

**EVALUACION DE LA PRODUCTIVIDAD Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN
LA BIOMASA AEREA DEL SISTEMA AGROFORESTAL CACAO (*Theobroma cacao* L.)
Y GMELINA (*Gmelina arborea* Roxb.)**

JUÁN CARLOS VALENCIA

UNIVERSIDAD DE NARIÑO

MAESTRÍA EN AGROFORESTERÍA TROPICAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS DE POSTGRADOS EN CIENCIAS

AGRARIAS

SAN JUAN DE PASTO

2019

**EVALUACION DE LA PRODUCTIVIDAD Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN
LA BIOMASA AEREA DEL SISTEMA AGROFORESTAL CACAO (*Theobroma cacao* L.)
Y GMELINA (*Gmelina arborea* Roxb.)**

JUAN CARLOS VALENCIA

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de
Magister en Agroforestería Tropical**

Presidente

WILLIAM BALLESTEROS POSSÚ, PhD.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO

MAESTRÍA EN AGROFORESTERÍA TROPICAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS DE POSTGRADOS EN CIENCIAS

AGRARIAS

SAN JUAN DE PASTO

2019

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en el trabajo son responsabilidad exclusiva de su autor”

Artículo 1º de acuerdo 324 de octubre 11 de 1966 emanado por el Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño

NOTA DE ACEPTACIÓN

Tulio Cesar Lagos Burbano. I.A. PhD.
Jurado delegado

Jorge Fernando Navia Estrada IA. PhD.
Jurado

Carlos Henry Mavisoy. M. IAF Msc
Jurado

William Ballesteros Possú. IAF. Ph.D.
Presidente

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus sinceros agradecimientos a:

A Dios,

Al ser más importante y el motor de mi vida y a quien le debo todo lo que soy, mi Madre.

A mi esposa y mi hija por su incondicional apoyo, y los amigos que me alentaron a seguir el camino del aprendizaje académico.

A mi asesor, maestro y amigo PhD William Ballesteros Possú, por apoyarme incondicionalmente y compartir conmigo su gran experiencia y sabiduría.

Al Señor, Juan Marquínez propietario de la finca por toda su colaboración, disposición y contribución en la investigación.

A mis jurados de tesis Carlos Henry Mavisoy, Msc; Jorge Fernando Navia, PhD y Tulio Cesar Lagos Burbano, PhD, por sus valiosas contribuciones, respetuosas sugerencias.

A toda mi familia, amigos y quienes de una u otra forma apoyaron la realización de esta investigación.

DEDICATORIA

En medio de mis innumerables momentos de reflexión llegue a la conclusión de ser un hijo consentido y bendecido por Dios, me ha acompañado en el logro de cada una de las metas que me he trazado y me ha sostenido en los momentos difíciles de mi vida, me ha enseñado que debo ser fuerte, valeroso y capaz para poder superar los obstáculos y lograr mis sueños.

Los frutos de esta investigación se los dedico a Jesucristo, porque de él es el poder y la gloria, a mi madre, mi mayor bendición y mi mayor apoyo, a mi esposa e hija y todas aquellas personas que creen en mí y me impulsan cada día para luchar por alcanzar mis sueños.

Juan Carlos Valencia

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1 Almacenamiento de carbono	7
2.1.1 Carbono fijado	7
2.1.2 El carbono (C) en los ecosistemas forestales.....	7
2.1.3 Las especies leñosas perennes como sumideros de C	8
2.2 El Carbono en los suelos	9
2.3 Crecimiento de las especies forestales.....	9
2.4 Biomasa en los ecosistemas.....	9
2.5 Metodologías para estimar biomasa	10
2.5.1 Modelos de biomasa	11
2.5.2 Modelos de crecimiento.....	12
2.5.3 Modelos alométricos	13
2.5.3.1 Selección del modelo alométrico de mejor ajuste.....	14
2.6 Cambio climático y gases de efecto invernadero (GEI)	14
2.7 Sistemas agroforestales como sumideros de carbono.....	15
2.7.1 Importancia de los Sistemas agroforestales en la fijación de carbono	16
2.7.2 Beneficios ambientales de los sistemas agroforestales.....	17
2.7.3 Sistemas agroforestales como alternativa productiva.....	17
2.8 Sistema agroforestal cacao (<i>Theobroma cacao</i> L) – Gmelina (<i>Gmelina arborea</i> Roxb). 18	
2.8.1 Características generales de los componentes del SAF cacao y Gmelina. 18	
2.8.1.1 El Cacao (<i>Theobroma cacao</i> L).	18
2.8.1.2 Clones recomendados para la zona agroecología bosque húmedo tropical 19	
2.8.2 El árbol de Gmelina (<i>Gmelina arborea</i> Roxb.).....	19
2.8.2.1 Crecimiento y rendimiento.....	20
2.9 Estudios de caso	21
3. MATERIALES Y METODOS	23
3.1 Localización.....	23
3.2 Descripción del sistema agroforestal, <i>T. cacao</i> y <i>G. arborea</i>	24

3.3	Toma de muestras de suelo.....	25
3.4	Material vegetal	26
3.5	Selección del árbol medio.....	26
3.6	Evaluación del sistema agroforestal	26
3.6.1	Diámetro de copa.....	27
3.7	Altura de los arboles	28
3.8	Medición, corte y estimación de volumen, biomasa y carbono (VBC).....	28
3.8.1	Peso y medición de los componentes y toma de muestras para análisis en laboratorio.....	28
3.8.2	Determinación de la biomasa	29
3.9	Construcción de modelos alométricos.....	30
3.9.1	Definición de las variables y prueba de supuestos estadísticos.....	30
3.9.2	Criterios para seleccionar el modelo de mejor ajuste.....	30
3.9.2.1	Coeficiente de determinación ajustado (R^2 - Ajustado).....	30
3.9.2.2	Criterio de Información Akaike (AIC).....	31
3.9.2.3	Criterio de Información Bayesiano (BIC).....	31
3.9.2.4	Suma de cuadrados de predicción (PRESS).....	31
3.9.2.5	El error cuadrático como medio de predicción (ECMP).....	31
3.9.2.6	El índice de Furnival (IF).....	31
3.9.3	Ajuste de modelos para <i>Gmelina arborea</i>	32
3.9.4	Ajuste de modelos para <i>Theobroma cacao</i> L.	32
3.10	Otros modelos alométricos de volumen, biomasa y C	33
3.10.1	Selección y validación de los mejores modelos	33
3.10.2	Producción del cacao	34
3.11	Análisis de datos.....	34
3.12	Análisis económico y financiero	35
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
4.1	Acumulación de C en el sistema agroforestal de cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.) y melina (<i>Gmelina arborea</i>) en la vereda San Luis Robles -Tumaco, Nariño.....	36
4.1.1	Incremento medio anual (IMA) de C de <i>G. arborea</i> en el sistema agroforestal.....	36
4.1.2	Acumulación total de C en la <i>G. arborea</i> en el sistema agroforestal <i>T. cacao</i> y <i>G. arborea</i> en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.....	38

4.1.3	Acumulación media anual de C en <i>T. cacao</i> bajo el sistema agroforestal	39
4.1.4	Acumulación total del C del <i>T. cacao</i> en el sistema <i>T. cacao</i> y <i>G. arborea</i>	40
4.1.5	Acumulación de C en la parte aérea en el sistema agroforestal <i>T. cacao</i> y <i>G. arborea</i> en la vereda San Luis Robles -Tumaco, Nariño.	42
4.1.6	Acumulación media de C en la parte aérea y raíces en el sistema agroforestal <i>T. cacao</i> y <i>G. arborea</i> en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.	43
4.2	Modelos alométricos	45
4.2.1	Modelos alométricos genéricos para <i>Gmelina arborea</i>	45
4.2.2	Modelos alométricos desarrollados en este estudio.....	47
4.2.3	Modelos alométricos con los mejores ajustes para <i>G. arborea</i>	48
4.2.4	Validación de los modelos preseleccionados	50
4.3	Productividad del cacao.....	52
4.4	Efecto del sistema agroforestal <i>T. cacao</i> y <i>G. arborea</i> sobre algunas características físicas y químicas de los suelos	54
4.4.1	Efecto en la materia orgánica	54
4.4.2	Efecto en la densidad aparente	56
4.5	Análisis económico y financiero	56
5.	CONCLUSIONES	59
6.	RECOMENDACIONES	60
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
8.	ANEXOS	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los tratamientos o bloques experimentales.....	24
Tabla 2. Ecuaciones alométricas genéricas más empleadas para la estimación de volumen, biomasa, y C (VBC) en árboles y arbustos.	30
Tabla 3. Recíprocos de la primera derivada de las variables dependientes transformadas para el cálculo del índice Furnival.	32
Tabla 4. Evaluación de los modelos alométricos genéricos aplicados para <i>G. arborea</i> en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.	46
Tabla 5. Modelos para ecuaciones alométricas desarrolladas en este estudio	48
Tabla 6. Desempeño de los diferentes modelos alométricos en los criterios de información evaluados.	49
Tabla 7. Error promedio en las predicciones de los modelos comparados en la prueba de validación	50
Tabla 8. Modelos alométricos seleccionados para realizar las estimaciones de biomasa de <i>G. arborea</i>	51
Tabla 9. Criterios económicos y financieros para determinar la rentabilidad del sistema agroforestal la vereda san Luis Robles – Tumaco, Nariño. <i>T. cacao</i> y <i>G. arborea</i> en Tumaco, Nariño.	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del Consejo Comunitario Rescate las Varas donde se desarrolló el estudio..... 23

Figura 2. Toma de muestras de suelos en las parcelas del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda san Luis Robles – Tumaco, Nariño..... 26

Figura 3. Medición del DAP al componente forestal del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño. 27

Figura 4. Medición de diámetro de copa de los arboles del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles -Tumaco, Nariño..... 27

Figura 5. Corte, pesaje, recolección y análisis de las muestras en el laboratorio del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño. 28

Figura 6. Muestras representativas del tronco, ramas y hojas del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles - Tumaco, Nariño. 29

Figura 8. Acumulación total de C en la parte aérea de la *G. arborea* en el sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño. 39

Figura 10. Acumulación total de C en la parte aérea del *T. cacao* en el sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles - Tumaco, Nariño 41

Figura 11. Acumulación total de C en la biomasa aérea del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles - Tumaco, Nariño..... 42

Figura 12. acumulación media anual de C por hectárea en la biomasa aérea y raíces en el sistema agroforestal *T. Cacao G. arborea* y en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño. 44

Figura 13. Acumulación total de C por hectárea en la biomasa aérea y raíces en el sistema agroforestal *T. Cacao* y *G. arborea* en la Vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño. 44

Figura 14. Valor exacto de lambda para la transformación exacta del modelo alométrico 47

Figura 15. Producción del cacao en los diferentes tratamientos del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.

53

Figura 16. Producción mensual de cacao en cada uno de los tratamientos del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles - Tumaco, Nariño.

54

Figura 18. Evaluación del efecto del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la densidad aparente en los suelos de estudio de la vereda San Luis Robes, Tumaco, Nariño. 56

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Rangos del diámetro a la altura del pecho (DAP) del *T. cacao* en la vereda san Luis robles – Tumaco, Nariño. 74

Anexo 2. Rangos del diámetro a la altura del pecho (DAP) de la *G. arborea* en la vereda San Luis robles – Tumaco, Nariño. 74

Anexo 3. Rangos de la altura (h) del *T. cacao* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño. 74

Anexo 4. Rangos de la altura (h) de la *G. arborea* en la vereda san Luis Robles – Tumaco, Nariño. 74

Anexo 5. Graficas de la comprobación de los supuestos estadísticos de normalidad (a), homoscedasticidad (b), linealidad (c) e independencia (d) de los datos de biomasa y carbono utilizados. 75

Anexo 6. Análisis de varianza para la acumulación de biomasa en la *G. arborea* en el sistema agroforestal *T cacao* y *G arborea* en la vereda san Luis robles Tumaco, Nariño. 76

Anexo 7. Análisis de varianza para la acumulación de biomasa en el *T. cacao* en el sistema agroforestal *T cacao* y *G arborea* en la vereda san Luis robles Tumaco, Nariño. 76

Anexo 8. Análisis de varianza para la acumulación total de la biomasa del Sistema agroforestal *T cacao* y *G arborea* en la vereda san Luis robles Tumaco, Nariño.... 76

Anexo 9. Análisis de varianza de la productividad del *T. cacao* en el sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño. 76

Anexo 10. Productividad del *T. cacao* dentro del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño. 77

Anexo 11. Algunas propiedades físicas y químicas encontradas después de 9.6 años en el sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño. 78

RESUMEN

El cambio climático es un fenómeno que preocupa a la humanidad, y más aún, las incertidumbres de la variabilidad climática. Colombia se comprometió a reducir las emisiones del GEI en un 20%. esto obliga al país a adoptar prácticas de mitigación y reducción. A pesar de que el municipio de Tumaco es un importante sumidero natural de carbono, a la fecha no se han establecido las acciones encaminadas a fortalecer dicho potencial. Por lo tanto, esta investigación fue desarrollada en el Consejo Comunitario Rescate las Varas (N 01° 39' 12" W 78° 41' 49"), corregimiento San Luis Robles, y estuvo dirigida a determinar el potencial de almacenamiento de carbono y la productividad de diferentes arreglos agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L) y Gmelina (*Gmelina arborea* Roxb), establecidos bajo un diseño de Bloques Completos al Azar con siete tratamientos (el Tratamiento uno tenía 1111 árboles de cacao y 1111 árboles de Gmelina, el Tratamiento dos 625 árboles de cacao y 625 árboles de Gmelina, el Tratamiento tres 833 árboles de cacao y 208 árboles de Gmelina, el tratamiento cuatro 833 árboles de cacao y 139 árboles de Gmelina, el Tratamiento cinco 833 árboles de cacao y 104 árboles de Gmelina, el Tratamiento seis estaba establecido en franjas con 416 árboles de cacao y 1000 árboles de Gmelina y el Tratamiento siete fue el testigo o finca tradicional) y tres repeticiones (Bloques). A la fecha de la evaluación los arreglos tenían nueve años y seis meses. Se generaron dos modelos alométricos para *G arborea* en el SAF en los rangos de DAP entre 30,24 y 50,11 cm, la acumulación de carbono osciló entre 49,2 t.ha⁻¹ para el Tratamiento 4 (833 árboles de cacao y 139 árboles de Gmelina) y 88,5 t.ha⁻¹ para el tratamiento 2 (625 árboles de cacao y 625 árboles de Gmelina), con un potencial de acumulación de 4,23 y 9,22 t.ha⁻¹.año⁻¹, respectivamente. La productividad del cacao en el SAF presentó rendimientos que oscilaron entre 311 kg.ha⁻¹.año⁻¹ (Tratamiento 7, finca tradicional) y 922 kg.ha⁻¹.año⁻¹ (Tratamiento 6, sistema en franjas con 416 árboles de cacao y 1000 árboles de Gmelina); a pesar de la diferencia en la productividad, los indicadores económicos para todos los tratamientos fueron positivos. El tratamiento 6 presentó el mejor desempeño con una VAN de 1.446,46 pesos, una TIR de 42% y una RB/C de 1,67 %. Se evidenciaron también los beneficios del SAF en algunas de las propiedades físicas y químicas del suelo. Para el caso de la materia orgánica esta osciló entre 9 y 17%, la densidad aparente disminuyó en un 23% pasando de 0,83 a

0,77 g.cm⁻³, por su parte, el nitrógeno total, el potasio de cambio, el fósforo disponible y otras características físicas y químicas evidenciaron comportamientos positivos.

Palabras clave: Agroforestería, cambio climático, mitigación, modelos alométricos, biomasa.

ABSTRACT

Climate change is a phenomenon that worries humanity, and even more, the uncertainties of climate variability. Colombia committed to reducing GEI emissions by 20%. This forces the country to adopt mitigation and reduction practices. Although the municipality of Tumaco is an important natural carbon sink, to date no actions have been established to strengthen this potential. Therefore, this research was developed in the Rescate Las Varas Community Council (N 01° 39' 12" W 78° 41' 49"), San Luis Robles corregimiento, and was aimed at determining the carbon storage potential and the productivity of different agroforestry arrangements of cocoa (*Theobroma cacao*) and Gmel Climate change is a phenomenon that worries humanity, and even more, the uncertainties of climate variability. Colombia committed to reducing GHG emissions by 20%. This forces the country to adopt mitigation and reduction practices. Although the municipality of Tumaco is an important natural carbon sink, to date no actions have been established to strengthen this potential. Therefore, this research was developed in the Rescate Las Varas Community Council (N 01° 39' 12" W 78° 41' 49"), San Luis Robles corregimiento, and was aimed at determining the carbon storage potential and the productivity of different agroforestry arrangements of cocoa (*Theobroma cacao*) and Gmelina (*Gmelina arborea*), established under a design of Complete Random Blocks with seven treatments (treatment one had 1111 cacao trees and 1111 Gmelina trees, treatment two 625 trees of cocoa and 625 Gmelina trees, treatment three 833 cocoa trees and 208 Gmelina trees, treatment four 833 cocoa trees and 139 Gmelina trees, treatment five 833 cocoa trees and 104 Gmelina trees, treatment six was established in stripes with 416 cacao trees and 1000 Gmelina trees and treatment seven was the witness or traditional farm) and three repetitions (blocks). At the date of the evaluation, the arrangements were nine years and six months old. Two allometric models were generated for G arborea in the SAF in the ranges of DAP between 30.24 and 50.11 cm, the carbon accumulation ranged between 49.2 t.ha⁻¹ for treatment 4 (833 cocoa trees and 139 Gmelina trees) and 88.5 t.ha⁻¹ for treatment 2 (625 cacao trees and 625 Gmelina trees), with an accumulation potential of 4.23 and 9.22 t.ha⁻¹.year⁻¹, respectively . Cocoa productivity in the SAF presented yields ranging from 311 kg.ha⁻¹.year⁻¹ (Treatment 7, traditional farm) and 922 kg.ha⁻¹.year⁻¹ (Treatment 6, striped system with 416 cocoa trees and 1000 Gmelina trees); Despite the difference in productivity, the economic indicators for all treatments were

positive. Treatment 6 presented the best performance with a NPV of 1,446.46 pesos, a TIR of 42% and a RB / C of 1.67%. The benefits of SAF were also evidenced in some of the physical and chemical properties of the soil. In the case of organic matter, it oscillated between 9 and 17%, the bulk density decreased by 23%, from 0.83 to 0.77 g.cm⁻³, meanwhile, total nitrogen, potassium exchange, the available phosphorus and other physical and chemical characteristics showed positive behaviors. (Gmelina arborea), established under a design of Complete Random Blocks with seven treatments (treatment one had 1111 cacao trees and 1111 Gmelina trees, treatment two 625 trees of cocoa and 625 Gmelina trees, treatment three 833 cocoa trees and 208 Gmelina trees, treatment four 833 cocoa trees and 139 Gmelina trees, treatment five 833 cocoa trees and 104 Gmelina trees, treatment six was established in stripes with 416 cacao trees and 1000 Gmelina trees and treatment seven was the witness or traditional farm) and three repetitions (blocks). At the date of the evaluation, the arrangements were nine years and six months old. Two allometric models were generated for G arborea in the SAF in the ranges of DAP between 30.24 and 50.11 cm, the carbon accumulation ranged between 49.2 t.ha⁻¹ for treatment 4 (833 cocoa trees and 139 Gmelina trees) and 88.5 t.ha⁻¹ for treatment 2 (625 cacao trees and 625 Gmelina trees), with an accumulation potential of 4.23 and 9.22 t.ha⁻¹ year, respectively. Cocoa productivity in the SAF presented yields ranging from 311 kg.ha⁻¹ year⁻¹ (Treatment 7, traditional farm) and 922 kg.ha⁻¹ year⁻¹ (Treatment 6, striped system with 416 cacao trees and 1000 Gmelina trees); Despite the difference in productivity, the economic indicators for all treatments were positive. Treatment 6 presented the best performance with a NPV of 1,446.46 pesos, a TIR of 42% and a RB / C of 1.67%. The benefits of SAF were also evidenced in some of the physical and chemical properties of the soil. In the case of organic matter, it oscillated between 9 and 17%, the bulk density decreased by 23%, from 0.83 to 0.77 g.cm³, meanwhile, total nitrogen, potassium exchange, the available phosphorus and other physical and chemical characteristics showed positive behaviors.

Keywords: Agroforestry, climate change, mitigation, allometric models, biomass, productivity

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático, representa una de las amenazas más preocupantes para el medio ambiente global, debido al impacto negativo sobre la salud humana, la biodiversidad, la seguridad alimentaria, la economía de las naciones, los recursos naturales y la infraestructura física (FAO, 2016).

La temperatura del planeta ha aumentado debido a la contaminación atmosférica global por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), resultado de la quema de combustibles fósiles, los incendios forestales y ciertas prácticas agrícolas como fertilización nitrogenada, fertilización orgánica, quema de biomasa, uso de maquinaria; la agricultura y la ganadería hacen una alta contribución, en el consecuente calentamiento global (Milera, 2013).

Estas afectaciones requieren de un conjunto de medidas que contribuyan a mejorar las técnicas agrícolas con el uso de especies vegetales adaptadas para la producción de alimentos que permitan contribuir a la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático (FAO, 2008).

Como estrategia productiva amigable con el ambiente, se han propuesto los sistemas agroforestales (SAF), los cuales mitigan el efecto antrópico e integran la producción agrícola a los medios de vida de las comunidades rurales (Pardos, 2010).

