esférico con un valor medio de 59.02 tC/ha.

Galeana Pizaña (2012). obtuvo una estimación puntual del promedio de carbono almacenado en biomasa aérea para el caso del Bosque de Oyamel de 92.048 tC/ha y para el caso del bosque de Pino de 47.26 tC/ha. Con un mínimo de 25.07 y 4.52 tC/ha y máximo de

212.25 y 229.48 tC/ha respectivamente. Para el caso de los Oyameles se presenta una desviación estándar de 43.28 tC/ha y para Pinos de 37.72 tC/ha.

Galeana Pizaña (2012). Concluye que los modelos derivados del uso del método de Regression-Kriging los que presentan la menor incertidumbre para ambas coberturas. En segundo lugar, estuvieron las estimaciones derivadas de los modelos de regresión y por último las estimaciones derivadas del método de Co-kriging Ordinario.

Estos resultados se pueden deber a que el método de Regression-Kriging es sensible a las variaciones locales tal como concluyen los trabajos de Hengl et al. (2003) y Eldeiry & García (2009), ya que está desarrollado especialmente para tener en cuenta el ajuste del modelo de varianza espacial, con el propósito de mejorar la predicción derivada de modelos globales (modelo de regresión), en comparación con el método de Co-Kriging, que requiere que se disponga de un número elevado de sitios de muestreo para una adecuada estimación.

VI. CONCLUSIONES

Las variables dasométricas analizadas indican que los factores externos y la falta de uniformidad en el establecimiento de la plantación es causante de que los volúmenes estén concentrados en pocos rangos diamétricos, a pesar de que existe correlación entre diámetro y altura (0.46) Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta relación no siempre es lineal y puede variar según la especie y las condiciones ambientales. Por otro lado, se necesitan más investigaciones en diferentes zonas y condiciones ambientales para determinar si esta relación es universal. Además, es importante considerar otros factores que pueden influir en la altura del árbol, como la disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo. La caoba africana presenta un buen desarrollo y se adapta muy bien a la zona debido a la resiliencia genética de la semilla y por el raleo pre comercial realizado en tiempo y forma.

La cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea de cada lote de la plantación está en dependencia de la Densidad (arb/ha) y volumen de los árboles en el lote, se destaca el hecho de que en la mayoría de los lotes inventariados la biomasa es menor a 99 toneladas. En total la finca presenta una captura de 12,836 toneladas de carbono. Lo cual representa un valor agregado para poder competir en los mercados de carbono a través de mecanismos de bonos de carbono.

La creación de cartografía de la densidad de carbono y volumen a través de métodos geoestadísticos son un indicativo para el aprovechamiento forestal en función de la superficie o espacio que ocupa en el área de estudio, y sirve como instrumento para la certificación de bonos de carbono. Los resultados obtenidos en la distribución espacial de las variables forestales son comparables con el análisis estadístico de los datos levantados en campo.

La distribución de biomasa y carbono almacenado en los componentes del arbolado de la plantación de la finca Eco-forestal, presentaron diferencia estadística significativa para las distintas edades de medición. Los valores utilizados de las variables dasométricas en la ecuación para estimar el carbono almacenado en la plantación comercial establecida en San Juan del Sur, Rivas, Nicaragua, pueden variar por factores extrínsecos e intrínsecos (edad, condiciones edafoclimáticas, prácticas silvícolas y densidad de árboles).

VII. RECOMENDACIONES

Realizar estudios para el desarrollo de ecuaciones alométricas para estimar biomasa por especie, con el propósito de obtener datos más confiables acorde a las condiciones ambientales del sitio estudiado y del componente, para estimar la cantidad de carbono que se puede fijar.

Al momento que la empresa realice la corta de árboles, realizar las mediciones para la construcción de ecuaciones alométricas que estimen la biomasa por especie o grupos de especies en convenio con INAFOR, UNA y la empresa, y estudio para actualizar el factor mórfico de las especies que más se aprovechan en la empresa.