De los Sistemas Agroforestales (SAF), el cultivo de cacao en asocio con diferentes especies, de diferentes usos y objetivos, es uno de los más amigables con el ambiente, que se deriva del prolongado tiempo de vida útil de la planta (alrededor de los 30 años o más), por lo que dependiendo del asocio cumple una serie de funciones ya sean económicas (en función de los precios del mercado), sociales (por la acción de involucrar a numerosos pequeños cultivadores y en muchos casos como un patrimonio familiar) y ambientales, ya que puede representar un sistema bien complejo que puede funcionar como un corredor biológico, proveedor de servicios ambientales, de captura de carbono y conservación de agua (García *et al.*, 2015).

Anguiano (2013) señala que los GEI podrían reducirse a través de dos procesos: disminuyendo las emisiones antropogénicas de CO₂ o mediante la creación y

mejoramiento del secuestro de carbono en la biosfera. Es este sentido los SAF son una importante estrategia para la mitigación del calentamiento global. Mediante la conservación, el secuestro, almacenamiento y la sustitución de carbono. Esto se puede lograr mediante la inserción de árboles en potreros, establecimiento de cercas vivas, pasturas mejoradas, regeneración natural de la vegetación y la conservación de los bosques (Alvarado *et al.*, 2013).

La cacaocultura en el pacífico nariñense se ha desarrollado bajo condiciones edafoclimáticas adecuadas, sin embargo, las productividades siguen estando por debajo del promedio nacional debido a varios factores, entre los cuales están las bajas adopciones tecnologías, cultivos que superan los 50 años y enfermedades como la Moniliasis y la Escoba de bruja, que afectan los rendimientos en este cultivo, los cuales están en promedio de 300 kg.ha⁻¹.año⁻¹ (MADR,2011).

El presente estudio determino a través de la evaluación de la productividad y el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea del sistema Agroforestal cacao y Gmelina que tan importante puede llegar a ser este tipo de sistema para la economía de los cacaocultores y para el medio ambiente del departamento y del país

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar la productividad y el potencial de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea en el sistema agroforestal cacao (*Theobroma cacao* L) y melina (*Gmelina arborea* Roxb).

Objetivos específicos

- Determinar el carbono almacenado en la biomasa aérea de las especies *Theobroma cacao* y *Gmelina arborea* en seis densidades de siembra.
- Evaluar el potencial productivo del cacao en seis densidades de siembra asociado con melina.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Almacenamiento de carbono

Por parte de las plantas, el almacenamiento de carbono se da en el proceso de la fotosíntesis, específicamente en la etapa oscura, donde el CO₂ es asimilado y convertido en carbono disponible para la planta. El CO₂ incorporado y asimilado, pasa a formar parte de las materias primas generadas por la planta para formar la biomasa de cada componente de esta (hojas, ramas, frutos, tallos y raíces) (Borrero, 2012).

2.1.1 Carbono fijado

Pardos (2010) afirma que el flujo de C dentro de una unidad de área cubierta con vegetación, en un lapso dado, Su cuantificación permite predecir el comportamiento del C en cualquier momento durante el crecimiento de la población. Este tipo de C depende de las características de la especie, la tasa de crecimiento y la longevidad, así como también de las condiciones del sitio, como localización, clima y rotación. Se expresa en t. C. ha⁻¹. año⁻¹.

2.1.2 El carbono (C) en los ecosistemas forestales

Según Honorio y Baker (2010), el ciclo de carbono tiene un rol muy importante en los bosques tropicales porque son sumideros de carbono y contribuyen a un flujo adecuado de las especies que interactúan en el ecosistema; sin embargo, la pérdida de los bosques tropicales por causas antropogénicas y naturales las concentraciones de dióxido de carbono se están aumentando considerablemente en zonas donde existe gran variedad de vida silvestre.

El potencial de secuestro de carbono de un sistema forestal depende del contenido inicial en carbono orgánico, de las tasas de crecimiento y edad del rodal, de la capacidad biológica inherente al lugar y finalmente, de la utilización de los productos que se obtengan (Pardos, 2016).

La proporción de C acumulado en suelo y vegetación varía entre ecosistemas y tipos de bosques. En latitudes elevadas, con clima frío, la materia orgánica se descompone

lentamente; así, en los bosques boreales, el carbono acumulado en el suelo llega al 80 y 90% del total, mientras que, en el trópico, las temperaturas más suaves aceleran su descomposición y el C se reparte a partes iguales entre suelo y vegetación (Pardos, 2010).

Según Rognitz *et al.* (2009) los agroecosistemas acumulan C en cuatro grandes componentes: biomasa aérea, biomasa sobre el suelo u hojarasca, sistema radical y C orgánico del suelo. La influencia de la vegetación herbácea en el almacenamiento y fijación de C es muy baja, por lo que puede omitirse dentro de un estudio de C.

Durante el tiempo en que el CO₂ se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol y hasta que es enviado nuevamente al suelo o a la atmósfera, se considera almacenado. En el momento de su liberación (ya sea por la descomposición de la materia orgánica y/o por la quema de la biomasa), el CO₂ fluye para regresar al ciclo del C (Pardos, 2016).

2.1.3 Las especies leñosas perennes como sumideros de C

Los árboles, son elementos esenciales en la mitigación del cambio climático ya que tienen la capacidad de absorber y almacenar dióxido de C (CO₂), uno de los principales gases de efecto invernadero (Monsalve, 2016). Todos los vegetales son capaces de absorber CO₂ a través de la fotosíntesis, pero en el caso de los árboles, esta capacidad es mucho mayor que en las plantas leñosas pequeñas y en las herbáceas gracias a su gran tamaño y a sus raíces. Con su gran biomasa y su potencial para generar madera, los árboles actúan como verdaderos y eficientes sumideros de C (Pardos, 2016).

La capacidad de los árboles y del resto de las plantas de absorber y secuestrar CO₂ reside en la función fotosintética, gracias a la cual el CO₂ queda fijado en las raíces, troncos y hojas en forma de C. Las plantas también respiran, tomando oxígeno (O₂) de la atmósfera y devolviendo a ella dióxido de C. Sin embargo, el balance final en cuanto a absorción de CO₂ es claramente positivo (Borrero, 2012).

Los árboles, actúan como excelentes sumideros de C. La capacidad de absorción de este gas se relaciona de forma directa, con el área basal y el número de árboles, de modo que a mayor área basal o dap y un número mayor de árboles, más cantidad de C se fijará. Por esta razón, los árboles jóvenes resultan especialmente eficaces en esta tarea (Montagnini *et al.*, 2015) También la longevidad influye en la cantidad de CO₂ que puede absorber un

árbol. Normalmente, las especies muy longevas suelen presentar crecimientos lentos, pero su capacidad de absorción de C se ve compensada por sus vidas sustancialmente más largas (Peña *et al.*, 2014).

2.2 El Carbono en los suelos

El suelo es un gran reservorio de C en la naturaleza, el contenido de C en el suelo obedece a sus características y al equilibrio entre las tasas de entrada de C orgánico de origen vegetal y animal, y las de salida, resultantes del metabolismo microbiano que genera CO₂ (Burbano, 2018). Como las tipologías de los suelos son diversas, hay que tomarlas en cuenta en los balances que determinan las cantidades de C orgánico en el suelo (COS), sumado a ello la influencia del clima y las prácticas de manejo adoptadas (Docampo, 2010).

2.3 Crecimiento de las especies forestales

A la magnitud del crecimiento se denomina incremento. Todo crecimiento implica un estado inicial mensurable y cambios en ese estado con respecto al tiempo, de allí se puede hablar del Incremento Corriente Anual (ICA), que es el incremento del último año de medición y el incremento medio anual (IMA), que corresponde al incremento promedio por año desde el año cero (INAB, 2014).

El crecimiento de las especies forestales está determinado por factores internos y externos. Los internos son principalmente genéticos y fisiológicos; los externos son fundamentalmente climáticos, edáficos y de competencia con los demás árboles o cultivos (Aguirre *et al.*, 2010).

2.4 Biomasa en los ecosistemas

La biomasa forestal se define como el peso o estimación equivalente de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo. Normalmente es cuantificada en toneladas por hectárea de peso verde o seco (Domínguez *et al.*, 2009). Es frecuente separarla en componentes, donde los más típicos corresponden a la masa del fuste, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta. La biomasa de los componentes del árbol ubicados por encima del suelo se denomina biomasa aérea

y los asociados a la rizósfera del árbol se denominan biomasa subterránea (Ruiz y Peinado, 2013).

En general para la determinación de la biomasa para una especie forestal de la cual no se conoce información previa, se requiere de muestreos básicos tanto a nivel de árbol individual, rodal (parcelas) y cosecha de la materia orgánica de los componentes funcionales del árbol (IPCC, 2014).

La biomasa se ha convertido en un importante elemento de estudio debido a que existe intereses industriales, energéticos y ambientales (Juega un rol importante en el ciclo global de C). A partir de la biomasa se puede calcular la concentración de C ya que se estima que aproximadamente el 50% de la biomasa está formada por C, por consiguiente, se pueden hacer estimaciones sobre la cantidad de dióxido de C que ingresa a la atmósfera cada vez que se elimina una planta o se quema un bosque (Rodríguez, 2013).

La estimación adecuada de la biomasa juega un papel fundamental, ya que de esta depende para la cuantificación exacta del C capturado en un bosque, al tener en cuenta que la biomasa que se quiere estimar es una aproximación equivalente al peso seco de lo existente arriba del suelo, en términos porcentuales, el fuste del árbol concentra la mayor cantidad de biomasa aérea, representando entre 55 y 77% del total: luego están las ramas con 5 a 37%; y por último las hojas y la corteza del fuste entre 1 y 15% y 4 a 16% respectivamente (Galindo *et al.*, 2011).

2.5 Metodologías para estimar biomasa

Álvarez (2008) afirma que para estimar la biomasa sobre el suelo se pueden emplear dos métodos: 1) los métodos directos o destructivos, que consiste en cortar el árbol y determinar la biomasa pesando directamente cada componente y 2) los métodos indirectos, que generalmente se aplican cuando los árboles son de grandes dimensiones y se utilizan métodos de cubicación del árbol donde se suman los volúmenes de madera, se toman muestras de ésta y se pesan en el laboratorio. Para calcular los factores de conversión de volumen a peso seco, se utiliza la gravimetría (Fonseca *et al.*, 2011).

Los métodos destructivos, incluyen mediciones en campo, cosecha y toma de muestras de la totalidad de la vegetación, teniendo en cuenta algunos criterios de evaluación.

Aunque este método es más costoso y requiere de mayor tiempo, arroja resultados de alta confiabilidad, en comparación con el segundo método (Gayoso y Guerra, 2013).

Entre los métodos indirectos para estimar biomasa, se encuentra el uso de modelos de biomasa específicos para cada especie, donde los valores de inventarios forestales como diámetro (DAP) y altura, se transforman a términos de biomasa con la ayuda de modelos generales (Picard *et al.*, 2012).

Dentro de los estudios de biomasa, la medición de raíces representa un trabajo más amplio y tedioso con niveles bajos de precisión, por esta razón, algunos autores recomiendan utilizar valores reportados en literatura para bosques tropicales, donde el porcentaje de biomasa radical puede encontrarse en un rango entre 11 y 54%, aportando en promedio 18% de la biomasa total (Rugnitz *et al.*, 2009).

Otra forma de estimar la biomasa es mediante ecuaciones o modelos basados en análisis de regresión, que utilizan variables colectadas en el campo tales como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura comercial (hc) y total (ht), el crecimiento dimétrico, el área basal y la densidad específica de la madera (INAB, 2014). Este método no es destructivo y es extrapolable a situaciones de crecimiento similares (INAB, 2014).

2.5.1 Modelos de biomasa

Los modelos de biomasa son modelos matemáticos (o alométricos,) donde se relaciona la masa seca de algún componente o del árbol completo, con variables del tamaño del árbol (diámetro, altura, área basal y volumen) (Álvarez *et al.*, 2011). El procedimiento más recomendado para estimar la biomasa en bosques tropicales consiste en relacionar estas variables en una regresión lineal bajo las escalas logarítmicas, lo cual simplifica los cálculos e incrementa la validación estadística al homogeneizar la varianza sobre el rango de los datos (Brougel *et al.*, 2011).

Segura y Andrade (2008) aconsejan emplear modelos específicos para cada especie y que hayan sido construidos bajo condiciones similares a las del lugar donde se quieran aplicar, principalmente en términos de tamaño de árboles y densidad arbórea.

Los autores citados en el párrafo anterior también recomiendan construir gráficos de puntos entre la variable dependiente y cada una de las variables independientes, para probar, cuales modelos o ecuaciones de regresión explican mejor esta relación. Después se debe aplicar un Análisis de Varianza y escoger el o los modelos de mejor ajuste con la ayuda de algunos estadígrafos. Estos modelos pueden ser construidos utilizando como mínimo una muestra representativa de 30 árboles (Picard *et al.*, 2012)

Los estadígrafos más conocidos y ampliamente usados en el campo forestal son: el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de determinación ajustado (R^2 -ajust), el coeficiente de variación (CV%), la raíz del cuadrado medio del error o error estándar de estimación (RMSE) y el Índice de Furnival (IF), donde los valores del R^2 y del R^2 -ajust deben ser altos, en tanto que los valores del CV% y del IF deben procurarse bajos (Segura y Andrade, 2008).

Para estimar la biomasa, se utilizan diferentes tipos de modelos de regresión y combinación de variables. En general y así se demuestra en muchas investigaciones, el diámetro es la variable que mejor se correlaciona y predice la biomasa. Además, el diámetro es una variable fácil de medir y que se registra en la mayoría de los inventarios forestales (Picard *et al.*, 2012).

2.5.2 Modelos de crecimiento

Un modelo de crecimiento es una representación de una realidad a través de funciones, ecuaciones o gráficas. Se consideran herramientas prácticas en la transformación de datos empíricos y conocimientos silviculturales, en información clave para realizar análisis financieros y programar el manejo de las plantaciones forestales (Somarriba *et al.*, 2013).

Al modelar el crecimiento de un árbol, representamos el desarrollo de ciertas variables (volumen, área basal, diámetro, altura) en función de los factores que influyen en estas (edad, densidad de árboles, condición inicial del rodal o sistema, especie, clima, entre otros). Además, mediante las curvas de crecimiento podemos observar la gráfica de tamaños acumulados y representar la suma de todos los incrementos anuales acumulados sobre el período de observación (Muñoz *et al.*, 2010).

2.5.3 Modelos alométricos

Otra forma de estimar la biomasa es a través de ecuaciones o modelos alométricos basados en análisis de regresión lineal o no lineal (Mora y delgado, 2018). Estos utilizan variables medidas en el campo denominadas regresoras o independientes tales como: el diámetro a la altura de 1,30 m (dap), la altura comercial (Hc) y total (Ht), el crecimiento diamétrico, el área basal y la densidad específica de la madera (Henry *et al.*, 2013) Este método no es destructivo y es extrapolable o comparable con situaciones de crecimiento en ecosistemas similares (Segura y Andrade, 2008). Los modelos para estimar la biomasa han aumentado en los últimos años y posiblemente sean generados no solo para estimar el C en sitios boscosos sino también para árboles individuales (Picard *et al.*, 2012; Rio Frio *et al.*, 2013).

Los modelos alométricos facilitan la estimación de biomasa y C a pequeña y gran escala (Iglesias y Barchuk, 2010)). Para estimarla se usan diferentes tipos de modelos de regresión y combinación de variables (Segura y Andrade, 2008). En muchas investigaciones generalmente se expresa que el dap es la variable que mejor se correlaciona y ajusta para predecir la biomasa aérea (Rodríguez, 2013). Además, es fácil de medir en el campo y se registra en los inventarios forestales. También se emplea como variable la densidad de la madera, la cual permite predecir la biomasa obtenida, mediante su dureza o suavidad y las alturas total y comercial (Picard *et al.*, 2012; Henry *et al.*, 2013).

Los modelos alométricos, son ecuaciones matemáticas desarrolladas para describir el comportamiento de una variable (dependiente) como el volumen, biomasa o C en árboles individuales (Alvarez, 2008). La obtención de la respuesta a estas variables de interés necesita la medición de variables dasométricas básicas de árboles en pie (variables independientes), tal como el diámetro del fuste a la altura de pecho (DAP), la altura total (ht), altura de reiteración (hr) (entendiéndose esta altura, la medida desde la base del árbol hasta la base de la copa) y otras variables (Domínguez *et al.*, 2009).

De acuerdo con lo expuesto por Álvarez (2008) el volumen ha sido y sigue siendo la forma de expresión de la cantidad de madera contenida en los rodales. En consecuencia, una forma de acceder al conocimiento del volumen es a través de tablas de volumen,

modelos de volumen, modelos matemáticos, capaces de representar el volumen medio de madera por árbol a partir de las variables independientes, como es el diámetro a la altura del pecho (dap) y altura.

2.5.3.1 Selección del modelo alométrico de mejor ajuste

El objetivo de la evaluación de modelos es seleccionar aquellos que presenten el mejor balance entre la capacidad de ajuste de los datos y su complejidad. Modelos con un mayor número de parámetros, tienden a ajustar mejor una base de datos, no obstante, tienden a ser más inestables y a modelar la variabilidad de esos datos más que su tendencia (Segura y Andrade, 2008).

En las últimas décadas se han publicado un gran número de ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea (BA) de los bosques, generalmente construidas a partir del diámetro de los árboles (D), la altura total (H) y la densidad de la madera (ρ) (Návar, 2009). No obstante, la aplicación de la mayor parte de estos modelos en sitios diferentes a donde fueron construidos tiene serias restricciones. Lo anterior se debe principalmente a que la biomasa aérea parece estar fuertemente determinada por la variación espacial de características funcionales y arquitecturales de las especies tales como la densidad de la madera y la altura total (Patiño *et al.*, 2009).

Para el caso colombiano, recientemente se ha realizado un esfuerzo para recopilar los datos de campo disponibles sobre la biomasa aérea real de árboles apeados en campo en diferentes localidades, con el objetivo de proponer nuevos modelos a escala regional y nacional que permitan hacer una estimación lo más precisa posible de la biomasa aérea de los bosques naturales en Colombia (Alvares *et al.*, 2011; Phillips *et al.*, 2011).

2.6 Cambio climático y gases de efecto invernadero (GEI)

El efecto invernadero es un fenómeno natural, que ha permitido mantener la temperatura de la tierra a niveles constantes y apropiados. Este fenómeno ocurre, cuando la radiación solar visible penetra hasta la superficie de la tierra y la calienta y ésta a su vez emite radiación térmica, parte de la cual es retenida por los denominados Gases de Efecto Invernadero (GEI), entre los que se destacan; el dióxido de C, el metano, los clorofluorocarbonos y el óxido nitroso. Cuando el sistema climático se encuentra

equilibrado, la radiación solar absorbida está en armonía con la radiación emitida al espacio por la tierra, pero cuando la concentración de GEI en la atmósfera aumenta, este equilibrio se rompe y se provoca un aumento artificial en la temperatura media global del planeta (IDEAM *et al.*, 2015).

Se estima que el GEI que más influye en el calentamiento climático mundial, es el dióxido de C (CO₂) y que la mayor parte del incremento en las concentraciones atmosféricas de este gas, provienen del uso de combustibles fósiles, mientras que el 20-25% proviene de la extensión de la frontera agrícola, la explotación comercial de bosques y el incremento de la oxidación de la materia orgánica en los suelos (Pardos, 2010).

Entre los países que contribuyen en mayor parte con la emisión de los gases de efecto invernadero, se encuentran China: 25.36%, Estados Unidos: 14.4%, Unión Europea: 10.16%, India: 6.96%, Rusia: 5.36%, Japón: 3.11%, Brasil: 2.4%, Indonesia: 1.76%, México: 1.67%, Irán: 1.65% y nuestro país contribuye con el 1.1% toneladas de C por habitante por año (FAO, 2016).

Según el quinto Informe del Grupo II del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en ingles), desde finales del siglo XIX la temperatura media de la superficie terrestre ha aumentado 0.8°C y las temperaturas mínimas tienden a duplicarse por década en comparación con las máximas (0.2°C y 0.1°C, respectivamente). La superficie de los hielos en el hemisferio norte desde finales de los años 60 se ha reducido entre un 10 y 20%, así como también se ha observado un aumento ligero (uno a dos centímetros por década) del nivel del mar a lo largo del siglo XXI (IPCC, 2014)

2.7 Sistemas agroforestales como sumideros de carbono

En principio, la capacidad de secuestrar C de cualquier ecosistema terrestre depende principalmente de dos componentes: el área total de esos ecosistemas y el número de árboles por unidad de área y principalmente de su área basal (Rodríguez *et al.*, 2010). Los sistemas agroforestales (SAF), pueden contener sumideros considerablemente grandes de C y en algunos casos se asemejan a los encontrados en bosques secundarios, asimismo, la cantidad de C acumulado en el suelo aumenta en los SAF (Rodríguez, 2013).

Las plantaciones forestales y agroforestales capturan C y lo almacenan principalmente en la biomasa dura (madera), hojas, ramas, frutos, corteza y raíces; esto depende de la composición de las especies en un bosque o plantación, del efecto de factores climáticos locales como precipitación y temperatura, de las características del suelo que determinan el crecimiento del árbol (Somarriba *et al.*, 2013).

FAO (2016) afirma que 245 millones de hectáreas de tierra, podrían estar disponibles para conservación y secuestro de C en plantaciones y Agroforestería. Sin embargo, la disponibilidad real de tierra para estos programas depende de factores económicos, sociales, culturales e institucionales, que influyen en el uso del suelo. Estudios realizados Agudelo (2016) revelan que el almacenamiento de C en SAF, incluyendo el C del suelo, oscila entre 12 y 228 t.ha⁻¹ y que el potencial para la acumulación de C a través de la biomasa es mayor en el trópico húmedo.

2.7.1 Importancia de los Sistemas agroforestales en la fijación de carbono

Los SAF tienden a incluir prácticas sostenibles de bajos insumos que minimizan la alteración de los suelos y aumentan los rendimientos de la madera sin elevar los costos, lo cual contribuye a crear sumideros de C (Cuenca, 2009). Estos a la vez ayudan a evitar el agotamiento de las reservas o almacenamientos naturales ya existentes reduciendo la presión sobre los bosques. Los componentes forestales de los SAF pueden llegar a evitar la explotación de los bosques al suplir suficiente energía a bajos precios, y si la madera de los árboles es procesada, 50% de ella actúa como almacén de C hasta su descomposición (Altieri y Nicholls, 2010).

La cantidad de C secuestrado directamente por los árboles dentro de los diferentes sistemas agroforestales oscila normalmente de 3 a 25 t.C.ha⁻¹, en el caso de huertos caseros y taungya se logra superar los 50 t.C.ha⁻¹ de biomasa; las cortinas rompevientos, los linderos y las cercas vivas producen menor cantidad de materia seca (Ballesteros, 2015).

Los sistemas agrosilviculturales, silvopastoriles y agrosilvopastoriles pueden en diversos grados, mantener y hasta aumentar las reservas de C en la vegetación y los suelos; de hecho, la agroforestería tiende a prácticas sostenibles de bajos insumos que minimicen la

alteración de los suelos y plantas, enfatizando la vegetación perenne y el ciclaje de nutrientes, lo cual contribuye a almacenar bancos de C que son estables por décadas o siglos (Andrade *et al.*, 2013).

2.7.2 Beneficios ambientales de los sistemas agroforestales

Los beneficios ambientales que más se destacan del uso de sistemas agroforestales según Palomeque (2009) son:

- **Conservación del agua (cantidad y calidad):** hay una mayor infiltración y reducción de su escurrimiento superficial, minimizando la contaminación y sedimentación de los cursos de agua, mejorando la protección de riberas.
- **Reducción de la erosión:** las copas de los árboles, la hojarasca; las ramas cubren el suelo y reducen el impacto de la lluvia sobre el suelo. Los residuos de las copas que caen al suelo junto a las raíces mejoran la estructura de este y su fertilidad, aumentando su contenido de nitrógeno y favoreciendo la retención de nutrientes.
- **Captura de C:** los modelos agroforestales, al incluir especies arbóreas, asumen una importante función en la retención de C en los suelos y en la madera. Esto es un beneficio económico parcial adicional para los agricultores, al cual pueden optar si incorporan arboles a sus predios. Dado que el mercado de C está cobrando un enorme potencial en el mundo.
- **Conservación de la biodiversidad biológica:** los modelos agroforestales pueden desempeñar una función importante en la conservación de la diversidad biológica, al incorporar arboles dentro de los paisajes agrícolas. Permite la conexión de los hábitats para animales, aves, peces y plantas. Además, embellece el paisaje y mejora las condiciones de vida para los habitantes del campo.

2.7.3 Sistemas agroforestales como alternativa productiva

Los SAFs, además de ofrecer ventajas comparativas en relación con otros usos del suelo, constituyen uno de los más importantes sistemas productivos en las fincas, ya que en este se cultivan asociaciones de especies vegetales, sobre todo, cacao, plátano, frutales y

maderables, los cuales además de producir sombra, permiten al agricultor tener otras alternativas de ingresos (Martínez, 2015). Estos sistemas también pueden contribuir en la conservación de biodiversidad y, últimamente, por su función como sumideros de C (Farfán, 2014).

2.8 Sistema agroforestal cacao (*Theobroma cacao* L) – Gmelina (*Gmelia arborea* Roxb).

Según Palomeque (2009), este tipo de sistema se clasifica como un SAF simultáneo, donde especies arbóreas (melina) se encuentran asociadas con cultivos perennes (cacao). Estos sistemas son implementados en gran parte de Centroamérica, Colombia y Ecuador.

El establecimiento de maderables en los cacaotales es una alternativa simple y barata para reemplazar la sombra improductiva y difícil de manejar. Los maderables se benefician de la fertilidad de los suelos, donde se siembra cacao y de la disponibilidad de agua durante todo el año en la zona (Oficina nacional forestal (ONF), 2013).

La Gmelina, por ser una especie de sombra productiva y de fácil manejo, puede asegurar una rápida cobertura del suelo, reducir los costos de manejo e incrementar el desempeño económico de los cacaotales (Murillo y Alvarado, 2012).

Cuando esta especie se encuentra asociada de manera permanente con cacao, puede sembrarse entre 200 y 400 árboles ha⁻¹, para luego reducir la densidad a través de raleos a 100 - 125 árboles ha para cosechar al final del turno (Martínez, 2015).

2.8.1 Características generales de los componentes del SAF cacao y Gmelina.

2.8.1.1 El Cacao (*Theobroma cacao* L).

Es una especie tropical leñosa perteneciente al orden de los Malvales y a la familia Malvácea, se cultiva con fines alimenticios e industriales; tiene tres variedades principales: Criollo, Forastero y Trinitario, que se diferencian en morfología, genética y origen geográfico (Aránzazu *et al.*, 2009).

El cacao en general es un árbol poco tolerante a la alta radiación, pero no es específicamente un árbol de sombra. En cultivo normalmente requiere su siembra en

sistemas agroforestales (SAF), por ser poco tolerante a condiciones climáticas adversas, especialmente cálidas y secas (Pinzón *et al.*, 2012).

Es importante establecer las interacciones entre los factores bióticos y abióticos, debido a que la siembra de cultivos mixtos permite la obtención de amplios beneficios como protección del suelo contra la erosión, incremento en la biodiversidad, mayor secuestro de C, control natural de plagas y enfermedades, control del microclima, aumento de la actividad microbiana, disminución de la utilización de fertilizantes, buena utilización de los recursos luz, agua y nutrientes. Por todo lo anterior superan con creces a los cultivos puros (Pinzón *et al.*, 2012).

El cacao crece, se desarrolla y produce en diferentes pisos térmicos, desde el nivel del mar hasta 1.300 msnm de altura, En Colombia se tiene diferentes cultivares (Tabla 1). En América Central, se cultiva hasta los 650 msnm, sin embargo, en Honduras se han observado pequeñas plantaciones a una altura de 800 m (Soto, 2009). Esta especie requiere temperaturas que van de 20°C a 30°C, una precipitación de 1.200 a 2.500 mm año y una humedad relativa de 70 a 90%. Los suelos deben ser sueltos, con contenidos mayores del 5% de materia orgánica y provistos de fósforo y potasio, con buen drenaje y profundidad efectiva superior a 1,2 m (Aránzazu *et al.*, 2009).

2.8.1.2 Clones recomendados para la zona agroecología bosque húmedo tropical

Teniendo en cuenta los estudios realizados (Aidé *et al.*, 2013) y las recomendaciones técnicas, algunos de los clones recomendados para las regiones con estas características son los siguientes: TSH,565; ICS 1; ICS 60; ICS 95; IMC 67; MON 1; CCN 51; FSA 11; FSA 12; FAR 5; FTA 1; FTA 2.

2.8.2 El árbol de Gmelina (*Gmelina arborea* Roxb.)

La *G. arborea* es una especie de rápido crecimiento, oportunista en los bosques húmedos y se clasifica como una pionera de vida larga, su capacidad de rebrote es excelente y los brotes presentan un crecimiento rápido y vigoroso. Es caducifolia, en las zonas secas, puede llegar a medir 30 m de altura y presentar más de 80 cm de diámetro. Crece usualmente con un fuste limpio de 6 hasta 9 m y con una copa cónica (Jiménez, 2016).

Los sitios óptimos para lograr un buen crecimiento de la especie son terrenos profundos de textura ligera, crecen mejor en zonas bajas en donde existe acumulación de nutrientes, suelos bien drenados, esta especie no desarrolla en suelos pobres, secos e inundados es decir que no soportantes suelos extremos (Martínez, 2015). En zonas secas de la provincia del Guayas se han realizado plantaciones con melina en donde los resultados no son los mejores, las características morfológicas de los árboles son: torcidos, hojas pequeñas en menor intensidad, raíz superficial, tallos cortos, muy lignificados y no desarrollan, quedándose como arbustos (Trujillo, 2013).

No crece bien en suelos arcillosos, en pendientes superiores a 30% con problemas de baja fertilidad, bajo contenido de materia orgánica, poca profundidad del suelo, inundados, erosionados, compactados y secos (Barrantes y Ugalde, 2015). El crecimiento también se ve afectado en suelos superficiales, con capas endurecidas, impermeables y pedregosas, así como en suelos ácidos muy lixiviados o arenas secas. El viento es otro factor limitante para su normal crecimiento, por lo que es primordial evitar estos sitios de plantación y perfilarse por sitios con buenas características y por lo general de topografía plana (Flores y Flores, 2016).

2.8.2.1 Crecimiento y rendimiento

A nivel del trópico a excepción del eucalipto (*Eucalyptus globulus*) y balsa (*Ochroma Pyramidale*), la Gmelina es una de las especies con mayor potencial de crecimiento, en ciertos sitios y específicamente óptimos puede crecer 5,8 cm/año, a los 31 meses de edad, es decir que a partir de los tres años inicia una competencia muy fuerte por nutrientes, luz, espacio dentro de los rodales (Trujillo, 2013).

En sitios óptimos esta especie puede alcanzar rendimientos de 30 y 35 m³. ha⁻¹. año⁻¹. En algunos casos se han reportado rendimientos de hasta 38 m³. ha⁻¹. año⁻¹. En promedio alcanza valores de 20 m³. ha⁻¹. año⁻¹, considerándose un rendimiento exitoso. En Costa Rica bajo condiciones óptimas de suelos andisoles en Coto Brus, se ha reportado producciones hasta 45 m³.ha⁻¹.año⁻¹ (Jiménez, 2016).

Una comparación de la producción de volumen total a los 6 años posterior al establecimiento de las plantaciones de melina y otras especies en la zona sur de Costa

Rica indica claramente que melina es la especie que posibilita el mayor potencial de producción en volumen total (Trujillo, 2013; Barrantes y Ugalde, 2015).

2.9 Estudios de caso

Se estimó el almacenamiento y fijación de C en la biomasa aérea (BA) y radicular del suelo (BAS) en siete parcelas forestales (PF) y en SAF. Las PF de entre 5 y 25 años almacenaron entre 18,6 y 64,4 Mg. C. ha⁻¹; mientras que los SAF capturaron 85 Mg.C. ha⁻¹ entre los 10 y los 15 años. La tasa de fijación de C promedio fue de 1,4 y 4,9 Mg.C. ha⁻¹.año⁻¹ para las PF y los SAF, respectivamente (Patiño *et al.*, 2018).

El SAF con maderables y frutales y el SAF con frutales presentaron la mayor biomasa total (122,0 y 72,5 t.ha⁻¹). En el SAF con maderables y frutales, se evidenció el mayor almacenamiento de carbono con 61 t. C. ha⁻¹, mientras que la mayor tasa de fijación de carbono fue de 17,7 t.ha⁻¹.año⁻¹, para el SAF con frutales. Los resultados sugieren que los sistemas productivos con cacao, que incluyen otras especies vegetales, diversifican la producción e incrementa la seguridad alimentaria y la generación de servicios ambientales, tal como la captura de carbono atmosférico (Marín *et al.*, 2016).

Se estimó el almacenamiento y la fijación de carbono en biomasa arriba del suelo y necromasa de cacaotales de 18 y 35 años en el Centro Universitario Regional del Norte, en Armero-Guayabal (Tolima, Colombia) CURDN. Los cacaotales estudiados almacenaron 28,8 y 33,6 t. C.ha⁻¹ en biomasa arriba del suelo a los 18 y 35 años, respectivamente, que arrojaron una tasa de fijación promedio de 1,6 y 1,04 t.C.ha⁻¹.año⁻¹, respectivamente. El carbono almacenado en necromasa fue de 4,4 t. C. ha⁻¹, con diferencias leves entre las edades de las plantaciones (Andrade *et al.*, 2013).

Se estudiaron plantaciones de cacao de América Central, las cuales tenían sombra mixta o productivas. Solo el 4% de las plantaciones de cacao eran a pleno sol o rústicas (cacao en bosques naturales). La densidad de árboles de cacao fue de 548 ± 192 árboles ha⁻¹). El carbono total (suelo + biomasa + biomasa muerta) fue de 117 ± 47 Mg.ha⁻¹, con 51 Mg ha⁻¹ en el suelo y 49 Mg.ha⁻¹ en la biomasa aérea (árboles de cacao y dosel). Los árboles de cacao acumularon 9 Mg. C.ha⁻¹ (18% de carbono en la biomasa aérea). La madera y los árboles frutales almacenaron el 65% del carbono sobre el suelo. La tasa de

acumulación de carbono en la biomasa aérea osciló entre 1,3 y 2,6 Mg. C ha⁻¹ (Somarriba *et al.*, 2013).

Se estimó el carbono almacenado en 50 sistemas agroforestales con cacao (SAF-cacao) de Waslala, Nicaragua. Los SAF-cacao almacenaron 91,45 ($\pm 31,44$) t.C.ha⁻¹ con una tasa de fijación de carbono total de 5,4 t.C.ha⁻¹.año⁻¹ y 2 t.C.ha⁻¹.año⁻¹ en biomasa aérea. Los compartimentos del SAF-cacao que más carbono almacenaron en orden descendente fueron: suelo (52,61%), biomasa aérea (plantas de cacao y árboles de sombra) (35,86%), raíces gruesas (7,52%), raíces finas (4,15%), necromasa (0,32%) y hojarasca (0,32%). El 56% de los SAF-cacao registraron niveles de carbono medio y alto y el 44% niveles bajo y muy bajo. (Poveda *et al.*, 2013).

Los resultados del estudio mostraron un promedio de DAP y altura total iguales a 9,86 cm y 7,03 m, con tasas de incremento mensual de 14,81 % y 11,34% respectivamente, durante el periodo de estudio se presentó un incremento de biomasa de 22,71 Mg.ha⁻¹, con una tasa de incremento mensual del 35,62%. Al finalizar el estudio los valores acumulados de biomasa, carbono y CO₂-e fueron 25,94, 12,97 y 47,59 Mg.ha⁻¹ y presentaron la siguiente distribución por componentes del árbol: fuste 61%, raíces 17%, ramas 14% y follaje 8% (Vega, 2016).

Aunque en la mayoría de los documentos se encuentran reportes de la cantidad de C acumulado por los diferentes componentes de los SAFs, su comparación se hace difícil debido a que los valores no se reportan en unidades de incremento o tasa de acumulación. Los reportes solo se limitan a describir la cantidad acumulada en la fecha de estudio, pero desafortunadamente, no se reporta la edad del sistema en estudio, para estimar el potencial de captura de carbono que es lo que realmente interesa para los mercados de carbono.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Localización

El estudio se desarrolló en el Consejo Comunitario Rescate las Varas, en el corregimiento San Luis Robles, Tumaco, Nariño, el cual limita a Norte, con la ensenada de Tumaco, al Sur, con el Consejo Comunitario Unión Río Caunapí, al Oriente, con la población urbana de Tumaco y al occidente, con el Consejo Comunitario Unión Río Rosario, con una temperatura media de 27°C, humedad relativa del 80%, precipitación de 2.800 mm.año⁻¹ y con un brillo solar de 1008 horas.año⁻¹ (IDEAM, 2017). Según Holdridge (1982), su vegetación pertenece a la de zonas de vida bosque húmedo Tropical (bh-T). Geográficamente tiene las coordenadas N 01° 39' 12" y W 78° 41' 49" (Figura 1)

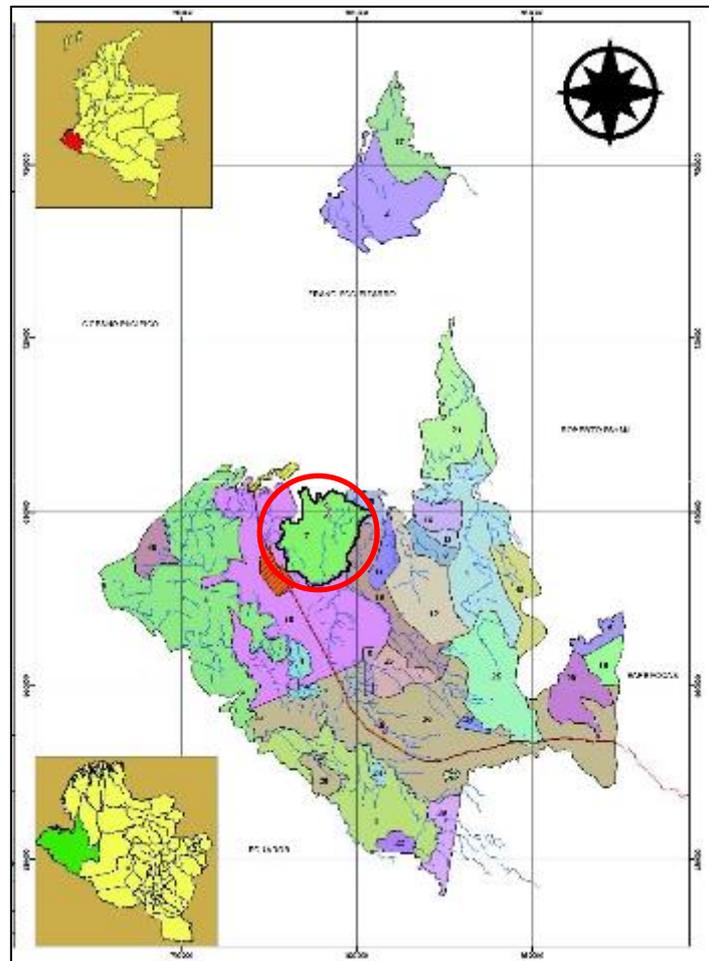


Figura 1. Localización del Consejo Comunitario Rescate las Varas donde se desarrolló el estudio.

3.2 Descripción del sistema agroforestal, *T. cacao* y *G. arborea*

El sistema agroforestal, fue establecido en septiembre de 2008 con fondos del MADR. Inicialmente, se establecieron el plátano, el cacao y la Gmelina, En el momento de la evaluación el sistema tenía nueve años y seis meses. La parcela experimental consistió en una ha, distribuida en tres bloques establecidos en las fincas de tres agricultores de la zona (Jesús Quiñones, Johnny Quiñones y Juan Marquínez), en cada bloque se establecieron los tratamientos de 40 x 40 (1600 m²), con una parcela útil de 12 árboles de cacao agricultores de la zona (Jesús Quiñones, Johnny Quiñones y Juan Marquínez). El diseño experimental propuesto para la investigación fue Bloques Completos al Azar (BCA), (una réplica por finca) con siete tratamientos y tres repeticiones. La Tabla 1 describe cada uno de los tratamientos utilizados.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos o bloques experimentales.

Tratamientos	Cacao		Maderables (Melina)	
	Distancias	Densidades	Distancias	Densidades
1	3 m x 3 m	1111	3 m x 3 m	1111
2	4 m x 4 m	625	4 m x 4 m	625
3	3 m x 4 m	833	8 m x 6 m	208
4	3 m x 4 m	833	12 m x 6 m	139
5	3 m x 4 m	833	16 m x 6 m	104
6	Franjas	416	Franjas	1000
Testigo 7	7 m x 7 m	200	12x 12	69

Tratamiento 1. Líneas de cacao de tres metros entre surcos y tres metros entre plantas (3 m x 3 m), intercalado con este a la misma distancia los maderables.

Tratamiento 2. Líneas de cacao de tres metros, cuatro surcos y cuatro metros entre plantas (4 m x 4 m), intercalado con este a la misma distancia los maderables.

Tratamiento 3. Líneas de cacao de cuatro metros entre surcos y tres metros entre plantas (4 m x 3 m), combinado con maderables a ocho metros entre surcos y seis metros entre plantas (8 m x 6 m).

Tratamiento 4. Líneas de cacao de cuatro metros entre surcos y tres metros entre plantas (4 m x 3 m), combinado con maderables a doce metros entre surcos y seis metros entre plantas (12 m x 6 m).

Tratamiento 5. Líneas de cacao de cuatro metros entre surcos y tres metros entre plantas (4 m x 3 m), combinado con maderable a dieciséis metros entre surcos y seis metros entre plantas (16 m x 6 m).

Tratamiento 6. Franjas de cacao a diez metros entre eje y eje, con una distancia entre surcos de cuatro metros y entre plantas de cuatro metros franjas de maderables a diez metros entre ejes, con distancias entre surcos de dos metros, distancia entre plantas de dos metros.

Tratamiento 7. (Testigo) Finca tradicional, donde encontramos una cantidad promedio de 200 árboles de cacao por hectárea y un promedio de 69 árboles de maderables.

3.3 Toma de muestras de suelo

Antes del establecimiento del sistema agroforestal (Inicio del proyecto) se tomaron muestras de suelo de las áreas objeto de estudio para conocer el estado de fertilidad de los suelos. Para realizar esta investigación antes de iniciar el aprovechamiento de los arboles se tomaron nuevas muestras de suelo de cada bloque para conocer el efecto del sistema agroforestal en el suelo, para la toma de estas muestras se realizó un trazado en zig - zag de las áreas, para la colecta de las muestras se utilizó una pala con la cual se hizo un hoyo en forma de V con una profundidad de 20 cm, en cada bloque se tomaron 10 submuestras para obtener una muestra compuesta más representativa de cada bloque (1 kilo). Estas muestras se empacaron en bolsas transparentes y se rotularon con los datos correspondientes a la zona de estudio, nombre de la finca y del propietario, las muestras tomadas se llevaron al laboratorio especializado de suelos de la UDENAR para su análisis.