Que la empresa complete el stock de carbono e incorporar el monitoreo de carbono almacenado en el suelo y la hojarasca, de esta forma la empresa puede certificar su fijación de carbono y competir en mercados internacionales de bonos de carbono.

Aprovechando los inventarios forestales de las otras fincas que maneja la empresa Agroforestal S.A, replicar este estudio en dichas áreas con la finalidad de que la empresa beneficie a futuros tesisistas o brinde el espacio a futuros investigadores que estén interesados en esta línea de investigación.

Los valores obtenidos en este estudio pueden ser empleados como valores de referencia de los sistemas de plantaciones forestales comerciales en otras zonas del pacifico de Nicaragua, sin embargo, es necesario evaluar en otras zonas ecológicas con sistemas similares para disponer de datos estratificados por zonas y de esta manera aproximarse a estimaciones bastante reales por sistema y territorio.

VIII. LITERATURA CITADA

- Alfaro, M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en ecosistema forestales. Revista forestal Centro Americana No 19, Abril – junio 1997. Recuperado de <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5763>
- ARGÜELLES S., L. A.; ROMÁN B., F. S.; CABALLERO R., A.; RAMÍREZ S., E. 1998. Programa de manejo forestal para el bosque tropical del Ejido Noh bec. Tropica Rural Latinoamericana A.C. Quintana Roo, México. 99 pp. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/629/62990107.pdf>
- Ávila, G. 2001. Almacenamiento, Fijación de Carbono y Valoración de Servicios Ambientales en Sistemas Agroforestales en Costa Rica. Avance de Investigación. Agroforesterías en las Américas Vo. 8, No. 30 2001. CATIE, Costa Rica. Recuperado de <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5765>
- AZQUETA, D. (2002). Introducción a la Economía Ambiental. Madrid: McGraw-Hill. Doi: 978-84-481-6058-6
- Barrantes, R. 2002. Investigación: Un camino al Conocimiento, Un enfoque cualitativo y cuantitativo. 6ta edición. San José, CR, Editorial Universidad Estatal a Distancia. 261p. Recuperado de
- CATIE, 1999. Estimación y valoración económica del almacenamiento de carbono N.º 27. Revista forestal Centro Americana. Recuperado de <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5765>
- Dixon John A. et al. Evaluación Económica del Servicio Ambiental de Almacenamiento de Carbono: El caso de un bosque húmedo tropical bajo diferentes estrategias de manejo sostenible. Estudio de caso versión latinoamericana. Recuperado de <https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/imported/CIFOR-PESSpanish.pdf>
- Dixon, A; Scura, F; Carpenter, A; Sherman, B. 1994. Análisis económico de impacto ambiental. Desarrollo ambiental y el papel del análisis económico. Turrialba, CATIE. 249 P. Recuperado de <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2148>
- FAO. 2000. LA contribución forestal para la mitigación del cambio climático. In reunión la contribución forestal para la mitigación del cambio climático. (4 – 6 de octubre 1999, Tegucigalpa, Honduras) Boletín Informativo de los programas forestales nacionales. 2(4): 17 – 18. Recuperado de <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/23804>
- Fonseca, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. Revista de Ciencias Ambientales, 51(2), 91-109. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/6650/665070588007.pdf>
- Hernández Ramos, J. (2016). Estimación de biomasa aérea y volumen en plantaciones forestales de Eucalyptus urophylla ST Blake en Huimanguillo, Tabasco (Master's thesis). Recuperado de <http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/3424>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. 2006. Metodología de la Investigación. 4ta edición. México, McGraw-Hill. 839p.