Figura 2. Toma de muestras de suelos en las parcelas del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda san Luis Robles – Tumaco, Nariño.

3.4 Material vegetal

El material vegetal analizado corresponde a árboles de melina sembrados por semilla procedente de Semicol, los clones de cacao establecidos en las parcelas de investigación fueron los recomendados por CORPOICA para zonas de bosque húmedo tropical: IMC67, ICS60, ICS95, TSH565, y CCN51.

3.5 Selección del árbol medio

La medición de las variables se realizó en 36 árboles, a los cuales se les hicieron mediciones de diámetro (dap) a 1.30 m del suelo, altura y área de copa en 2 direcciones y a los árboles de cacao se les hizo la medición del diámetro a 30 cm del suelo, altura y área de copa en dos direcciones. Con esta información se determinó el árbol medio, ósea los árboles que se ubicaran dentro del rango $\bar{X} \pm S$ y presentaran buenas condiciones de desarrollo y sanitarias.

3.6 Evaluación del sistema agroforestal

A los árboles de melina, se les hicieron mediciones de diámetro (dap) a 1.30 m del suelo utilizando una cinta diamétrica, altura con una cinta de 50 m y área de copa en 2 direcciones y a los árboles de cacao se les hizo la medición del diámetro a 30 cm del

suelo, altura y área de copa en dos direcciones. Se registro el estado fitosanitario de cada individuo y la presencia de deformidades en el fuste en las dos especies.



Figura 3. Medición del DAP al componente forestal del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.

3.6.1 Diámetro de copa

Con los árboles en pie, se midió con cinta métrica, en dos direcciones (E-W) y (N-S) se promedió las mediciones perpendiculares de la proyección vertical de las copas sobre el suelo para obtener su área (Segura y Andrade, 2008).



Figura 4. Medición de diámetro de copa de los arboles del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles -Tumaco, Nariño.

3.7 Altura de los arboles

Una vez apeados los árboles de melina se utilizó una cinta métrica para medir la altura total y comercial de cada árbol. Para el caso de la altura comercial la medición se hizo de la base del corte hasta la primera bifurcación del árbol. Para los árboles de cacao la medición se hizo de la base del corte hasta la rama de más proyección en altura.

3.8 Medición, corte y estimación de volumen, biomasa y carbono (VBC).

3.8.1 Peso y medición de los componentes y toma de muestras para análisis en laboratorio.

Los árboles de melina apeados se separaron en varios componentes, el fuste o área comercial se dividió en secciones de 3 metros para facilitar su pesaje, las ramas se cortaron por diámetros: grandes (> 25 cm), medianas (≤ 25 cm) y pequeñas (≤ 5 cm) y las hojas, flores y frutos se pesaron en conjunto; Los árboles de cacao se separaron en ramas (≤ 25 cm y ≤ 5 cm). Cada componente fue pesado y registrado por separado. Para facilitar el pesaje se utilizó una balanza digital de 500 kg y un trípode armado con ramas capaces de soportar el peso de las trozas y las ramas. Una vez realizados los cortes y el deshoje de las ramas se tomaron las muestras y se pesaron inmediatamente para evitar su senescencia y descomposición.



Figura 5. Corte, pesaje, recolección y análisis de las muestras en el laboratorio del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.

3.8.2 Determinación de la biomasa

Para calcular la biomasa aérea de las especies *Theobroma cacao* y *Gmelina arborea*, se utilizó el método directo o destructivo donde se cortaron y seccionaron los árboles para pesar cada componente (troco, ramas y hojas), luego se tomaron muestras representativas de 500 g de cada uno de los componentes. Las muestras se enviaron a los laboratorios Especializados de la Universidad de Nariño (Pasto), donde se secaron a una temperatura de 74°C hasta que alcanzaron peso constante. Con la formula (1) se determinó el contenido de humedad de la muestra la cual fue extrapolada a los diferentes componentes de los árboles apeados utilizando la formula (2) para determinar la biomasa total de cada árbol.

$$CH\% = \frac{\text{Peso fresco} - \text{Peso seco al horno}}{\text{Peso húmedo}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Biomasa} = \frac{\text{Peso fresco} \times CH}{100} \quad (2)$$



Figura 6. Muestras representativas del tronco, ramas y hojas del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles - Tumaco, Nariño.

3.9 Construcción de modelos alométricos

3.9.1 Definición de las variables y prueba de supuestos estadísticos

El ajuste de los modelos se realizó mediante regresiones por mínimos cuadrados relacionando el diámetro (variable dependiente) con la altura (variable independiente). Para determinar las ecuaciones de mejor ajuste se utilizaron los modelos genéricos propuestos por (Segura y Andrade, 2008). Registrados en la (Tabla 2). Los cuales sirvieron como base para la construcción de los modelos alométricos para cada especie.

Tabla 2. Ecuaciones alométricas genéricas más empleadas para la estimación de volumen, biomasa, y C (VBC) en árboles y arbustos.

Nombre	Ecuación
Berkhout	$VBC = a + b * dap$
Kopezky	$VBC = a + b * dap^2$
Hohenadl – Krenn	$VBC = a + b * dap + c * dap^2$
Husch	$Ln VBC = a + b * ln dap$
Spurr	$VBC = a + b * dap^2 * h$
Stoate	$VBC = a + b * dap^2 + c * dap^2 * h + d * h$
Meyer	$VBC = a + b * dap^2 + c * dap^2 * h + d * dap^2 * h$
Schumacher – Hall	$Ln VBC = a + b * ln dap + c * ln * h$

Fuente: Loetsch *et al.*, 1973. VBC=Volumen (m³árbol), Biomasa (kg árbol) o C (kg árbol); dap = diámetro a la altura del pecho (1.30 m), h = altura (m); a, b, c, d = parámetros del modelo; ln = logaritmo basa e

Estos modelos se compararon teniendo en cuenta los resultados con cada uno de los criterios de información. Además, se tuvo en cuenta que las ecuaciones de biomasa son específicas para cada especie ya que la biomasa está muy relacionada con la densidad de la madera (Segura y Andrade, 2008).

3.9.2 Criterios para seleccionar el modelo de mejor ajuste.

Los criterios que se utilizaron para evaluar los modelos fueron: coeficiente de determinación ajustado (R²-ajust.), AIC, BIC, PRESS, Raíz del cuadrado medio del error (RCME), Error del cuadrado medio de los predictores (ECMP) y el índice de Furnival.

3.9.2.1 Coeficiente de determinación ajustado (R²- Ajustado).

El R²- ajustado sirvió para determinar qué tan bien se ajustó el modelo a los datos. El valor de R²- ajustado incorporo el número de predictores del modelo para ayudar a elegir el modelo correcto.

3.9.2.2 Criterio de Información Akaike (AIC)

El Criterio de Información Akaike se utilizó para penalizar el exceso de parámetros ajustados y para conocer la exactitud y complejidad de los modelos, tomando en consideración los que reportaron menores valores.

3.9.2.3 Criterio de Información Bayesiano (BIC)

El Criterio de Información Bayesiano (BIC), se utilizó en la selección de un modelo entre un conjunto de modelos con los mejores criterios de evaluación.

Los dos estadígrafos anteriores nos permitieron la comparación entre los modelos con variables transformadas y sin transformar, permitiéndonos comparar visualmente los valores estimados y observados en la medición de los árboles.

3.9.2.4 Suma de cuadrados de predicción (PRESS).

El PRESS sirvió para evaluar la capacidad de predicción de los modelos. La aplicación del estadígrafo demostró que hubo modelos con alta capacidad de predicción de los resultados gracias a sus pequeños valores.

3.9.2.5 El error cuadrático como medio de predicción (ECMP).

Los modelos seleccionados por su mayor capacidad de ajuste fueron aquellos que expresaron los menores valores con respecto a este criterio.

3.9.2.6 El índice de Furnival (IF)

Nos Permitió comparar modelos lineales y no lineales con aquellos donde la variable dependiente fue transformada. Este índice se empleó para determinar dentro de un grupo de 8 modelos el que mejor se ajustó a las variables evaluadas (Ecuación 3).

$$IF = RCME * anti \log \left(\frac{\sum \left(\log \left((B')^{-1} \right) \right)}{n} \right) \quad (3)$$

Dónde:

IF = índice de Furnival

RCME = raíz cuadrada del cuadrado medio del error

$(B')^{-1}$ = recíproco de la primera derivada de la variable dependiente (transformada) (Furnival, 1961).

Para utilizar la ecuación de Furnival es necesario determinar los recíprocos de la derivada de algunas de las transformaciones más comunes que utilizamos para el ajuste de los modelos alométricos de biomasa propuestos (Tabla 2).

Tabla 3. Recíprocos de la primera derivada de las variables dependientes transformadas para el cálculo del índice Furnival.

Variable dependiente transformada	(B)-1
Log (B)	2,3026 x B
Ln (B)	B
BK	1/(kBk-1
1/B	-B2

Fuente: Adaptada y complementada de Alder (1980)

3.9.3 Ajuste de modelos para *Gmelina arborea*

Para el desarrollo y la calibración de los modelos de melina arborea se partió de los modelos genéricos (Tabla 3), con una edad de 9,6 años. Debido a que estos modelos no cumplieron con la rigurosidad impuesta en los criterios de información, se desarrollaron nuevos modelos.

3.9.4 Ajuste de modelos para *Theobroma cacao* L.

Para el desarrollo y la calibración del modelo para cacao, se utilizó el diámetro a 30 cm del suelo (Diám 30cm), metodologías desarrollada en los ensayos del Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ y del ensayo “Moniliasis resistant hybrid experiment at La Lola farm”. Este modelo es de tipo logarítmico, utilizando como única variable predictora el diámetro a 30cm sobre el suelo, por ser una variable más precisa y de fácil medición (Ecuación 4).

$$\text{Bat} = 10^{(-1,625 + 2,626 \cdot \log(\text{Diám}30))} \quad (4)$$

Donde:

Bat: Biomasa aérea total en kg

log: Logaritmo en base 10

Diám30: Diámetro a 30cm sobre el suelo (cm)

3.10 Otros modelos alométricos de volumen, biomasa y C

Dentro de la investigación también se utilizó un modelo propuesto para los bosques húmedos tropicales donde se incluye la densidad de la madera como otra variable predictora (Alvares, 2008) (Ecuación 5 y 6).

$$\ln(BA) = a + B1 \ln(D^2 * H * 0.37) \quad (5)$$

Donde:

0.37 = Densidad de la madera de melina (gr/cm³)

a = Constante del modelo (- 2,218)

B1 = Constante del modelo (0,932)

R² = Ajuste del modelo (0.948)

$$\ln(BA) = a + b \ln(D) + c (\ln(D))^2 + d (\ln(D))^3 + B1 * \ln(0.37) \quad (6)$$

Donde:

0.37 = Densidad de la madera de melina (g/cm³)

a = Constante del modelo (2,828)

b = Constante del modelo (-1,596)

c = Constante del modelo (1,237)

d = Constante del modelo (-0,126)

B1 = Constante del modelo 0,441

R² = Ajuste del modelo (0,954)

3.10.1 Selección y validación de los mejores modelos

Para llevar a cabo el proceso de validación, la base de datos se dividió en dos partes una para el training que correspondió al 80% de los datos y otra para el testing que alojó el restante 20%. Por motivos de que los individuos de la muestra eran pocos, se tomaron 8 árboles para hacer la validación, de estos se seleccionó uno y con los restantes 31 se

desarrollaron las predicciones. Los modelos finales fueron evaluados teniendo en cuenta la IV, su R^2 ajustado y su error promedio. Una vez seleccionado el mejor modelo y obtenida la ecuación de ajuste, se realizó un análisis gráfico de los residuales estudentizados para detectar la presencia de normalidad en los errores y homogeneidad en las varianzas.

3.10.2 Producción del cacao

Se hicieron mediciones de productividad del cacao en cada uno de los tratamientos durante un año (enero de 2017 a enero de 2018). En este tiempo se realizó el registro de los datos de cosecha cada 15 días, obteniendo así la producción mensual. Se optó por este procedimiento ya que para los años anteriores no había registros confiables de las cosechas obtenidas en cada uno de ellos. La toma de datos consistió en registrar la cantidad de kilos de cacao en seco obtenidos mensualmente en cada uno de los tratamientos.

3.11 Análisis de datos

Antes de evaluar el porcentaje de ajuste de los diferentes modelos a los datos de biomasa de *G. arborea*, se probaron los supuestos de homoscedasticidad (variabilidad constante de los errores), normalidad de los errores, independencia lineal, linealidad. El supuesto, de homoscedasticidad se logró eliminando tres observaciones (Outliers) con lo cual se obtuvo un valor de significancia de 046 con la prueba de variancia constante (la prueba formal de Breusch-Pagan), para la normalidad se utilizó los QQ-plots y la curva normal, en esta se puede observar algunos puntos desviados en las colas, pero que no afectan la normalidad. Aunque presenta unos puntos desviados en los valores bajos, una muestra grande hace que los coeficientes del modelo se aproximen a la normalidad (los gráficos de los residuos y los QQ-plots se adjuntan en el Anexo 5. Para el supuesto de independencia lineal en el análisis exploratorio, se encontró que el coeficiente de correlación de Pearson no es significativo entre las dos variables explicativas. Mientras que, para el supuesto de linealidad, con la transformación de la variable dependiente, se logró linealizar la relación.

Mediante un Análisis de Varianza donde se determinó las diferencias estadísticas significativas en los contenidos de C y la productividad en cada uno de los tratamientos. Cuando se presentaron diferencias estadísticas significativas $<$, la prueba de Rangos Múltiples de Tukey al 0,05 fue suficiente para separar los promedios de los tratamientos. El a investigación se realizó con una probabilidad del 95% usando el programa R 3.5.1 y el programa SAS 6.4.

3.12 Análisis económico y financiero

El análisis económico y financiero se hizo en base a los costos de establecimiento por hectárea y los ingresos estimados en un periodo de 10 años, los cuales sirvieron para determinar la viabilidad financiera, tomando como puntos de referencia la Tasa interna de retorno (TIR), el Valor actual neto (VAN) y la Relación beneficio costo (R B/C) de cada uno de los tratamientos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Acumulación de C en el sistema agroforestal de cacao (*Theobroma cacao* L.) y melina (*Gmelina arborea*) en la vereda San Luis Robles -Tumaco, Nariño.

4.1.1 Incremento medio anual (IMA) de C de *G. arborea* en el sistema agroforestal

Se presentaron diferencias estadísticas significativas ($Pr > F = 0,0001$) para el IMA en el sistema agroforestal de *G. arborea*. Los resultados indican un alto potencial de acumulación de C de la Gmelina en el tratamiento 2, tratamiento 1 y tratamiento 6 con 5, 4,60 y 4,18 t.C.ha⁻¹.año⁻¹, respectivamente a una edad de 9,6 años (Figura 7). Estos son bajos comparados por lo reportado por Vega (2016) quién en plantaciones de *G. arborea* encontró una fijación de C promedio de 8,3 t.C.ha⁻¹.año⁻¹ a una edad de cinco años y lo reportado por Cubero y Rojas (1999) en plantaciones de cuatro años, en una zona denominada Hojanca, localizada en el Pacífico seco de Costa Rica quienes reportan valores entre 1,0 y 3,3 t.C.ha⁻¹.año⁻¹. Del mismo modo Bohre *et al.* (2013) reportan una fijación de 3,8 t. C. ha⁻¹. año⁻¹ a los seis años y una mayor de 16,2 t.C.ha⁻¹ a los nueve años en Madhya Pradesh, India. Estos contrastes en la acumulación de C se justifican debido a que en estos estudios *G. arborea* se encuentra en plantaciones puras mientras que en el experimento analizado se encuentra en sistema agroforestal con cacao, que en su fase inicial estuvo asociado con plátano, también se debió a las diferencias de calidad de sitio, edad y manejos silvícolas.

Hay investigaciones que reportan que la producción de madera es más eficiente en los árboles plantados en arreglos densos que los que crecen aislados, con diferencias entre el 20 y 15% respectivamente (Craine y Dybzinski, 2013; Robinson *et al.*, 2013). Estos resultados de alta producción de biomasa en plantaciones puras están claramente justificados (Ordóñez, 2012). Lo que pone en discusión la capacidad del almacenamiento de C de estos sistemas frente al Cambio Climático (CC), ya que las áreas para el desarrollo de nuevas plantaciones puras son limitadas y solo quedan áreas que en la actualidad se encuentran en sistemas de producción agropecuarios (Anguiano *et al.*, 2013).

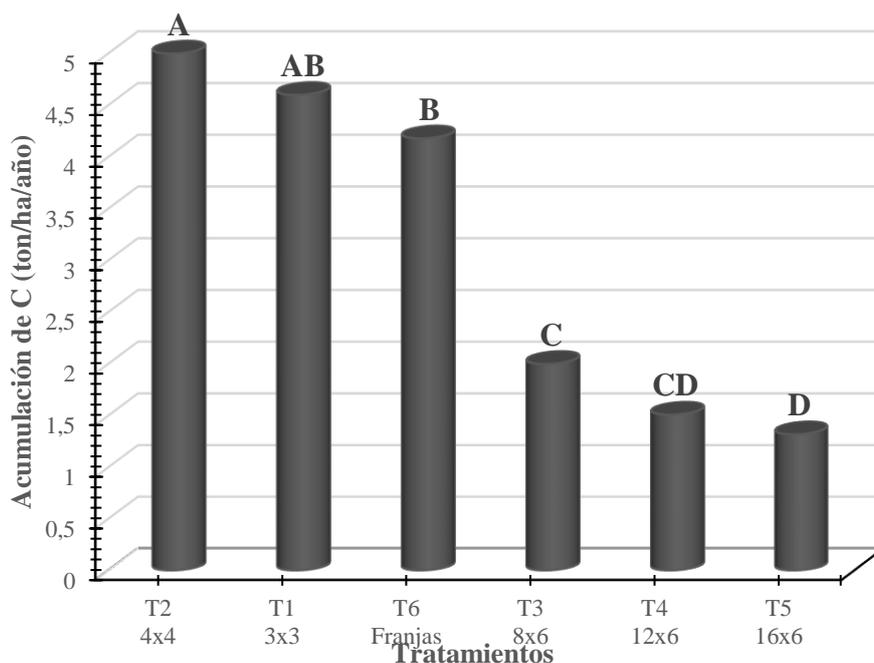


Figura 7. Incremento medio anual de C en la parte aérea de la *G. arborea* en el sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles -Tumaco, Nariño.

En lo que respecta a la captura de carbono, faltan estudios para poder calcular efectivamente cual es el efecto de los árboles y los bosques, ya que se afirma que los árboles no crecen a un ritmo continuo y que a medida que el árbol envejece su capacidad de almacenamiento de C disminuye y sus curvas de crecimiento acumulativo (CGC) son sigmoideas hasta que se nivelan convirtiéndose en un bosque climácico (Escolastico-Leon *et al.*, 2013), en el mismo sentido se indica que la capacidad de capturar C atmosférico tiende a disminuir en relación con el incremento de la edad del bosque o al grado de madurez del suelo, en edades tempranas o intermedias es más alta la captura de C (Fonseca *et al.*, 2011). Stephenson *et al.* (2014) cuestionaron la nivelación de la curva y propusieron que la acumulación de biomasa arbórea aumenta continuamente con el tamaño del árbol, y que los árboles viejos pueden almacenar más biomasa que los árboles jóvenes. Al respecto, Verchot *et al.* (2007) indica que este estudio ayuda a entender la dinámica de los rodales de árboles antiguos y árboles grandes en los bosques, esto ratifica que los bosques tropicales están absorbiendo cantidades considerables de C que en el momento no se están registrando y no son objeto del pago por servicios ambientales.

4.1.2 Acumulación total de C en la *G. arborea* en el sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño

Se presentaron diferencias estadísticas significativas ($Pr > F = 0,0001$) para la acumulación (stock) de C por la *Gmelina* (Anexo 6). Los tratamientos 2, 1 y 6 presentan las mayores acumulaciones de C en el fuste y las ramas con $48,20 \text{ t.C.ha}^{-1}$, $44,24 \text{ t.C.ha}^{-1}$ y $40,16 \text{ t.C.ha}^{-1}$, respectivamente (Figura 8). Posiblemente esto se debe al mayor número de individuos en cada uno de ellos (625 , 1111 y 1000 árboles ha^{-1}). Cubero y Rojas 1999. Reportan una fijación de C de $76,71 \text{ t.C.ha}^{-1}$ en plantaciones puras en fuste y biomasa aérea evaluadas por edad y calidad de sitio en árboles de ocho años con una densidad de siembra de 230 árboles ha^{-1} .

Por otro lado, vega (2016) reporta que una plantación de *G arborea* almacenó $41,6 \text{ t.C.ha}^{-1}$ a un año y tres meses de edad en Costa Rica; mientras que Bohre *et al.* (2013) estimaron en $22,9 \text{ t.C.ha}^{-1}$ a los seis años y $145, 4 \text{ t.C.ha}^{-1}$ a los nueve años para esta misma especie en Madhya Pradesh, India. Por su parte, Andrade *et al.* (2013) reporta que en términos porcentuales que el fuste del árbol de *G. arborea* concentra la mayor cantidad de biomasa aérea, representada entre 55 al 77% del total, luego están las ramas con 5 a 37% .

Algunas investigaciones reportan que la producción de madera es más eficiente en los árboles plantados en arreglos densos que los crecen aislados, con diferencias entre el 20 y 15% , respectivamente (Craine y Dybzinski, 2013; Robinson *et al.* 2013). Esta respuesta de alta producción de biomasa está acorde con la hipótesis de maximización del uso eficiente de los recursos y de la eficiencia en el crecimiento. El uso eficiente de los recursos cuantifica la conversión de los recursos capturados hacia la biomasa, lo que puede cambiar por efecto del manejo forestal (Andrade *et al.*, 2014).