- Hernández-Ramos, J., Santos-Posadas, H., Valdez-Lazalde, J. R., Tamarit-Urias, J. C., Ángeles-Pérez, G., Hernández-Ramos, A., ... & Carrero, O. (2017). Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* ST Blake. *Agrociencia*, 51(8), 921-938. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S140531952017000800921&script=sci_arttext
- Jauregui, K. F. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar volumen y biomasa aérea de *Enterolobium cyclocarpum* y *Ceiba pentandra* en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras. Recuperado de <https://bdigital.zamorano.edu/items/12bef473-8914-49b2-bcc4-5cd15ea814b4>
- Jiménez Pérez, J., Telles Antonio, R., Alanís Rodríguez, E., Yerena Yamallel, J. I., García, D. A., & Gómez Cárdenas, 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. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200711322020000100032
- Locatelli, B. 1999. Bosques tropicales y ciclo del carbono traducido por el ministerio de Recursos Naturales y del Ambiente. Proyecto cambio climático. Programa ambiental Nicaragua Finlandia. Recuperado de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=XAYzZbDa8wwC&oi=fnd&pg=PA7&dq=related:vgMRkEe_a-sJ:scholar.google.com/&ots=Xrs2xDXvmH&sig=nhUU2IOFteE-MreFqHJGOSmOl-o#v=onepage&q&f=false
- Méndez, I., Namihira, D., Moreno, L. y Sosa, C. 1990. El Protocolo de Investigación: lineamientos para su elaboración y análisis. 2ª ed. México. Editorial Trillas, S.A. de C.V. 256p.
- Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Nicaragua. Año de referencia 1994. Proyecto Primera Comunicación Nacional. PNUD-NIC/98/ G 31- MARENA. Managua, Nicaragua, marzo, 2001.
- ORDÓÑEZ, A. 1999. Estimación preliminar del contenido de carbono para el Ejido de San Pedro Jacuaro, Michoacán, México. Instituto de Ecología. UNAM. México. 73 p Recuperado de http://148.204.117.30/jspui/handle/LITER_CIIDIROAX/208
- Pérez Zelaya, M. I., & Ruíz Quezada, J. T. (2003). Cuantificación del carbono almacenado en suelo de café (*Coffea arabica* L.) con sombra en la Hacienda Santa Maura, Jinotega, Nicaragua (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Agraria, UNA). Recuperado de <https://repositorio.una.edu.ni/1035/>
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Ramírez, O. A., & Gómez, M. (1999). Estimación y valoración económica del almacenamiento de carbono. *Revista Forestal Centroamericana Volumen 8, número 27* (julio-septiembre 1999), páginas 17-22. Recuperado de <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9798>
- Rosas Espinoza, A. Z. (2011). Determinación de la cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea y en el suelo en plantaciones de teca (*Tectona grandis* LF) en el cantón Quinindé,

Provincia de Esmeraldas (Bachelor's thesis, Quevedo: UTEQ). Recuperado de <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/2087>

SMITH, T. M.; CRAMER, W. P.; DIXON, R. K.; LEEMANS, R.; NEILSON, R. P.; SOLOMON, A. M. 1993. The global Terrestrial Carbon Cycle. Water, air and Soil Pollution. Kluwer Academic Publisher. Netherlands. 70 pp. 19-37. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01104986>

TABARES, E. (2014a). Diagnóstico sobre la aplicación de la valoración económica ambiental en el país. Producto No. 2. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, s.p. Recuperado de <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/35145>

Telles Antonio, R. (2019). Estimación del rendimiento forestal con información espacialmente explícita de una plantación forestal comercial en México (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León). Recuperado de <http://eprints.uanl.mx/21675/1/21675.pdf>

TORRES P., A. J. 2001. Valoración económica de los bienes y servicios ambientales de un bosque tropical. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 124 p. Recuperado de <https://idus.us.es/handle/11441/57494>

URIBE, E.; MENDIETA, J.C.; JAIME, H; & CARRIAZO, F. (2003). Introducción a la valoración ambiental, y estudios de caso. Uniandes, Bogotá. 220p. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262022000100015