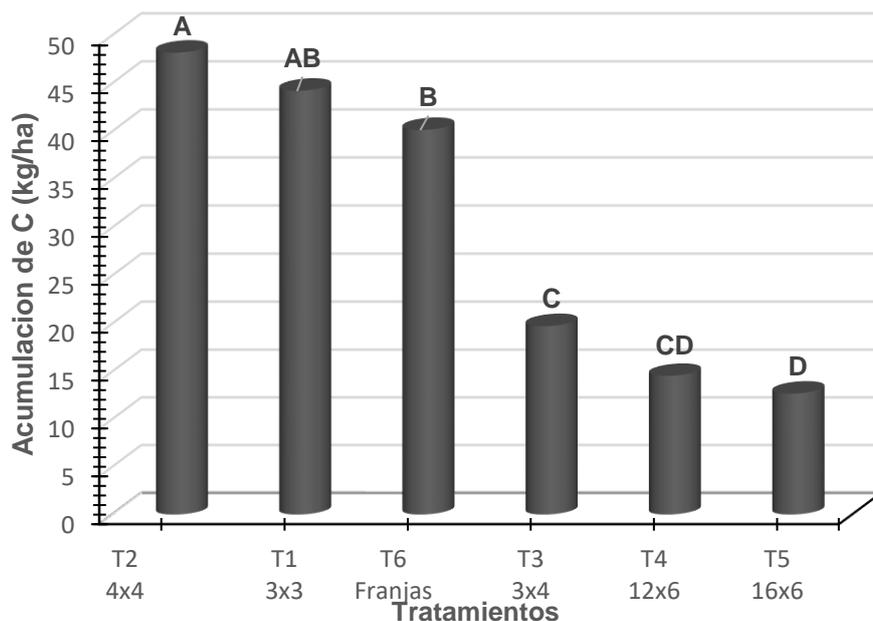


Figura 8. Acumulación total de C en la parte aérea de la *G. arborea* en el sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.

4.1.3 Acumulación media anual de C en *T. cacao* bajo el sistema agroforestal

Se presentaron diferencias estadísticas significativas ($Pr > F = 0,0001$) para la acumulación (stock) de C por el cacao. Para los tratamientos (5, 2, 4, 3, y 6) con respecto al tratamiento 1. Los tratamientos (5 y 2), presentan las mayores acumulaciones de C en el fuste y las ramas con 40,60 y 40,37 t.C.ha⁻¹, respectivamente (Figura 9). Esto debido a las distancias de siembra empleadas en cada uno de los tratamientos (3 x 4 m y 4 x 4 m) lo que favoreció su desarrollo estructural de manera adecuada. Ortiz *et al.* (2008) afirman que un árbol de cacao puede acumular, en promedio, 22 kg de biomasa a la edad de 25 años, es decir 0,88 kg.ha⁻¹.año⁻¹.

Tomando como referencia los resultados reportados por (Andrade *et al.*, 2013) de 1,1 y 3,2 t.C.ha⁻¹.año⁻¹, respectivamente, encontramos que los resultados arrojados en el presente estudio son superiores en los tratamientos (4, 2 y 5), los cuales van de 3,61, 4,20 y 4,22 t.C.ha⁻¹.año⁻¹ respectivamente.

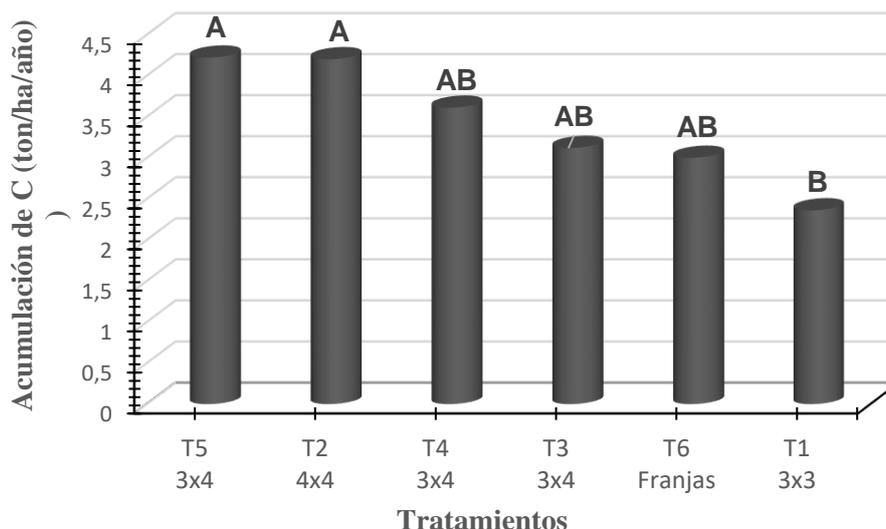


Figura 9. Acumulación media anual de C en la parte aérea del *T. cacao* en el sistema *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.

4.1.4 Acumulación total del C del *T. cacao* en el sistema *T. cacao* y *G. arborea*

Los tratamientos presentaron diferencias estadísticas significativas ($Pr > F = 0,0001$) en la acumulación de C del cacao sembrado en el sistema agroforestal (Anexo 7). En la separación de promedios mediante la prueba de Tukey, el tratamiento 5 y tratamiento 2 presentaron la mayor acumulación de C en la parte aérea con 40,6 y 40,4 t.C.ha⁻¹, esto equivale a una fijación de 4,22 y 4,20 t.C.ha⁻¹.año⁻¹ respectivamente (Figura 10). Esto debido a la densidad de siembra empleadas, factor que favoreció el desarrollo morfológico de los árboles de cacao. Caso contrario para los arboles del tratamiento 1 (22.69 t.C.ha⁻¹) que a pesar de tener la más alta densidad de siembra reporta la más baja acumulación de C, con una tasa de fijación de 2,36 t.C.ha⁻¹.año⁻¹). La alta humedad y la baja luminosidad incrementada por la densidad de siembra hizo que las plantas crecieran más longitudinalmente que en diámetro, generando más follaje que madera.

Andrade *et al.* (2013) en investigaciones realizadas en el Centro Universitario Regional del Norte CURDN, (Tolima, Colombia) indica que los cacaotales estudiados almacenaron en promedio 28,8 y 33,6 t.C.ha⁻¹ en biomasa arriba del suelo a los 18 y 35 años, respectivamente; con una tasa de fijación promedio de 1,2 t.C.ha⁻¹, resultados similares a lo encontrado por Cerda (2011) en Guatemala, quien reportó 39,4 t.C.ha⁻¹, quien afirma

que la mayor acumulación de C se da hasta los primeros 10 años. Por otra parte, Ortiz *et al.* (2008) afirman que un árbol de cacao puede acumular, en promedio, 2,2 kg de biomasa a la edad de 25 años, es decir $0,88 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$.

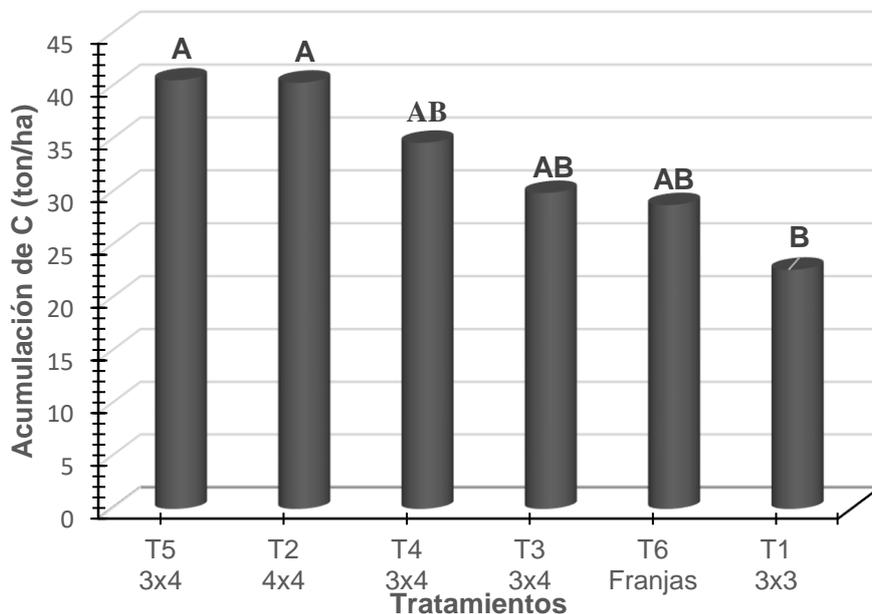


Figura 10. Acumulación total de C en la parte aérea del *T. cacao* en el sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles - Tumaco, Nariño

El cacao sembrado en ambientes muy sombreados conlleva a menores tasas de asimilación de CO_2 y también a menor producción de frutos y biomasa. Con respecto a disponibilidades de agua ya existen reportes que tanto por déficit de agua o excesos las plantas de cacao se ajustan osmóticamente (Vespa, 2008). Por lo tanto, la luz es uno de los factores que puede generar estrés en las plantas y se constituye como uno de los factores limitantes del crecimiento y la eficiencia de la tasa fotosintética (Lozano, 2014). En consecuencia, la reducción de la fotosíntesis disminuye la biomasa.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que la ecuación alométrica empleada puede tener algún tipo de incertidumbre, ya que esta fue desarrollada en Costa Rica, que, aunque tiene condiciones parecidas al lugar donde se realizó el experimento, la misma puede tener cierto margen de variabilidad. Una buena opción sería desarrollar las ecuaciones propias para Tumaco.

4.1.5 Acumulación de C en la parte aérea en el sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arbórea* en la vereda San Luis Robles -Tumaco, Nariño.

En el Análisis de Varianza se evidenciaron diferencias estadísticas significativas ($Pr > F = 0,0001$) para la variable acumulación de C en la parte aérea de los componentes (cacao y melina) (Anexo 8) El arreglo que reportó la más alta acumulación fue el tratamiento 2 con $88,58 \text{ t.C.ha}^{-1}$ (con una tasa de fijación anual promedio de $9,22 \text{ t.C.ha}^{-1}$). Esta alta acumulación de C se debe a la densidad de siembra empleada en el sistema (625 árboles de cacao y 625 árboles de Gmelina). Viéndose favorecido el desarrollo estructural de los árboles de cacao como lo muestra su acumulación de biomasa. Este comportamiento nos indica que esta esta densidad es la adecuada para establecer un pago por servicios ambientales.

Para el caso de los tratamientos 3, 4 y 5 con $49,71 \text{ t.C.ha}^{-1}$, $49,26 \text{ t.C.ha}^{-1}$ y $53,31 \text{ t.C. ha}^{-1}$, la acumulación de biomasa total fue muy parecida, con tasas de fijación anuales en promedio de ($4,23 \text{ t.C.ha}^{-1}$) debido a que los tres tratamientos se diseñaron bajo condiciones parecidas. Donde el espaciamiento y el desarrollo de cada uno de los individuos surtió efecto y definió las diferencias.

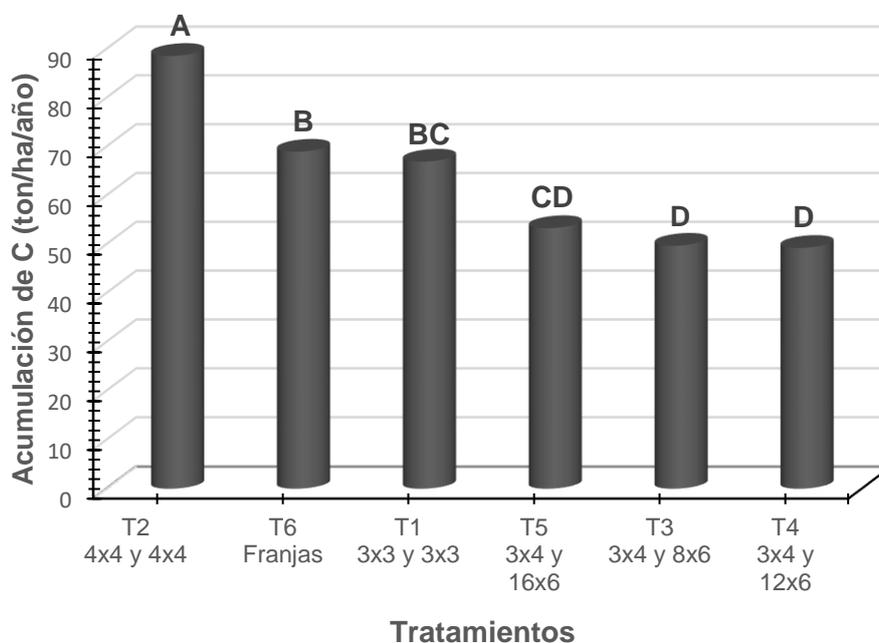


Figura 11. Acumulación total de C en la biomasa aérea del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles - Tumaco, Nariño.

Los cacaotales de Talamanca, Costa Rica almacenaron en 25 años entre 112 y 132 t.C. ha⁻¹ en la madera de los árboles de cacao y de sombra a un ritmo similar (4,48 y 5,28 t. C.ha⁻¹) al encontrado en los cacaotales de Waslala (Andrade *et al.*, 2008). Cacaotales de seis años en el Valle de Juliana, Bahía, Brasil, con sombra de caucho (*Hevea brasiliensis*) de 34 años almacenan en la biomasa aérea 106,80 t.C.ha⁻¹ (Cotta *et al.*, 2006.). Cacaotales del tipo Cabruca en Bahía, Brasil fijan más C que los SAF-cacao de Waslala; la fijación de estos sistemas es similar a los bosques naturales y significativamente mayor que los cacaotales con sombra monoespecífica (Gama-Rodríguez *et al.*, 2010). Estas estimaciones y la literatura científica confirman la importancia de los SAF, como estrategias para mitigar el cambio climático (Andrade *et al.*, 2014).

Tomando como referencia la escala (80 y 120 t.C.ha⁻¹) propuesta por Somarriba *et al.* (2008). La acumulación de biomasa del SAF cacao y melina, se ubica en el límite inferior, lo que representa niveles bajos de almacenamiento de C teniendo en cuenta solamente la parte aérea que acumuló entre 49,26 y 88,58 t.C.ha⁻¹. Lo que demuestra que el éxito en la captura y almacenamiento de C en un SAF no solo depende del tipo de arreglo que se proponga, sino que también es fundamental el manejo que se le dé al sistema.

4.1.6 Acumulación media de C en la parte aérea y raíces en el sistema agroforestal *T. cacao* y *G arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.

En el Análisis de Varianza se presenta la misma tendencia ya que los valores fueron multiplicados por una constante. Los resultados indican que en el sistema agroforestal el mayor stock de C promedio corresponde al tratamiento 2 con 11,44 t. C.ha⁻¹.año⁻¹, para los demás tratamientos esta acumulación osciló entre 8,90 y 6,36 t. C.ha⁻¹.año⁻¹.

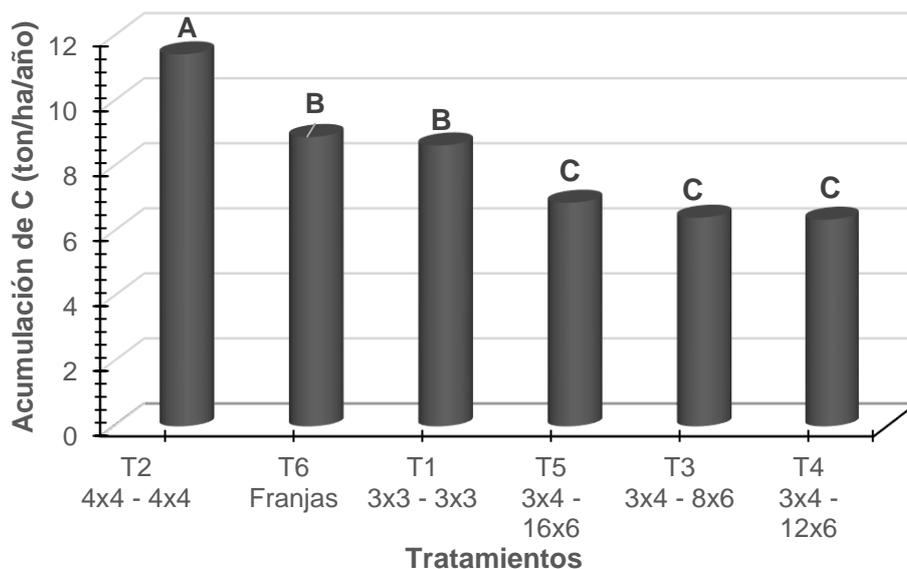


Figura 12. acumulación media anual de C por hectárea en la biomasa aérea y raíces en el sistema agroforestal *T. Cacao G. arborea* y en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.

La acumulación total de C en el SAF *T. cacao* y *G. arborea* presenta valores que mantienen la misma tendencia anterior y que van desde 61,1 (Tratamiento 4) hasta 109,8 t.C.ha⁻¹.año⁻¹ (Tratamiento 2). Estos valores relativamente caen dentro de la escala propuesta por Somarriba *et al.* (2008) de 80 y 120 t.C.ha⁻¹, con una pequeña desviación en el límite inferior presentada por los tratamientos 3 y 4.

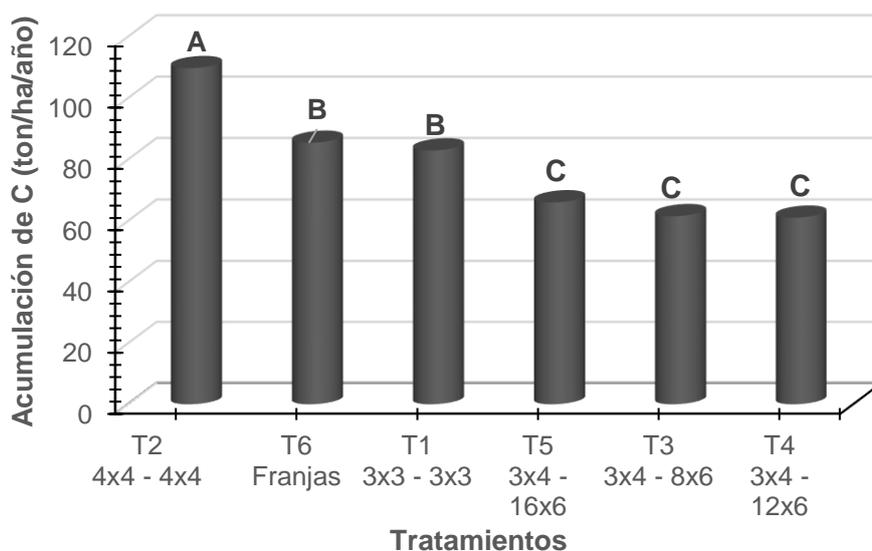


Figura 13. Acumulación total de C por hectárea en la biomasa aérea y raíces en el sistema agroforestal *T. Cacao* y *G. arborea* en la Vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.

4.2 Modelos alométricos

4.2.1 Modelos alométricos genéricos para *Gmelina arborea*

Con los datos del muestreo destructivo se probaron diferentes ecuaciones para determinar los modelos que mejor se ajustaban a la relación diámetro-altura y la acumulación de C de los árboles del SAF. Para *G. arborea* se evaluaron ocho modelos alométricos genéricos (Tabla 4). Como resultado los modelos que presentaron mejor ajuste fueron las ecuaciones de Stoate y Meyer con un R^2 ajustado de 94%. Desafortunadamente, al hacer la evaluación de estos modelos con los otros Criterios de Información presentaron problemas. Uno de estos inconvenientes fue en la inflación de la varianza (IV) la cual resultó muy alta (>10), dentro del ajuste de los modelos buscamos que esta inflación siempre estuviera por debajo de 10. La IV se refiere a la multicolinealidad; la cual evalúa la parsimonia o reducción de términos de los modelos y evitar así la redundancia de los términos. Si los modelos superan ese techo no pueden ser usados para explicar el comportamiento de la biomasa de *G. arborea*.

El filósofo William Ockham (1287–1347) desarrolló el concepto de navaja de Ockham mejor conocida como la economía de parámetros usados para explicar un fenómeno (multicolinealidad). Dadas las mismas condiciones, la explicación que suele resultar correcta es la más sencilla (Pérez y Gardey, 2014). También afirman que esta norma indica que un elevado valor de la IV mayor que 10, es un indicio de que las variables predictoras consideradas en un modelo de regresión están altamente correlacionadas con ellas mismas y son redundantes.

Para resolver este problema se utilizaron medidas remediales para las ecuaciones de regresión, resultando en la eliminación de dos datos extremos o influenciadores (Outliers) (Pérez y Gardey, 2014). Al aplicar nuevamente los modelos se logró un mejor ajuste de los modelos a los datos como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Evaluación de los modelos alométricos genéricos aplicados para *G. arbórea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.