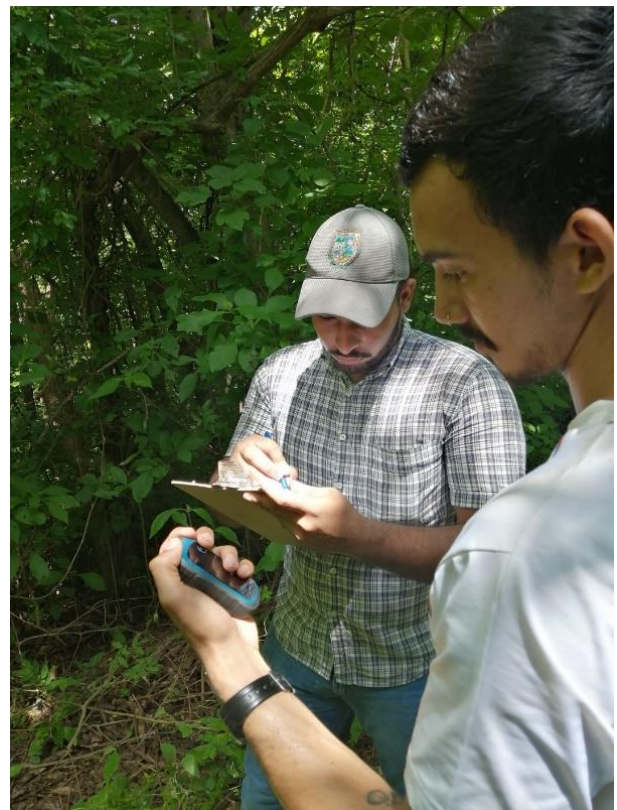
Wickham, H. (2016). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org/>.