Criterios de información															
Modelo No	IV	CAL	R ² Ajustado	CAL	AIC	CAL	BIC	CAL	PRESS	CAL	ECMP	CAL	IF	CAL	Puesto
Stoate	1857151	6	0,94	2	868,38	3	879,46	4	5698250	4	37,39	4	37750	3	3
Meyer	4247,90	4	0,94	1	869,05	4	878,55	3	61097151	7	37,1	3	38530	4	4
Hohenadl - K	116.84	3	0,89	3	887,81	5	894,15	5	10155606	5	42,03	5	51240	5	5
Spurr	550,198	5	0,88	4	889,81	6	897,73	6	11300722	6	45,32	6	61610	6	6
Schumacher	5,09	2	0,84	5	-0,851	1	5,482	1	21.064	2	0,09	1	0,2235	1	1
Berkhout	1	1	0,75	6	15,14	2	19,89	2	3.232	1	27,58	2	22827	2	2
Husch	1	1	0,75	7	915,74	8	920,49	7	2374543	3	50,49	7	76490	7	7
Kopezky	1	1	0,69	8	924,13	9	928,88	8	30119435	8	53,53	8	85950	8	8

IV= Inflación de la varianza, CAL= Calificación, ECMP= Error Cuadrático medio de la predicción; R² Ajust= R cuadrado ajustado; AIC= Criterio de información de Akaike, BIC= Criterio de información bayesiano, PRESS= Suma de cuadrados de la predicción; IF= índice de Furnival

Algunos modelos como el de Berkhout, Kopezky, Husch y Schumacher cumplen con el criterio de parsimonia, pero al observar los valores de los R^2 ajustados hacen una explicación baja de la relación de los parámetros altura y diámetro con la acumulación de C. Por otro lado, el modelo de Schumacher cumple con la mayoría de los criterios de información, pero se considera que el comportamiento de este modelo genérico no satisface plenamente la rigurosidad que se quiere en este estudio. Por tanto, se evaluaron modelos alométricos generados en este estudio (Tabla 5).

4.2.2 Modelos alométricos desarrollados en este estudio

Debido a que ninguno de los modelos genéricos propuestos en este estudio y citados por Loetsch *et ál.* (1973) no cumplieron con la rigurosidad de los criterios utilizados para este estudio, especialmente el R^2 cuadrado ajustado y multicolinealidad, se desarrollaron 10 modelos nuevos (Tabla 6), en estos se incluyó el modelo que mejor se ajustara a los datos (modelo exacto teórico), desarrollado mediante la transformación de Box Cox (1964). Box y Cox (1964). Propusieron una familia de funciones de potencia para la variable de respuesta con el objetivo de garantizar el cumplimiento de los supuestos de un modelo lineal (normalidad, homocedasticidad, linealidad e independencia de errores); esta transformación reportó una lambda de 1,5 (Figura 14).

Como resultado de esta transformación el modelo para explicar de manera exacta cumpliendo con todos los principios de normalidad, identidad, e independencia sería como se expresa en la fórmula (8).

$$\text{Biomasa}^{1,5} = \text{Diam} + \text{altura} \quad (8)$$

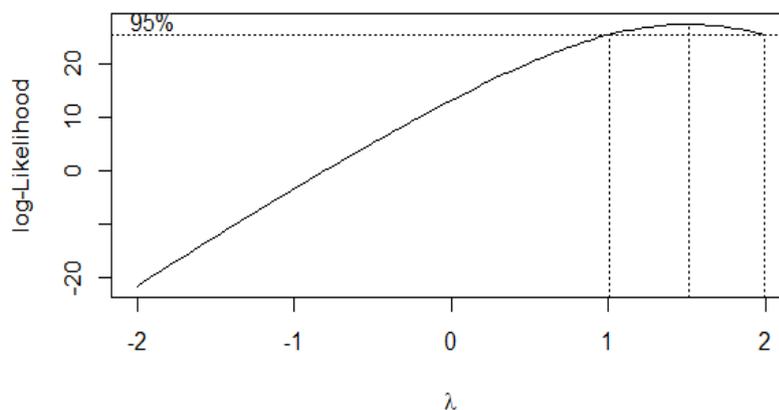


Figura 14. Valor exacto de lambda para la transformación exacta del modelo alométrico

Como resultado de esta evaluación, los modelos propuestos se ajustaron a los datos de manera diferencial (Tabla 5). Siendo los de mejor comportamiento los modelos 20, 16, 17, 11 y 10 en los criterios de información.

Tabla 5. Modelos para ecuaciones alométricas desarrolladas en este estudio

No.	Modelos propuestos
9	$bm = a + b \text{dap} + c \text{dap}^2 + d \text{dap} * h + e \text{dap} * h^2 + f h^2$
10	$Bm^{1.5} = a + dbh + b ht$
11	$bm = a + b \ln \text{dap} + c (\ln \text{dap})^2 + \text{dap} \ln h + e (\ln h)^2$
12	$bm = a + b \text{dap}$
14	$bm = a + b * \text{dap}^2 * h$
16	$bm = a + b \ln \text{dap} + c (\ln \text{dap})^2$
17	$bm = a + b \ln \text{dap} + c (\ln \text{dap})^2 + d \ln h$
19	$\text{Raíz}(bm) = a + b * dbh + c * h^2$
20	$bm = \exp(a + b \ln(dbh))$

bm = biomasa, dap= diámetro a la altura del pecho (1.30 m), h= altura total (m), a, b, c, d, e = coeficientes de regresión, log = logaritmo natural ln= logaritmo base e= 2.718282

Fuente: Este estudio

4.2.3 Modelos alométricos con los mejores ajustes para *G. arborea*

Tomando como referencia los resultados obtenidos en la aplicación de los modelos genéricos y los nuevos propuestos en este estudio y teniendo en cuenta su calificación en los criterios de información: inflación de la varianza, el R cuadrado ajustado, AIC, BIC, PRESS y el índice de Furnival, se seleccionaron los cinco modelos con mejor ajuste de cada grupo para hacer las pruebas de validación de cada uno de estos con la base de datos original.

Tabla 6. Desempeño de los diferentes modelos alométricos en los criterios de información evaluados.

Modelo No.	Criterios de información														Lugar	
	VI	CAL	R ²	CAL	AIC	CAL	BIC	CAL	PRESS	CAL	ECMP	CAL	IF	CAL		Total
20	1	1	0,8558	3	-5,0169	5	0,2663	4	121072,3	4	0,08	1	0,2137	1	19	1
16	2599,2	10	0,8945	2	-15,32	2	-8,994	2	12.892	2	0,08	1	0,1828	1	20	2
17	9424,02	10	0,8915	2	-13,45	3	-5,53	3	13.944	3	0,08	1	0,1853	1	23	3
11	10501,2	10	0,9521	1	-41,99	1	-32,49	1	0,5937	1	28,04	4	21232	10	28	4
10	6,73	1	0,9744	1	116	6	118	5	1010421	7	751,44	7	6,63	1	28	5
19	5,4	1	0,8606	3	393,49	7	399,83	6	121072,3	5	13,58	2	60,38	10	34	6
9	8431628	10	0,9912	1	798,72	8	811,39	7	99355001	9	23,36	3	14190	10	48	7
14	8300,28	10	0,9334	1	870,11	10	879,61	9	637144	6	36,11	5	39110	10	51	8
12	4247,9	10	0,9354	1	869,04	9	878,5	8	6109715	8	38,5	6	38530	10	52	9

ECMP= Error cuadrático medio de predicción; R² Ajust= R cuadrado ajustado; VI= Inflación de la varianza; AIC= Criterio de información de Akaike, BIC= Criterio de información bayesiano, PRESS= Suma de cuadrados de la predicción; IF= índice de Furnival

4.2.4 Validación de los modelos preseleccionados

En la evaluación del desempeño de cada modelo se establecieron los errores medios con los que se calificó la eficiencia del modelo para realizar las predicciones de contenido de C de la *G. arbórea*. Los modelos que presentaron los errores más bajos en las predicciones del contenido de C fueron seleccionados (Tabla 7).

Tabla 7. Error promedio en las predicciones de los modelos comparados en la prueba de validación

No.	Modelo	IV	R ² adj.	Error (%)
1	Meyer	1857150,52	0,99	4,62
2	Stoate	4247,99	0,98	3,68
3	Hohenadl	116,84	0,90	1,68
5	Schumacher and Hall	5,09	0,97	4,93
6	Husch	1	0,80	6,08
11	Este estudio 1	10501,2	0,98	4,75
10	Este estudio 2	6,73	0,97	4,88
16	Este estudio 3	2599,2	0,80	6,29
17	Este estudio 4	9424,02	0,97	5,04
20	Este estudio 5	1	0,75	7,53

Fuente: Este estudio IV= Inflación de la varianza; R² Ajust= R cuadrado ajustado

Los modelos analizados presentaron un buen ajuste en cuanto a la predicción de los valores reales con errores de menos de 7,53% (Tabla 7). El 30% de estos modelos no superaron el umbral del coeficiente de determinación ajustado superior al 90% (modelos 6, 16 y 20), además, el 70% no superó la prueba de multicolinealidad (IV), que como se explicó anteriormente es determinante para evitar redundancia en el uso de la información de la base de datos. Como resultado de la validación, dos modelos alométricos cumplieron con todos los criterios de información, la inflación de la varianza y el menor error promedio en las predicciones (Modelos 5 y 10), los coeficientes de estos modelos se describen en la (Tabla 8).

Tabla 8. Modelos alométricos seleccionados para realizar las estimaciones de biomasa de *G. arborea*

No	Ecuación ¹	α^2	B	γ	R ² adj ³ .	Error (%)
10	Este estudio	-2505176,2	-2634,1	139855	0,97	4,88
12	Schumacher & Hall (1993)	-7862947	-320116	3123200	0,98	4,93

¹ 31 árboles para el entrenamiento del modelo y 1 árbol sacado al azar para el evaluar la precisión del modelo repetido en 8 árboles diferentes por cada modelo. ² α , β y γ son coeficientes de regresión, R²adj= Coeficiente de determinación ajustado.

Los modelos finales para la predicción de la biomasa en *Gmelina arborea* se describen en las fórmulas 7 y 8

$$\text{Biomasa}^{1,5} = -2505176.2 + -2634.1 * \log(\text{dap}) + 139855 * \log(\text{altura}) \quad (7)$$

$$\text{Biomasa} = -7862947 + -320116 * \text{dap} + 3123200 * \text{altura} \quad (8)$$

Los modelos seleccionados se basan en la relación que hay entre la biomasa de *G. arborea*, su altura y su diámetro. Estos modelos pueden ser usados para hacer predicciones bajo las mismas condiciones ambientales, rango de diámetros y de alturas. Al respecto, Ballesteros *et al.* (2016) recomiendan que antes de usar cualquier modelo alométrico hay que cerciorarse de que las características del árbol cuyo volumen o biomasa queremos predecir estén dentro del rango de validez del modelo. Picard *et al.* (2012) por su parte informan que si un modelo de volumen o de biomasa fue ajustado para árboles de diámetro comprendido entre dos valores (mínimo y máximo), en principio no es posible usar ese modelo para predecir el volumen o la biomasa de un árbol de diámetro inferior al diámetro mínimo o superior al diámetro máximo.

El modelo 3 se basa en la biomasa elevada a la potencia de 1,5 a pesar de que el modelo es un poco difícil para aplicar, la familia Box Cox genera un modelo exacto que como se puede observar cumple con todos los criterios de información y validación.

4.3 Productividad del cacao

En el Análisis de Varianza se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P > 0,0001$) entre los tratamientos analizados (Anexo 9). Al comparar los tratamientos mejorados entre ellos, los tratamientos 2, 3, 4, 5 y 6 presentaron los mayores rendimientos (Figura 15). El Tratamiento 1, a pesar de su alta densidad de siembra ($1111 \text{ árboles ha}^{-1}$) presentó los rendimientos más bajos (Anexo 10). Cuando se compararon los tratamientos mejorados y la finca tradicional (Tratamiento 7), los tratamientos mejorados se diferenciaron del Tratamiento 7. Estos resultados indican que la densidad de siembra de cacao de $1111 \text{ árboles ha}^{-1}$, en sistema agroforestal bajo el manejo tradicional no es adecuada para el municipio de Tumaco, debido a las labores culturales y manejo fitosanitario que el cacao demanda. No obstante, Montoya *et al.* (2015), indica que bajo esta densidad de árboles de cacao y la aplicación de buenas las labores de manejo se pueden superar los 1000 kg.ha^{-1} en el municipio de Tumaco.

En la finca tradicional (Tratamiento 7) se presentaron los más bajos rendimientos del cacao ($310,67 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$), estos valores bajos son ratificados por Preciado *et al.* (2011) y Montoya *et al.* (2015). Estos resultados son un indicador de que las fincas tradicionales productoras de cacao no son rentables si su único objetivo es la producción de cacao. Ahora, si se evalúa como sistema incluyendo toda la biodiversidad de plantas, los resultados pueden ser diferentes. En ese sentido, Preciado *et al.* (2011) indican que algunos miembros de la comunidad manifiestan que la tendencia a aumentar las densidades de siembra del cacao se distancia de la visión de algunos pobladores de mantener bajas densidades ($400 \text{ árboles ha}^{-1}$)

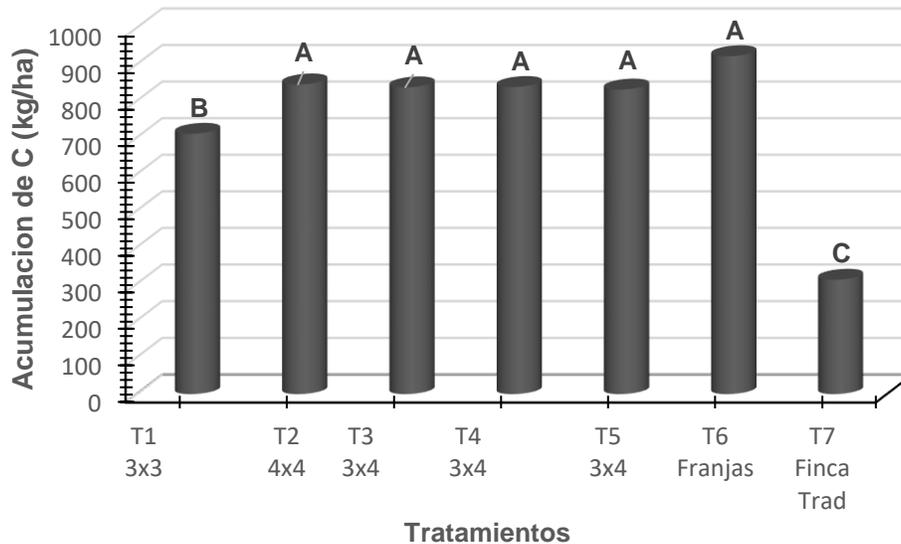


Figura 15. Producción del cacao en los diferentes tratamientos del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.

Espinoza y Ríos (2016) cuando analizaron el sistema tradicional de producción y lo compararon con los sistemas comerciales de producción de cacao en la zona encontraron que en el sistema tradicional la inversión en energía es menor que la producida, es decir, que por cada 1 megajoule invertido se producen 23 megajoules (relación 1:23). Para la inversión de jornales $\text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, en este sistema solo se emplean 13. El balance energético es altamente eficiente. Mientras que, en el sistema comercial, la inversión en energía es proporcionalmente similar a la producida, es decir, que por cada 1 megajoule invertido se producen 1,3 megajoules (relación 1:1). El otro elemento de análisis es la inversión en mano de obra que para este sistema es de 214 jornales $\text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, es decir, se requieren 201 jornales más que en el sistema tradicional (Espinoza y Ríos, 2016). Mostrando que el balance energético es deficiente.

Al Analizar la productividad mensual en cada uno de los tratamientos (Figura 16), se puede observar la misma tendencia, con la finca tradicional reportando los valores más bajos. No obstante, en la época seca que se presentó en el municipio entre los meses de julio a octubre, hubo una baja en la producción en todos los tratamientos, pero con un diferenciamiento entre ellos, lo que nos sugiere que el sombreado produjo el efecto diferencial en estos.

Según Farfán (2014), para un buen desarrollo y producción del cacao es deseable que los árboles acompañantes provean un nivel promedio de sombra por debajo del 50 %, lo más recomendado es del 30%. La parcela debe tener poca sombra durante la floración principal del cacao y durante los meses de elevada nubosidad y elevada humedad.

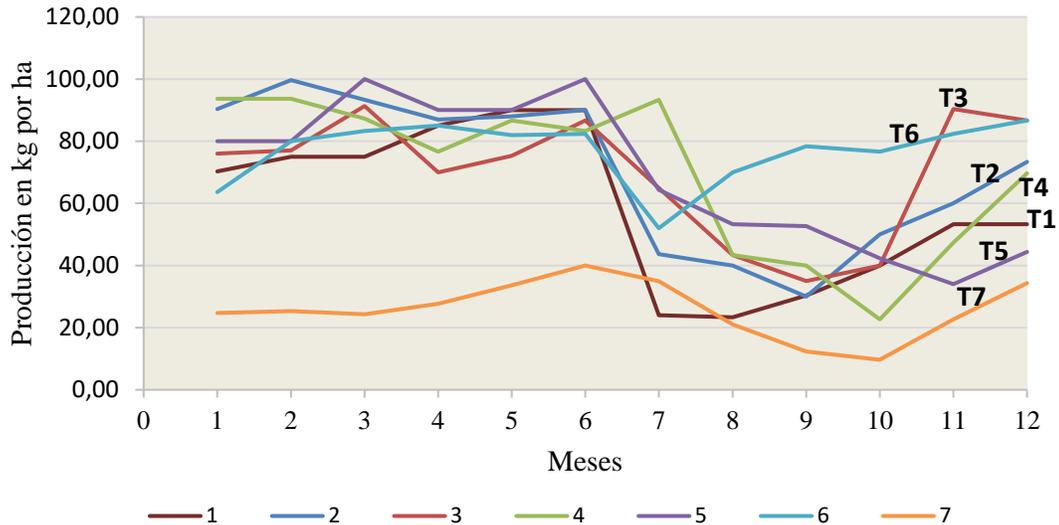


Figura 16. Producción mensual de cacao en cada uno de los tratamientos del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles - Tumaco, Nariño.

En este sentido algunos autores indican que una alta densidad por área de plantas no tendrá un efecto inicial sobre los individuos (Arcila, 2007). A medida que las plantas se desarrollan se intensifica la competencia entre las raíces y las copas, por espacio, nutrientes, agua y luz.

4.4 Efecto del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* sobre algunas características físicas y químicas de los suelos

4.4.1 Efecto en la materia orgánica

Se observó que hubo un incremento significativo (17% aprox.) de la cantidad de materia orgánica en dos de los bloques estudiados (Bloque 1 y 2), pero en el bloque 3 se observa un decremento del 30% (Figura 17) (Anexo 11). Tomando en cuenta estos valores obtenidos en los sitios estudiados puede inferirse que la materia orgánica si bien no supone una fuente

única e inmediata de nutrientes, es de suma importancia para una buena conformación del suelo bajo las condiciones de Tumaco. El decremento en la cantidad de materia orgánica en el bloque 2 sugiere que pudo haber un error de muestreo en la matriz para la toma de la muestra de suelo, ya que en la observación visual se observó presencia abundante de hojarasca en toda la parcela. Lo que ratifica lo afirmado por García (2013) cuando indica que la toma de las muestras es el paso del proceso que generalmente presenta más errores y llevan a un mal diagnóstico de la fertilidad del suelo.

Murray *et al.* (2011) señalan que la estructura, se ve favorecida en la medida que los sistemas agroforestales tienen aportes anuales de hojarasca, exudados y biomasa radicular para modificar algunas propiedades, físicas, químicas y biológicas del suelo, mediante un incremento de la materia orgánica en la superficie y en el subsuelo.

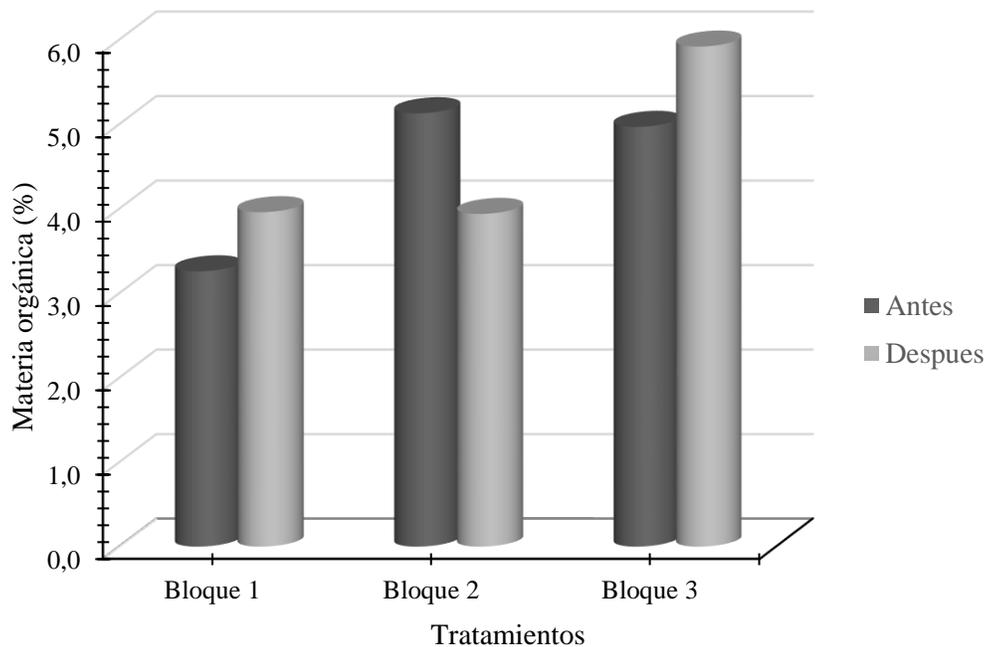


Figura 17. Evaluación del efecto del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la materia orgánica en los suelos de estudio de la vereda San Luis Robes, Tumaco, Nariño.

4.4.2 Efecto en la densidad aparente

Se presentó una reducción promedio de la densidad aparente en un 23% en los tres bloques estudiados, pudiéndose considerar que este sistema produce un efecto positivo en la densidad aparente en estos suelos clasificados como arcillosos (Anexo 11). Estos valores representan una mejora en la estructura del suelo sobre los primeros 20 cm; lo que concuerda con lo reportado por Murray *et al.* (2011) sobre el efecto de la materia orgánica sobre las características físicas del suelo.