XIX. ANEXOS

Anexo 1. Diseño del inventario forestal y distribución de roles de trabajo



Anexo 2. Levantamiento de datos en campo

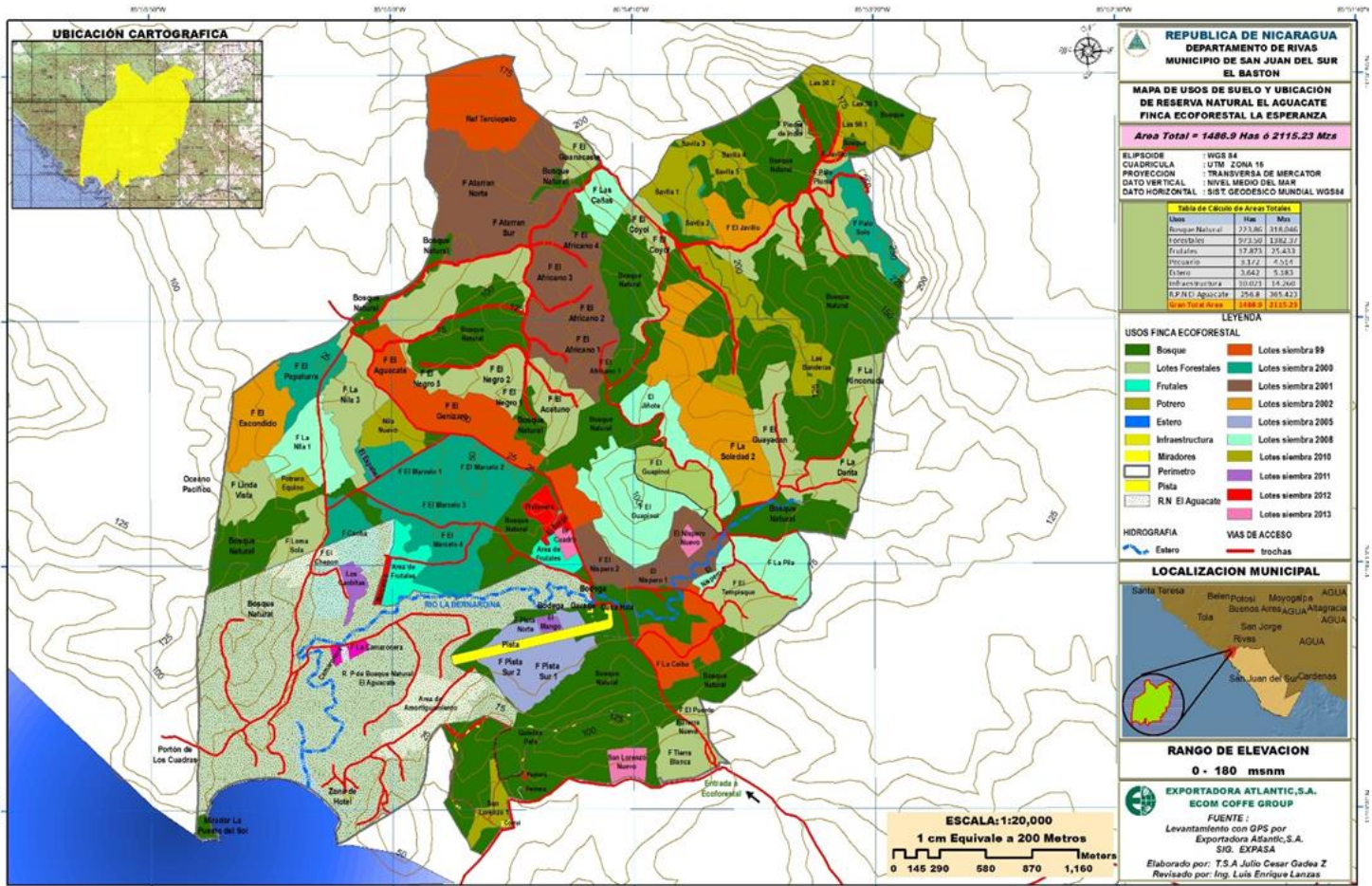






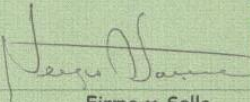

Anexo 3. Formato de campo

UNIDAD DE MANEJO FORESTAL FINCA ECOFRESTAL										
INVENTARIO FORESTAL										
FECHA:		LOTE:								
TECNICO DE CAMPO:										
ARBOL	ESPECIE	DAP (cm)	ALTC	ALTT	ARBOL	ESPECIE	DAP (cm)	ALTC	ALTT	

Anexo 4. Plano de Campo de los lotes en la finca Eco-Forestal



Anexo 5. Inscripción de la plantación forestal

	<p>República de Nicaragua Instituto Nacional Forestal INAFOR</p>				
<p>CONSTANCIA DE INSCRIPCION DE PLANTACION FORESTAL</p>					
<table border="1"><tr><td>15</td><td>09</td><td>0005</td></tr></table>			15	09	0005
15	09	0005			
<p>EL INSTITUTO NACIONAL FORESTAL CERTIFICA QUE: <u>ECOFORESTAL S.A.</u> UBICADO EN LA FINCA <u>ECOFORESTAL</u> EN LA LOCALIDAD CONOCIDA COMO <u>EL AGUACATE</u> DEL MUNICIPIO <u>SAN JUAN DEL SUR</u> DEL DEPARTAMENTO DE <u>RIVAS</u>, SE LE INSCRIBIO UNA PLANTACION FORESTAL, QUE GOZARA DE TODOS LOS BENEFICIOS DE LEY.</p>					
<p>Dado en la ciudad de <u>MANAGUA</u> a los <u>28</u> dias del mes <u>NOVIEMBRE</u> del año 2001.</p>					
<p> Firma y Sello Dir. Control de Operaciones Territoriales</p>					

Anexo 6. Tabla de cálculo de Volumen m³.