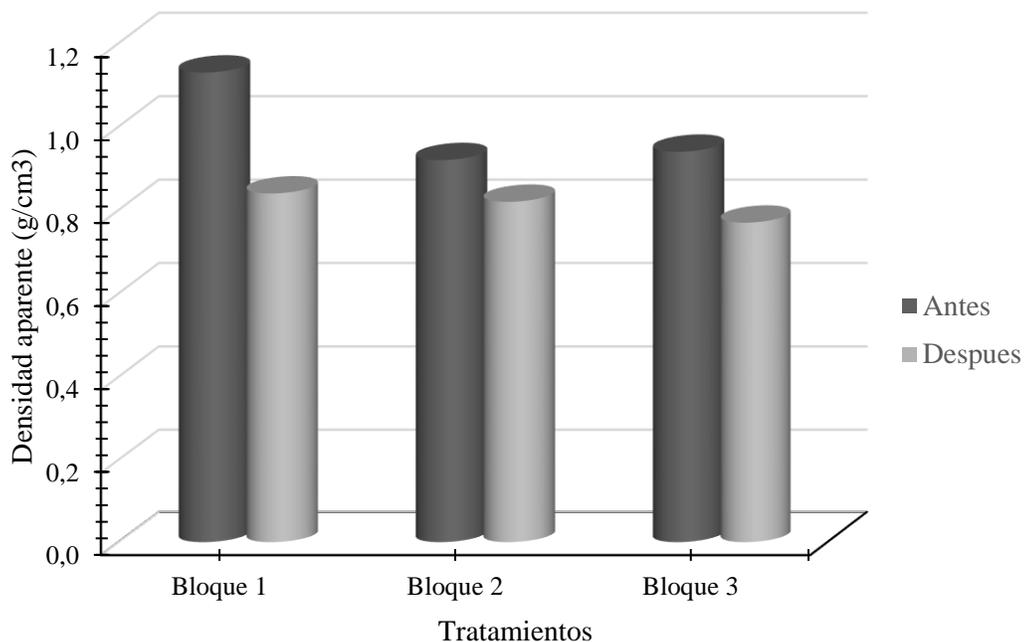


Figura 18. Evaluación del efecto del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la densidad aparente en los suelos de estudio de la vereda San Luis Robes, Tumaco, Nariño.

4.5 Análisis económico y financiero

En el análisis económico se muestra que todos los tratamientos analizados presentaron valores positivos en los diferentes indicadores analizados. Los tratamientos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 presentaron los mayores valores del VAN (1.737,024, 1.262,004, 1.308,798, 1.302,763, 1.287,711 y 1.446,457 pesos) (Tabla 9). Cuando se comparan estos seis tratamientos mejorados con la finca tradicional (Tratamiento 7) se detecta bajos valores en estos índices

(VAN 651.650 pesos, TIR 13 % y una RB/C de 1,020). Si comparamos todos los tratamientos mejorados encontramos que el tratamiento 6 ofrece la mejor rentabilidad con una VAN de 1.446,45 pesos, una TIR de 42% y una RB/C de 1,67, esto debido a que las utilidades netas anuales que ofrece este tratamiento. El tratamiento de menor rendimiento fue el tratamiento 2, con una VAN de \$1.262 pesos, una TIR de 25% y una RB/C de 1,16. El análisis de estos indicadores nos muestra que los rendimientos de cada uno de los tratamientos están ligados a los gastos de inversión y de sostenimiento del SAF.

Los resultados de la finca tradicional coinciden con lo reportado por Yalta, (2003), quien indica que los SAFs con pocas especies forestales y escasas inversiones generan VAN con valores bajos. De igual manera, estos bajos desempeños de la finca tradicional fueron reportados también por Preciado *et al.* (2011) y Montoya *et al.* (2015)

Tabla 9. Criterios económicos y financieros para determinar la rentabilidad del sistema agroforestal la vereda san Luis Robles – Tumaco, Nariño. *T. cacao* y *G. arborea* en Tumaco, Nariño.

Tratamiento	VAN	TIR %	RB/C
1	1.737,024	26	1,14
2	1.262,004	25	1,16
3	1.308,798	30	1,22
4	1.302,763	29	1,20
5	1.287,711	29	1,18
6	1.446,457	42	1,67
7	651,650	13	1,020

Este análisis económico nos refleja las altas posibilidades que se tiene con la cacaocultura en Tumaco, pudiéndose pasar de 360 kg.ha⁻¹.año⁻¹ a 980 kg.ha⁻¹.año⁻¹ lo que mejoraría sustancialmente los ingresos de los cacaocultores del municipio de Tumaco. Cuando le agregamos el valor de la madera que para este caso fue la venta de árboles en pie los ingresos se incrementan sustancialmente dado el valor de la madera.

El consolidado de esta investigación deja que:

1. En cuanto a la eficiencia en la captura de carbono en la parte aérea bajo las condiciones de la vereda San Luis Robles, la *G. arbórea* arrojó los mayores rendimientos en los tratamientos 2, 1 y 6 con 48,20 t.C.ha⁻¹, 44,24 t. C.ha⁻¹ y 40,16 t.C.ha⁻¹. Para el caso del cacao encontramos que el tratamiento 5 y tratamiento 2 presentaron las mayores acumulaciones con 40,6 y 40,4 t.C.ha⁻¹ respectivamente. El sistema que reportó la más alta acumulación fue el tratamiento 2 con 88,58 t.C.ha⁻¹(con una tasa de fijación anual promedio de 9,22 t.C.ha⁻¹.año⁻¹). Posiblemente esta alta acumulación de C se debe a la densidad de siembra empleada en este tratamiento. Por otro lado, la acumulación de biomasa aérea y raíces presento valores que van desde 61,1 (Tratamiento 4) hasta 108,9 t. ha⁻¹.año⁻¹ (Tratamiento 2). Estos valores relativamente caen dentro de la escala propuesta por Somarriba *et al* (2008) de 80 y 120 t.C.ha⁻¹, con una pequeña desviación en el límite inferior presentada por los tratamientos 3 y 4.

Por otro lado, el mayor aporte de esta investigación son los 2 modelos que quedan generados para las condiciones de San Luis Robles para usarse en arboles con diámetros que estén entre 30,24 y 50,11 cm de DAP, estos resultados para la agroforestería del municipio y el departamento de Nariño son valiosos y servirán de punto de partida para futuras investigaciones en este campo.

2. El análisis de productividad arrojó que todos los tratamientos tuvieron rendimientos positivos haciéndolos económicamente rentables. Para el caso del tratamiento 7 (finca tradicional) el cual tuvo un rendimiento de (311 kg.ha⁻¹.año⁻¹) demostró que a pesar de las bajas inversiones realizadas por los agricultores ellos perciben ingresos. Por otro lado, el tratamiento mejorado numero 6 presento el mejor rendimiento (911 kg.ha⁻¹.año⁻¹) estando aun por debajo del ideal esperado para las condiciones de Tumaco y los clones de alta producción utilizados (1500 kg.ha⁻¹.año⁻¹).

5. CONCLUSIONES

1. La mayor captura de carbono se obtuvo en el sistema agroforestal cacao y Gmelina con densidades de siembra de 625 árboles de cacao y 625 árboles de Gmelina por hectárea. La menor captura de carbono se presentó en el sistema que tenía 833 árboles de cacao y 139 árboles de Gmelina por hectárea.
2. La mayor productividad se presentó en el sistema agroforestal cacao y Gmelina diseñado en fajas con una densidad de siembra de 416 árboles de cacao y 1000 árboles de Gmelina por hectárea, la menor productividad se presentó en la finca tradicional con 269 árboles por hectárea. La mejor rentabilidad se obtuvo con el sistema agroforestal cacao y Gmelina sembrado en fajas.

6. RECOMENDACIONES

Promover e incentivar el desarrollo de investigaciones que permitan identificar el potencial de fijación y acumulación de Carbono en los sistemas agroforestales más importantes del municipio de Tumaco y de esta manera generar bases para futuras negociaciones por pago de servicios ambientales.

Continuar con la investigación en árboles de Gmelina con diferentes edades para estimar el turno más adecuado para producción de madera y acumulación de carbono.

Al realizar estudios como este en el cual sea necesario utilizar métodos destructivos de las especies, se deben hacer en sincronía con la renovación de los cacaotales.

Realizar estudios sobre el impacto de esta especie en los ecosistemas de Tumaco, ya que en esta investigación se evidencia que se comporta como una especie invasora.

La especie *G. arborea* es promisoría para Tumaco, por lo tanto, se debe propender por establecer una empresa maderera comunitaria que genere valor agregado y se convierta en fuente de ingresos alternativos al cacao para las comunidades rurales.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUDELO, B. D. M. 2016. Crecimiento y productividad de sistemas agroforestales (SAF) con cacao en estados tempranos de desarrollo en el bosque seco tropical (bs -T) del departamento de Antioquia. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 131 p.

AGUIRRE, Z. Y LEÓN, N. 2010. Adaptación de especies nativas maderables y no maderables con potencial de aprovechamiento en el sur de la Amazonía ecuatoriana. CEDAMAZ. 1(1): pp 51-56.

AIDE, P. V; NUBIA, M. G; FAVIO, A, H y TATIANA, C.C. 2013. Características de calidad del cacao de Colombia, catálogo de 26 cultivares. Universidad industrial de Santander y Federación Nacional de Cacaoteros. Bucaramanga. 56 p.

ALDER, D. 1980. Estimation des volumes et accroissement des peuplements forestiers – Vol. Étude et prévision de la production. Études FAO: forêts No. 22/2. Rome, FAO.194 p.

ALTIERI, M., Y NICHOLLS, C., 2010. Diseños agroecológicos para incrementar la biodiversidad de entomofauna benéfica en agroecosistemas – Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología (SOCLA). 83 p.

ALVARADO, J., ANDRADE, H., SEGURA, M. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. Colombia Forestal, 16 (1): pp 21-31.

ÁLVAREZ, E; SALDARRIAGA, J.G; DUQUE, A.J; CABRERA, K.R; YEPES, A.P; NAVARRETE, D.A, PHILLIPS, J.F. 2011 Selección y validación de modelos para la estimación de la biomasa aérea en los bosques naturales de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 26 p.

ÁLVAREZ, G. (2008). Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia. Biomasa

forestal. (Tesis de Maestría). Escuela de posgrado: Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza, Turrialba. 89 p.

ANDRADE, H.J.; FIGUEROA, J.; SILVA, D. 2013. Almacenamiento de carbono en cacaotales (*Theobroma cacao*) en Armero-Guayabal (Tolima-Colombia). *Scientia Agroalimentaria*. 1: pp 6-10.

ANDRADE, H.J.; SEGURA, M.; CANAL, D.S.; GÓMEZ, M.; MARÍN, M.; SIERRA, E.; GUEPENDO, I.; ALVARADO, J.; FERIA, M. 2013. Estrategias de adaptación al cambio climático en sistemas de producción agrícola y forestal en el departamento del Tolima. Ibagué. Colombia. Sello editorial Universidad del Tolima. 99 p.

ANDRADE, H.J.; SEGURA, MA.; CANAL, D.S.; FERIA, M.; ALVARADO, J.J.; MARÍN, L.; PACHÓN, D.; GÓMEZ, M. 2014. The carbon footprint of coffee productive chains in Tolima, Colombia. En: Oelbermann, M (ed.). *Sustainable agroecosystems in climate change mitigation*. Ed. Wageningen Academic Publishers. The Netherlands. pp.53-66.

ANDRADE, H; SEGURA, M; SOMARRIBA, E; VILLALOBOS, M. 2008. Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*. 46: pp 45-50.

ANGUIANO, J.M; AGUIRRE, J. Y PALMA, J. M. 2013. *Cuningham* y *Pennisetum purpureum*. Cuba CT – 115. *Avances en investigación agropecuaria* 149 Aia. 17(1): pp 149-160.

ARANZAZU, F., MARTINEZ, N., RINCON, D., y PALENCIA, G. (2009). Materiales de cacao en Colombia, su compatibilidad sexual y modelos de siembra. *Unión temporal cacao de Colombia uno*. Fedecacao – Corpoica. Bucaramanga. 27 p.

ARCILA P., J. 2007. Crecimiento y desarrollo de la planta de café. p. 21-60. En: *Sistemas de producción de café en Colombia*. Chinchiná: CENICAFÉ: FNC, 309 p.

ARIAS A, D.; ARGUEDAS, M. 2004. Manejo de plantaciones. In ROJAS R., F. et al. 2004. Manual para productores de *Gmelina arborea* en Costa Rica. Cartago, Costa Rica, Instituto Tecnológico. pp 163-202.

BALLESTEROS, P. W., BRANDLE, J.R., DOMKE, G.M. SCHOENEBERGER, M and BLANKENSHIP, E. 2016. Estimating carbon storage in windbreak trees on U.S. agricultural lands. *Agroforest Syst* (2016) 90: 889. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9896-0>

BALLESTEROS, P. W. 2015. Carbon storage potential of windbreaks on agricultural lands of the continental united states. Nebraska, USA. Doctoral Thesis, Natural Resources School. 230 p.

BARRANTES, A. Y UGALDE, S. (2015). Usos y aportes de la madera. Estadísticas 2014. ONF (Oficina Nacional Forestal). San José, Costa Rica. 40 p.

BOHRE, P., CHAUBEY, O.P & SINGHAL P.K. 2013. Biomass Accumulation and Carbon Sequestration in *Tectona grandis* Linn. f. and *Gmelina arborea* Roxb. *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology*, 5(3): pp 153-174.

BORRERO, B. J. C. 2012. Biomasa aérea y contenido de carbono en el campus de la pontificia universidad javeriana de Bogotá. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad De Estudios Ambientales y Rurales. [verificado: 18 de mayo 2018]. 63 p.

BURBANO O, H. 2018. El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Rev.Cienc. Agr.* 35(1): pp 82-96.

BREUGEL, M; RANSIJN, J; CRAVEN, D; BONGERS, F Y HALL, J. 2011. Estimating carbon stock in secondary forests: Decisions and uncertainties associated with allometric biomass models. *Forest Ecology and Management* 262: pp 1648-1657.

CERDA, R. (2011). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao de Centroamérica. IV Foro Nacional de Cacao en Panamá, 33 p

COTTA, MK; GONÇALVES, LA; VALVERDE, SR; NOGUEIRA DE PAIVA, H; VIRGENS FILHO, AC; LOPES, M. 2006. Análise econômica do consórcio seringueira-cacau para geração de certificados de emissões reduzidas. *Revista Árvore* 30(6): pp 969-979.

CRAINE, J. and DYBZINSKI, R. 2013. Mechanisms of plant competition for nutrients, water and light. *Functional Ecology*, 27: pp 833–840.

CUBERO, J., Y ROJAS, S. (1999). Fijación de carbono en plantaciones de melina (*Gmelina arborea* Roxb.), teca (*Tectona grandis* L.f.) y pochote (*Bombacopsis quinata* Jacq.) en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. (Tesis de pregrado). Facultad de ciencias de la tierra y el mar, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. 87 p.

CUENCA, R. 2009. Evaluación de la productividad en volumen y el potencial de fijación de carbono en plantaciones mixtas en la zona Caribe de Costa Rica. Tesis para optar al grado de Magister Scientiae. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 189 p.

DOCAMPO, R. 2010. La importancia de la materia orgánica del suelo y su manejo en producción frutícola. Serie Actividades de Difusión No. 687. Las Brujas: INIA- Estación Experimental “Wilso Ferrerira Aldunate” pp 81 -88.

DOMÍNGUEZ, C. G.; AGUIRRE, C. O.; JIMÉNEZ, P. J.; RODRÍGUEZ, L. R.; DÍAZ, B. J. 2009. Biomasa Aérea y Factores de Expansión de Especies Arbóreas en Bosques del Sur de Nuevo León. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 59-64.

ESCOLASTICO, L. C; LERMA, R. J. A.; LLORENS, L. J y SANCHEZ, L. L. M. 2014. Medio ambiente y espacios verdes. UNED. España. 392 p.

ESPINOZA, Y. 2010. Efecto de la labranza sobre la materia orgánica y tamaño de agregados en un suelo cultivado con maíz en condiciones tropicales. *Bioagro* 22: pp 177-184.

ESPINOSA, A. J.A Y RIOS, O. L.A. 2016. Caracterización de sistemas agroecológicos para el establecimiento de cacao (*Theobroma cacao* L.), en comunidades afrodescendientes del Pacífico Colombiano (Tumaco- Nariño, Colombia). *Acta Agron*, 65 (3): pp 211-217.

FAO, 2009. Guía para la descripción de suelos. Cuarta edición. Traducido y adaptado al castellano por Ronald Vargas Rojas (Proyecto FAOSWALIM, Nairobi, Kenya-Universidad Mayor de San Simón, Bolivia).111 p.

FAO. 2016. Las legumbres y el cambio climático. En línea: <http://www.fao.org/3/a-i5426s.pdf> (verificado noviembre 5 de 2019).

FAO. 2018. Libro de consulta sobre la agricultura climáticamente inteligente: Resumen de la segunda edición, Roma, FAO, 60 p.

FARFÁN V., F. 2014. Agroforestería y Sistemas Agroforestales con Café. Manizales, Caldas (Colombia), 342 p.

FITZPATRICK, E. A. 2011. Introducción a la ciencia de los suelos. Editorial Trillas. México,D.F. 288 p.

FLORES, O. A.J y FLORES, O. R.O. 2013. estudio del crecimiento de “*Gmelina arborea*” en los consejos comunitarios de Quiparadó y Domingodó (Chocó – Colombia). Universidad de Manizales. 122 p.

FONSECA, W., REY-BENAYAS, J. M. Y ALICE F. E. 2011. Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 262 (8): pp 1400 -1408

GALINDO G.A., CABRERA E., VARGAS D.M., PABÓN, H.R., CABRERA, K.R., YEPES, A.P., PHILLIPS, J.F., NAVARRETE, D.A., DUQUE, A.J., GARCÍA, M.C., ORDOÑEZ, M.F. 2011. Estimación de la Biomasa Aérea usando Datos de Campo e información De Sensores Remotos. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM. Bogotá D.C., Colombia. 52 p.

GAMA-RODRIGUES, F; NAIR, PKR, NAIR, DV; BALIGAR, CV; GAMA-RODRIGUES, A; MACHADO, R. 2010. Carbon storage in soil size fractions under two cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Environmental Management* 45: pp 274-283.

GARCÍA, A. C.; BARRERA, X.; GOMEZ, R. y R. SUAREZ C. 2015. El ABC de los compromisos de Colombia para la COP21. 2 ed. WWF-Colombia. 31 p.

GARCIA, L. (2013). Guía práctica para la toma de muestras de suelo en cafetales. Universidad Nacional Agraria. Managua, Nicaragua. 6 p. Gelderman, R.H., W.C. Dahnke and L. Swenson. 1988. Correlation of several soil N indices for wheat. *Commun. Soil Sci. Plan Anal.* 19(6): 755-772.

GAYOSO, J.; GUERRA, J. 2013. Metodología para la generación de funciones alométricas. Convenio Asesoría Técnica: Generación y complemento de funciones alométricas para la determinación de existencias de carbono en especies forestales nativas. Presentación realizada en el Taller “Estrategia de Bosques y Cambio Climático: disponibilidad y generación de funciones alométricas para especies nativas de Chile”. Organizado por la Corporación Nacional Forestal y la Universidad Mayor. Santiago, Chile. 29 p.

HENRY M., A BOMBELLI., C TROTTA., A ALESSANDRINI., L BIRIGAZZI., G SOLA., G VIEILLEDENT., P SANTENOISE., F LONGUETAUD Y R VALENTINI. 2013. GlobAllomeTree: international platform for tree allometric equations to support volume, biomass, and carbon assessment, *Forest-Biogeosciences & Forestry* 6 (6): 6 p.

HOLDRIDGE, L. 1982. *Ecología basada en zonas de vida*. San José: IICA; 216 p.

HONORIO, C. E. N. y BAKER, T.R. 2010. Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana / Universidad de Leeds. Lima, 54 p.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). 2017. Cartas climatológicas del aeropuerto la Florida, Tumaco. Nariño. En www.ideam.gov.co (Verificado marzo de 2019).

IGLESIAS, M.R.; BARCHUK, A.H. 2010. Estimación de la biomasa aérea de seis leguminosas leñosas del Chaco Árido (Argentina). *Ecología Austral.* 20(1): pp 71- 79.

INSTITUTO NACIONAL DE BOSQUES (INAB) 2014. Dinámica de crecimiento y productividad de 28 especies forestales en plantaciones en Guatemala, Serie Técnica No. DT-002(2015). Guatemala, 212 p.

IPCC, 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 40 P.

JIMÉNEZ, P. L. P. 2016. El cultivo de la Melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en el trópico. Universidad de las fuerzas armadas ESPE. Sangolquí, Ecuador. 125 p.

KELLER, T y HAKANSSON, I. 2010. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma* 154: pp 398-406.

LOETSCH, F., ZOHRER, F. AND HALLER, K.E. 1973. Forest inventory, BLV Verlagsgesellschaft. Munchen. 469 p.

LOZANO, G. J. 2014. Caracterización de las respuestas fisiológicas y bioquímicas en tres clones de cacao (*Theobroma cacao* L.) sometidos a diferentes niveles de déficit hídrico. Universidad nacional de Colombia. Bogotá. 166 p.

MALAGÓN, C.D. 2010. El ABC de los suelos; para no expertos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi Imprenta Nacional de Colombia. 130 pp.