Lote	Vol.total_Parcela	Vol. Hectárea	Área (ha)/Lote	Vol.m³ Lote
Africano	3.53	14.12	51.00	720.27
Atarran	17.47	69.86	20.00	1.397.24
Camaronera	5.10	20.38	12.96	264.12
Caoba (Chepon)	23.80	95.19	46.66	4.441.43
El aguacate	10.78	43.11	6.64	286.25
El Cuadro	20.52	82.09	2.76	226.56
El Javillo	34.04	136.17	30.00	4.085.20
El Níspero	35.35	141.40	25.59	3.618.52
El Plátano	37.75	151.01	3.80	573.85
El Sorgo	26.95	107.80	1.71	184.33
Escondido	40.66	162.64	18.80	3.057.70
Espavel	11.59	46.36	0.59	27.35
Genizaro	13.36	53.45	22.01	1.176.45
Guapinol	43.11	172.45	40.00	6.897.90
Guayacán	7.65	30.62	15.00	459.28
Jiñote	11.78	47.14	24.68	1.163.35
La Ceiba	13.27	53.07	10.21	541.81
La asoleada	1.45	5.82	30.00	174.47
La Cincuenta	78.32	313.27	18.05	5.654.56
La Danta	8.81	35.26	12.83	452.22
La Mora	43.79	175.15	24.13	4.226.43
La Nancitada	45.26	181.05	78.86	14.277.60
La Nila	8.44	33.76	18.65	629.57
La Pista norte	14.23	56.93	27.30	1.554.13
La Rinconada	66.26	265.04	9.17	2.431.19
Las Banderas	22.95	91.79	18.00	1.652.17
Las Banderas	63.45	253.78	18.00	4.568.11
Las Cañas	14.44	57.78	8.42	486.67
Las caobitas	11.45	45.80	3.58	163.98
Las Pilas	83.08	332.30	17.11	5.685.66
Linda Vista	42.15	168.59	13.90	2.343.46
Loma sola	10.69	42.77	35.97	1.538.50
Los negros	54.17	216.66	35.00	7.583.23
Marcelo	73.04	292.16	62.08	18.137.00
Marcelo 4	6.11	24.44	6.56	160.32
palo pluma	3.20	12.79	2.48	31.66
palo solo	25.99	103.97	11.87	1.233.76
Papaturro	9.60	38.42	12.48	479.44
Piedra del Indio	38.27	153.08	6.16	942.64
Pista sur	14.10	56.39	6.00	338.33
San lorenzo	2.55	10.19	16.70	170.25

Savila	123.15	492.59	31.00	15.270.19
Tempisque	44.01	176.04	15.25	2.684.63
Tierra Nueva	6.44	25.75	11.53	296.94
Total, general	1,272.11	5,088.44	785.10	122,288.75

Anexo 7. Tabla de Biomasa aérea, raíces y total estimado por el método de ecuaciones alométricas.

Lotes	Biomasa A.	Biomasa R.	Biomasa Total ha	Área Lotes	Biomasa total Lotes
Africano	2.72	0.41	3.13	51	159.50
Atarran	11.69	1.75	13.44	20	268.80
Camaronera	3.99	0.60	4.59	12.96	59.47
Caoba (Chepon)	14.89	2.23	17.12	46.66	798.91
El aguacate	6.09	0.91	7.00	6.64	46.47
El Cuadro	15.94	2.39	18.33	2.76	50.58
El Javillo	22.60	3.39	25.99	30.00	779.63
El Níspero	23.33	3.50	26.82	25.59	686.42
El Plátano	28.92	4.34	33.25	3.80	126.37
El Sorgo	20.34	3.05	23.39	1.71	40.00
Escondido	31.27	4.69	35.96	18.80	676.03
Espavel	8.92	1.34	10.26	0.59	6.05
Cenízaro	8.75	1.31	10.06	22.01	221.38
Guapinol	30.60	4.59	35.19	40.00	1.407.46
Guayacán	5.20	0.78	5.97	15.00	89.62
Jiñote	8.46	1.27	9.73	24.68	240.25
La Ceiba	7.82	1.17	9.00	10.21	91.85
La asoleada	1.70	0.25	1.95	30	58.49
La Cincuenta	61.63	9.24	70.88	18.05	1.279.32
La Danta	6.13	0.92	7.05	12.83	90.37
La Mora	26.51	3.98	30.48	24.13	735.60
La Nancitada	38.79	5.82	44.61	78.86	3.517.99
La Nila	5.62	0.84	6.46	18.65	120.51
La Pista norte	13.08	1.96	15.04	27.30	410.51
La Rinconada	50.46	7.57	58.02	9.17	532.25
Las Banderas	17.33	2.60	19.93	18.0	358.78
Las Banderas	55.67	8.35	64.03	18	1.152.47
Las Cañas	10.15	1.52	11.67	8.42	98.30
Las caobitas	8.85	1.33	10.18	3.58	36.45
Las Pilas	64.35	9.65	74.01	17.11	1.266.28
Linda Vista	30.47	4.57	35.04	13.90	487.02
Loma sola	5.99	0.90	6.89	35.97	247.80
Los negros	34.74	5.21	39.96	35.00	1.398.44
Marcelos	48.00	6.17	55.19	62.08	3.426.20
Marcelo 4	3.99	0.60	4.58	6.56	30.07