MARIN Q., MARÍA DEL PILAR; ANDRADE, HERNÁN J. Y SANDOVAL, ANGÉLICA P. 2016. Fijación de carbono atmosférico en la biomasa total de sistemas de producción de cacao en el departamento del Tolima, Colombia. *rev.udcaactual.divulg.cient.* 9(2): pp 351-360.

MARTINEZ, H. H. A. 2015. Melina (*Gmelina arborea* Roxb.): condiciones para su cultivo “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono”. Fondo Nacional de Financiamiento Forestal. Moravia, Costa Rica, FONAFIFO (Fondo Nacional de Fomento Forestal). 39 p.

MILERA, M. 2013. Contribución de los sistemas silvopastoriles en la producción y el medio ambiente. Universidad de Colima, México. Avances en investigación agropecuaria, 17(3): pp 7-24.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL (MADR) 2011. Corporación Colombia. Boletín Cacao. SIPSA, 10 (7). pp 36 – 57.

MONTAGNINI, F; SOMARRIBA, E; MURGUEITIO, E; FASSOLA, H; EIBL, B. 2015. Sistemas Agroforestales. Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales. Serie técnica. Informe técnico 402. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Editorial CIPAV, Cali, Colombia. 454p.

MONTOYA, R. I. A; MONTOYA, R. L. A; LOWY, C. P. D. 2015. Oportunidades para la actividad cacaotera en el municipio de Tumaco, Nariño, Colombia. En: Entramado. Enero - junio, 2015. 11(1): pp 48-59.

MONSALVE, M. (2016). Así se mide el carbono de nuestros bosques. El Espectador. Recuperado de: <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/asi-se-mide-el-carbono-de-nuestros-bosques-articulo-614516> (verificado marzo de 2019).

MORA-DELGADO, J., HOLGUÍN, V.A. 2018. Aplicación de modelos matemáticos no lineales para la estimación de biomasa forrajera de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 21(1): pp 43-50.

MUÑOZ, F.; NEIRA, A.; CANCINO, J. 2010. Efecto del Raleo en la Densidad Básica de la Madera de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden. Revista Interciencia 35(8): pp 581-585.

MURILLO. R.; ALVARADO, A. 2012. NUTRICIÓN Y FERTILIZACIÓN DE *Gmelina* arbórea. In Alvarado, A.; Raigosa, J. 2012 (eds). Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas, Asociación Costarricense de la Ciencia de Suelo. pp. 385-298

MURRAY, N. R. M; BOJÓRQUEZ, S. J; HERNÁNDEZ, J. A; OROZCO, M. G.; GARCÍA, J. D.; GÓMEZ, A. R.; ONTIVEROS, G. H. Y AGUIRRE, O. J. (2011). Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México. *Revista Bio Ciencias*, 1(3-2): pp 27- 35

NÁVAR, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 257(2): pp 427–434.

OFICINA NACIONAL FORESTAL (ONF). 2013. Guía Técnica SAF para la implementación de Sistemas Agroforestales (SAF) con árboles forestales maderables. Costa Rica. 33 P.

ORDÓÑEZ, J. A. B. 2012. Carbono almacenado en los bosques de la Región Purépecha en Michoacán, México. Editorial Académica Española. México, D.F., México. 135 p.

ORTIZ, A; RIASCOS, L. y SOMARRIBA, E. (2008). Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y laurel (*Cordia alliodora*). *Agroforestería en las Américas (CATIE)*, 46: pp 26 – 29

PALOMEQUE E. 2009. Los Sistemas Agroforestales una alternativa del campo mexicano. Artículo científico. Huehuetán, Chiapas, México. 30 p.

PARDOS, J.A. 2010. Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el cambio climático. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). (INIA). Madrid, 253 p.

PARDOS, J.A. 2016. El carbono, los ecosistemas forestales y el cambio climático: un triángulo de relaciones mutuas (Bibliografía de un sexenio, 2009 -2014). SECF. Lourizan, Pontevedra (E). 460 p.

PATIÑO *et al.*, 2018. Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista de investigación agraria y ambiental*, 9 (2): 121 p.

PATIÑO, S., LLOYD, J., PAIVA, R., BAKER, T.R., QUESADA, C.A., MERCADO, L.M., SCHMERLER, L., SCHWARZ, M., SANTOS, A.J.B., AGUILAR, A., CZIMCZIK, C.I., GALLO, J., HORNA, V., HOYOS, E.J., JIMÉNEZ, E.M., PALOMINO, W., PEACOCK, J., PEÑA-CRUZ, A., SARMIENTO, C., SOTA, A., TURRIAGO, VILLANUEVA, B., VITZTHUM, P., ALVAREZ, E., ARROYO, L., BARALOTO, C., BONAL, D., CHAVE, J., COSTA, A.C.L., HERRERA, R., HIGUCHI, N., KILLEEN, T., LEAL, E., LUIZAO, F., MEIR, P., MONTEAGUDO, A., NEIL, D., NÚÑEZ-VARGAS, P., PEÑUELA, M.C., PITMAN, N., PRIANTE FILHO, N., PRIETO, A., PANFIL, S.N., RUDAS, A., SALOMAO, R., SILVA, N., SILVEIRA, M., SOARES DE ALMEIDA, S., TORRES-LEZAMA, A., VÁSQUEZ- MARTÍNEZ, R., VIEIRA, I., MALHI, Y. & PHILLIPS, O.L. 2009. Branch xylem density variations across the Amazon Basin. *Biogeosciences* 6: pp 545-568.

PEÑA M.A.; RAMIREZ S; PHILLIPS J.F; CABRERA E; CÓRDOBA N y CARREÑO L.M. 2014. Manual de campo para el monitoreo de carbono en bosques naturales. IDEAM. Bogotá D.C., Colombia. 64 p.

PÉREZ P, J GARDEY, A. 2014. Definición de parsimonia. Website: <https://definicion.de/parsimonia/> (verificado marzo de 2019)

PHILLIPS J.F., DUQUE A.J., YEPES A.P., CABRERA K.R., GARCÍA M.C., NAVARRETE D.A., ÁLVAREZ E., CÁRDENAS D. 2011. Estimación de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia. Estratificación, alometría y métodos analíticos. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales -IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 68 p.

PICARD N., SAINT-ANDRE L., HENRRY M. 2012. Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier, 223 p.

PINZON, J.; ROJAS, F. ROJAS, O. RAMIREZ, F. MORENO Y G. CASTRO. 2012. Guía técnica para el cultivo de cacao. 5ta edición. Federación Nacional de Cacaoteros. Bogotá. 192 pg.

POVEDA V., OROZCO L., MEDINA, C., CERDA, R. Y LÓPEZ, A. 2013. Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao en Waslala, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*. (49), 42-50.

PRECIADO, O., OCAMPO., C. I., BALLESTEROS, P., W. 2011. caracterización del sistema tradicional de producción de cacao (*Theobroma cacao* L.), en seis núcleos productivos del municipio de Tumaco, Nariño. *revista de ciencias agrícolas*, 23 (2): pp 58 – 69.

RIOFRÍO, J.; GRIJALVA, J.B. 2013. Modelos para estimar la biomasa de especies forestales en sistemas agroforestales de la Ecorregión andina del Ecuador. In *Congresos Forestales. Memorias VI congreso Forestal Español*. pp 2-13.

ROBINSON, D; TRINDER, C. y BROOKER, R. 2013. Introduction to the Special Feature on Mechanisms of Plant Competition. *Functional Ecology*, 27: pp 831–832.

RODRÍGUEZ, N. 2013. Guía para la cuantificación de la biomasa y el carbono forestal, generación de modelos y uso de herramientas para su estimación. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR Subdirección de Administración de los Recursos Naturales y Áreas Protegidas Bogotá D.C. Colombia. 56 p.

RODRÍGUEZ, F.; FERNÁNDEZ A.; LIZARRALDE, I.; S. CONDÉS. 2010. CriterionTM RD1000: Una oportunidad para calcular el volumen de árboles en pie. 5° Congreso Forestal Español. 11 p.

RUIZ, R Y PEINADO, G. 2013. Modelos para la estimación de carbono en la biomasa de los sistemas forestales. Instituto Universitario de Investigación y Gestión Forestal Sostenible. Palencia – España. 234 p.

RÜGNITZ, M. T.; CHACÓN, M. L.; PORRO, R. 2009. Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales -- 1. ed. -- Lima, Perú.: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consórcio Iniciativa Amazônica (IA). 79 p.

SEGURA, M; H ANDRADE, 2008. ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? How to develop biomass models of Woody perennials species. *Agroforestería en las Américas (CATIE)*. 46: pp 89-96.

SOMARRIBA, E., CERDA, R., OROZCO, L., CIFUENTES, M., DÁVILA, H., ESPIN, T., MAVISOYA, H., ÁVILA, G., ALVARADO, E., POVEDA, V., ASTORGA, C., SAY, E. Y DEHEUVELS, O. 2013. Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 173, pp 46–57.

SOMARRIBA, E; ANDRADE, HJ; SEGURA, M; VILLALOBOS, M. 2008. ¿Cómo fijar carbono atmosférico, certificarlo y venderlo para complementar los ingresos de productores indígenas de Costa Rica? *Agroforestería en las Américas*. 46: pp 81-88.

SOTO, Q. G. 2009. Contribución al conocimiento del paisaje de cacaotales, como hábitat para el mantenimiento de la diversidad de herpetofauna en Talamanca, Costa Rica (En línea). Tesis MSc. en Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 57 p. <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/8056> (Verificado 31 de marzo del 2019).

STEPHENSON, N.L., DAS, A.J., CONDIT, R., *et al.* 2014. Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size, *Nature* 507: pp 90-101.

TRUJILLO, N. E. 2013. Guía de reforestación. 3ª edición. Bogotá, 254 p

VEGA, Y. 2016. Análisis mensual de acumulación de biomasa y fijación de carbono en una plantación de *Gmelina arborea* Roxb. Los Chiles, Alajuela, Costa Rica. (Tesis de pregrado, Instituto tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal), 39 p.

VERCHOT, L.V., VAN NOORDWIJK, M., KANDJI, S., TOMICH, T., ONG, C., ALBRECHT, A., MACKENSEN, J., BANTILAN, C., ANUPAMA, K.V., PALM, C., 2007. Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Change* 12: pp 901–918.

VESPA, A. 2008. Relaciones hídricas e intercambio gaseoso en *Theobroma cacao* en dos tipos de suelos. Trabajo especial de grado. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 69 p.

YALTA, H. 2003. identificación y rentabilidad de sistemas agroforestales asociados al cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L) en Tingo Maria. Tesis Ing. Agrónomo. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo Maria, Perú. 101 p.

8. ANEXOS

Anexo 1. Rangos del diámetro a la altura del pecho (DAP) del *T. cacao* en la vereda san Luis robles – Tumaco, Nariño.

Trat	DAP										
1	7,9618	2	14,331	3	11,465	4	13,694	5	14,013	6	12,739
1	8,5987	2	16,561	3	12,102	4	12,42	5	11,783	6	13,694
1	10,191	2	15,287	3	13,057	4	10,51	5	15,924	6	14,968
1	12,42	2	15,924	3	13,057	4	15,287	5	13,694	6	14,331

Anexo 2. Rangos del diámetro a la altura del pecho (DAP) de la *G. arborea* en la vereda San Luis robles – Tumaco, Nariño.

Trat	DAP										
1	54,11	2	42,65	3	38,2	4	33,74	5	43,29	6	54,11
1	30,24	2	37,12	3	35,65	4	36,61	5	32,79	6	30,24
1	33,1	2	41,7	3	36,61	4	34,06	5	42,02	6	33,1
1	33,74	2	43,29	3	54,11	4	42,65	5	38,2	6	33,74
1	36,61	2	32,79	3	30,24	4	37,12	5	35,65	6	36,61
1	34,06	2	42,02	3	33,1	4	41,7	5	36,61	6	34,06

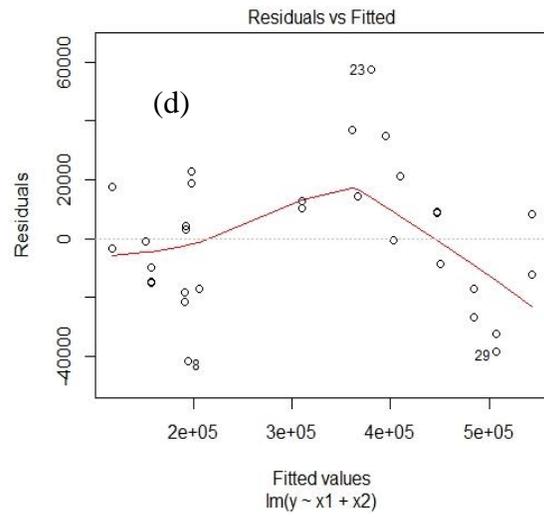
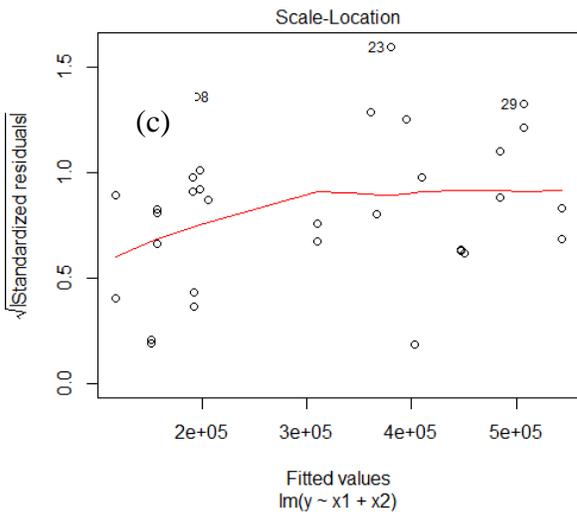
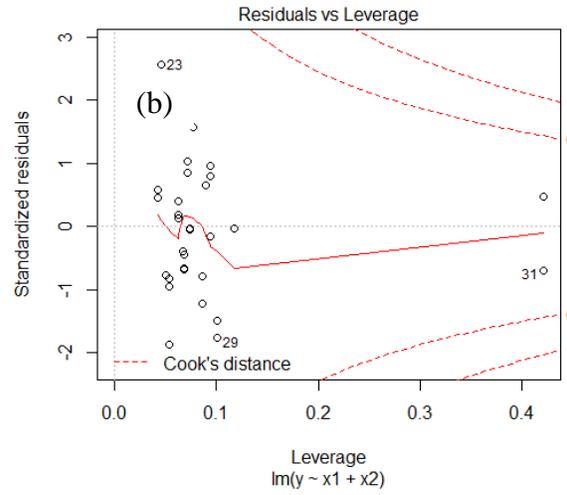
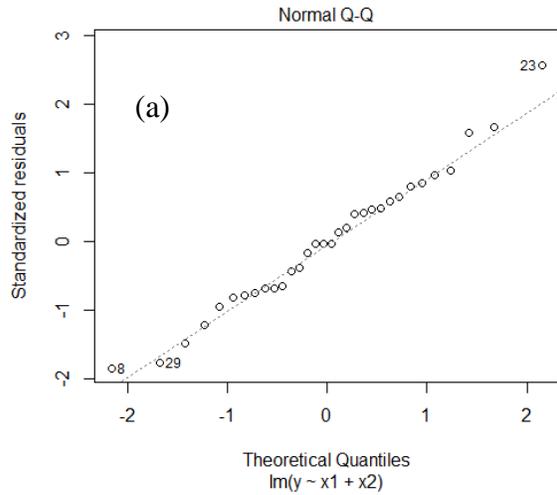
Anexo 3. Rangos de la altura (h) del *T. cacao* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.

Trat	ALT	Trat	ALT	Trat	ALT	Trat	ALT	Trat	ALT	Trat	ALT
1	4,65	2	4,95	3	4,9	4	4,9	5	4,9	6	4,8
1	4,65	2	5,05	3	4,9	4	4,9	5	4,85	6	4,88
1	4,8	2	5	3	4,91	4	4,8	5	5,2	6	4,93
1	4,91	2	5,05	3	4,86	4	5,1	5	4,86	6	4,9

Anexo 4. Rangos de la altura (h) de la *G. arborea* en la vereda san Luis Robles – Tumaco, Nariño.

Trat	ALT										
1	21	2	22,3	3	22,7	4	21,3	5	24,1	6	21
1	18	2	23,9	3	21,5	4	23,6	5	20,7	6	18
1	25	2	21	3	23	4	21,4	5	23,1	6	25
1	21,3	2	24,1	3	21	4	22,3	5	22,7	6	21,3
1	23,6	2	20,7	3	18	4	23,9	5	21,5	6	23,6
1	21,4	2	23,1	3	25	4	21	5	23	6	21,4

Anexo 5. Graficas de la comprobación de los supuestos estadísticos de normalidad (a), homocedasticidad (b), linealidad (c) e independencia (d) de los datos de biomasa y carbono utilizados.



Anexo 6. Análisis de varianza para la acumulación de biomasa en la *G. arborea* en el sistema agroforestal *T cacao* y *G arborea* en la vereda san Luis robles Tumaco, Nariño.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F	P
Modelo	7	770397175476	110056739354	70,69	<,0001
Tratamiento	5	767782014957	153556402991	98,64	<,0001
Bloque	2	2615160519,7	1307580259,9	0,84	0,4423

Anexo 7. Análisis de varianza para la acumulación de biomasa en el *T. cacao* en el sistema agroforestal *T cacao* y *G arborea* en la vereda san Luis robles Tumaco, Nariño.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F	P
Modelo	7	176526837967	25218119710	4,45	0,020
Tratamiento	5	148789209795	29757841959	5,25	0,0016
Bloque	2	27737628172	13868814086	2,45	0,1049

Anexo 8. Análisis de varianza para la acumulación total de la biomasa del Sistema agroforestal *T cacao* y *G arborea* en la vereda san Luis robles Tumaco, Nariño.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F	P
Modelo	7	732131289401	104590184200	13,34	<,0001
Tratamiento	5	698508309213	139701661843	17,82	<,0001
Bloque	2	33622980199	16811490094	2,14	0,1360

Anexo 9. Análisis de varianza de la productividad del *T. cacao* en el sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.

Fuente	DF	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado de la media (CM)	F	P - valor
Modelo	8	787339,90	98417,49	63,74	< 0,0001
Bloque	2	22588,67	11294,33	7,31	0,0084
Tratamiento	6	764751,24	127458,54	82,54	< 0,0001
Error	12	18529,33	1544,11		
Total	20	805869,24			

Anexo 10. Productividad del *T. cacao* dentro del sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.

Trat	Rep	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
1	R1	68	67	66	74	78	81	20	18	22	24	48	50	616
	R2	73	78	77	89	95	93	25	25	34	49	54	52	744
	R3	70	80	82	92	97	96	27	27	35	47	58	58	769
	Prom	70,33	75,00	75,00	85,00	90,00	90,00	24,00	23,33	30,33	40,00	53,33	53,33	709,67
2	R1	77	89	90	82	80	81	40	38	22	40	54	74	767
	R2	96	100	92	92	94	93	48	35	29	52	61	70	862
	R3	98	110	98	87	90	96	43	47	39	58	65	76	907
	Prom	90,33	99,67	93,33	87,00	88,00	90,00	43,67	40,00	30,00	50,00	60,00	73,33	845,33
3	R1	78	75	90	69	75	81	69	40	30	40	88	88	823
	R2	74	76	95	71	77	83	68	43	35	45	85	85	837
	R3	76	80	89	70	74	96	58	47	40	35	98	87	850
	Prom	76,00	77,00	91,33	70,00	75,33	86,67	65,00	43,33	35,00	40,00	90,33	86,67	836,67
4	R1	95	90	80	75	80	81	89	40	34	23	48	69	804
	R2	90	93	92	77	85	83	98	43	42	25	49	65	842
	R3	96	98	90	78	95	86	93	47	44	20	45	75	867
	Prom	93,67	93,67	87,33	76,67	86,67	83,33	93,33	43,33	40,00	22,67	47,33	69,67	837,67
5	R1	75	70	80	75	80	81	62	50	50	40	35	41	739
	R2	80	90	115	90	90	103	68	53	55	42	32	40	858
	R3	85	80	105	105	100	116	63	57	53	45	35	52	896
	Prom	80,00	80,00	100,00	90,00	90,00	100,00	64,33	53,33	52,67	42,33	34,00	44,33	831,00
6	R1	65	70	80	85	92	80	56	75	78	73	87	80	921
	R2	60	90	80	86	78	84	55	65	69	69	70	90	896
	R3	66	80	90	84	76	83	45	70	88	88	90	90	950
	Prom	63,67	80,00	83,33	85,00	82,00	82,33	52,00	70,00	78,33	76,67	82,33	86,67	922,33
7	R1	30	22	24	30	35	40	35	20	15	10	25	35	321
	R2	25	26	20	28	36	38	34	25	10	9	22	30	303
	R3	19	28	29	25	30	42	36	18	12	10	21	38	308
	Prom	24,67	25,33	24,33	27,67	33,67	40,00	35,00	21,00	12,33	9,67	22,67	34,33	310,67

Anexo 11. Algunas propiedades físicas y químicas encontradas después de 9.6 años en el sistema agroforestal *T. cacao* y *G. arborea* en la vereda San Luis Robles – Tumaco, Nariño.

NOMBRES	Bloque	Tipo de análisis	Tipo de Suelo	Ph	N Total	P disponible	K de cambio	% M.O	D.A (g/cc)
BETSAIDA ESTUPIÑAN	1	Completo	A	5,7	0,125	2,44	0,174	3,26	1,13
JUAN MARQUINEZ	2	Completo	Ar-L	5,1	0,193	3,41	0,098	4,97	0,94
JHONY QUIÑONES	3	Completo	L	5,3	0,199	3,36	0,147	5,13	0,92