palo pluma	2.75	0.41	3.16	2.48	7.82
palo solo	16.51	2.48	18.99	11.87	225.30
Papaturro	5.23	0.78	6.01	12.48	75.04
Piedra del Indio	27.05	4.06	31.11	6.16	191.58
Pista sur	8.28	1.24	9.52	6	57.15
San Lorenzo	2.30	0.35	2.65	16.70	44.27
Savila	97.70	14.65	112.35	31	3.482.84
Tempisque	30.29	4.54	34.84	15.25	531.26
Tierra Nueva	4.29	0.64	4.93	11.53	56.83
Total, general	929.41	139.41	1,068.82	873.47	25,667.75

Anexo 8. Tabla de cálculo de carbono aéreo, raíces y total almacenado en cada lote

Lotes	Carbono A. Total	Carbono R. Total	Área Lotes	Carbono Total lotes
Africano	69.35	10.40	51.00	79.75
Atarran	116.87	17.53	20.00	134.40
Camaronera	25.86	3.88	12.96	29.73
Caoba (Chepon)	347.35	52.10	46.66	399.46
El aguacate	20.21	3.03	6.64	23.24
El Cuadro	21.99	3.30	2.76	25.29
El Javillo	338.97	50.85	30.00	389.82
El Níspero	298.44	44.77	25.59	343.21
El Plátano	54.94	8.24	3.80	63.18
El Sorgo	17.39	2.61	1.71	20.00
Escondido	293.92	44.09	18.80	338.01
Espavel	2.63	0.39	0.59	3.03
Cenízaro	96.25	14.44	22.01	110.69
Guapinol	611.94	91.79	40.00	703.73
Guayacán	38.96	5.84	15.00	44.81
Jiñote	104.46	15.67	24.68	120.12
La Ceiba	39.94	5.99	10.21	45.93
La asoleada	25.43	3.81	30.00	29.24
La Cincuenta	556.23	83.43	18.05	639.66
La Danta	39.29	5.89	12.83	45.18
La Mora	319.83	47.97	24.13	367.80
La Nancitada	1.529.56	229.43	78.86	1.758.99
La Nila	52.40	7.86	18.65	60.26
La Pista norte	178.48	26.77	27.30	205.26
La Rinconada	231.41	34.71	9.17	266.12
Las Banderas	155.99	23.40	18.00	179.39
Las Banderas	501.07	75.16	18.00	576.23
Las Cañas	42.74	6.41	8.42	49.15

Las caobitas	15.85	2.38	3.58	18.22
Las Pilas	550.56	82.58	17.11	633.14
Linda Vista	211.75	31.76	13.90	243.51
Loma sola	107.74	16.16	35.97	123.90
Los negros	608.02	91.20	35.00	699.22
Marcelos	1.489.92	223.49	62.08	1.715.27
Marcelo 4	13.08	1.96	6.56	15.04
palo pluma	3.40	0.51	2.48	3.91
palo solo	97.95	14.69	11.87	112.65
Papaturro	32.63	4.89	12.48	37.52
Piedra del Indio	83.30	12.49	6.16	95.79
Pista sur	24.85	3.73	6.00	28.57
San Lorenzo	19.25	2.89	16.70	22.13
Savila	1.514.28	227.14	31.00	1.741.42
Tempisque	230.98	34.65	15.25	265.63
Tierra Nueva	24.71	3.71	11.53	28.41
Total, general	11.160.16	1.674.02	873.48	12.836.05