



INSTITUTO TECNOLÓGICA DE COSTA RICA



ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

TRABAJO FINAL DE LICENCIATURA

**CRECIMIENTO Y FIJACIÓN POTENCIAL DE CARBONO EN
PLANTACIONES FORESTALES MIXTAS DE *Araucaria hunsteinii*
EN LA ZONA ATLÁNTICA, COSTA RICA.**

VÍCTOR MARTÍNEZ ALBÁN

Tesis para optar por el grado académico de Licenciatura

CARTAGO, COSTA RICA. 2014

ACREDITACIÓN

CRECIMIENTO Y FIJACIÓN POTENCIAL DE CARBONO EN PLANTACIONES FORESTALES MIXTAS DE *Araucaria hunsteinii* EN LA ZONA ATLÁNTICA, COSTA RICA.

Informe presentado a la Escuela de Ingeniería Forestal del
Instituto Tecnológico de Costa Rica
como requisito parcial para optar al grado académico de
Licenciatura en Ingeniería Forestal

Miembros del Tribunal



Lic. Dorian Canzajal Vanegas
Profesor Tutor
Escuela de Ingeniería Forestal



Ing. Rolando Camacho Herrera
Lector
Representante RTT



Msc. Gustavo Torres Córdoba
Lector
Escuela Ingeniería Forestal

DEDICATORIA

A mis padres por su sacrificio y ayuda en todos estos años.

*A toda mi familia en quienes he encontrado guía, apoyo y
caríño para compartir en esta vida.*

AGRADECIMIENTOS

Al personal de *Reforest The Tropics* por todo el apoyo económico y la confianza brindada para la realización del presente estudio en especial al Dr. Barres y a Greg Powell.

A Rolo por su guía, comentarios y ayuda en la toma de datos y procesamiento de ideas.

A Dorian por toda su paciencia en las correcciones, su amplia guía y su amistad durante los años de estudio.

Al profe Edwin por su paciencia en explicar todos los procedimientos del análisis de suelos.

Al profe Gustavo Torres por toda su guía a través de los años y en los procesos de matices políticos cuando las aguas estuvieron turbias.

"Hasta la victoria siempre"

A Vílchez por todos los regaños (cagadas) en pro de que incrementara la calidad de los trabajos.

A Yorle por sus comentarios e ideas para el análisis en general.

A toda el área de silvicultura de la EIFO por su amistad y confianza creada durante estos años de estudio.

A Tío Adrián por su amistad y todo su apoyo a través de toda la carrera.

A Fersi por todo el apoyo constante que me ha brindado durante todos estos años y una amistad de oro.

A los tres chiflados, las personas con las que he compartido desde aprendimos a caminar y a hacer tortas, una amistad de toda una vida.

A mi hermano y mis dos hermanas por todo su apoyo y ayuda.

A mis compañeros (los malvados o el grupo del aparta) en quienes más que amigos encontré hermanos con un apoyo incondicional para afrontar todas las dificultades confrontadas en esta etapa universitaria.

Índice general

ACREDITACIÓN	I
DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
Índice general	III
Índice de Cuadros	VII
Resumen	1
Abstract.....	2
Introducción.....	3
Objetivos.....	5
Objetivo general:	5
Objetivos específicos:.....	5
Revisión de literatura	6
Plantaciones forestales	6
Plantaciones forestales mixtas.....	6
Evaluación forestal.....	7
Captura de Carbono en plantaciones forestales y su mercado	7
Modelos a evaluar	8
Materiales y métodos.....	9
Sitios de estudio	9
Selección de modelos de plantaciones mixtas	9
Parcelas Permanentes de Medición (PPM)	9
Variables de medición	10
Estimación de carbono en la biomasa	10
Carbono fijado en suelos	10
Análisis estadístico.....	11
Resultados y Discusión	13
Crecimiento diamétrico.....	13
Posición Sociológica.....	16

Fijación potencial de carbono en biomasa	18
Recomendaciones Silviculturales	32
Conclusiones	37
Recomendaciones generales	39
Bibliografía	40

Índice de Figuras

Figura 1. Posición sociológica en forma porcentual para los diferentes modelos de plantación de RTT evaluados en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	17
Figura 2. Modelo de acumulación potencial de CO ₂ en el tiempo para el modelo de plantación Yale de RTT en la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	18
Figura 3. Modelos de acumulación de CO ₂ en el tiempo para las tres especies del modelo de plantación mixta BySN de RTT en la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	19
Figura 4. Comparación de CO ₂ acumulado a los 10 años para los diferentes modelos evaluados de RTT en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	20
Figura 5. Porciones porcentuales de CO ₂ capturado por cada modelo de plantación mixta de RTT evaluado en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	22
Figura 6. Densidad aparente de los suelos muestreados en los diferentes modelos de plantaciones mixtas de RTT y sus testigos en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	24
Figura 7. Carbono de los suelos muestreados en los diferentes modelos de plantaciones mixtas de RTT y sus testigos en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	24
Figura 8. Arcilla de los suelos muestreados en los diferentes modelos de plantaciones mixtas de RTT y sus testigos en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	25
Figura 9. Porcentaje de Materia orgánica de los suelos muestreados en los diferentes modelos de plantaciones mixtas de RTT y sus testigos en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	25
Figura 10. Correlación entre la cantidad de arcilla y la densidad aparente del suelo para los modelos de plantaciones mixtas de RTT y sus testigos evaluados en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	26
Figura 11. Correlación entre la cantidad de carbono y la cantidad de arcillas del suelo en los modelos de plantaciones mixtas de RTT y sus testigos evaluados en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	27
Figura 12. Comparación de carbono en el suelo en el modelo de plantación mixta Yale de RTT y su testigo evaluado para el sitio CATIE de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	29

Figura 13. Comparación de carbono en el suelo en el modelo de plantación mixta Km42 de RTT y su testigo evaluado para el sitio Pavones de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	29
Figura 14. Comparación de carbono en el suelo de varios modelos de plantación mixta de RTT y su testigo evaluado para el sitio Delicias de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	30
Figura 15. Comparaciones de carbono en el suelo en los modelos de plantaciones mixtas de RTT y sus testigos evaluados en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	31
Figura 16. Área basal y cantidad de árboles por hectárea registrados en el tiempo para el modelo Km42 de RTT en la zona atlántica de Costa Rica. 2014	32
Figura 17. Área basal y cantidad de árboles por hectárea registrados en el tiempo para <i>Pinus tecunumani</i> en el modelo Km42 de RTT en la zona atlántica de Costa Rica. 2014	33
Figura 18. Área basal y cantidad de árboles por hectárea registrados en el tiempo para <i>A. hunsteinii</i> en el modelo Km42 de RTT en la zona atlántica de Costa Rica. 2014	34
Figura 19. Desarrollo y parámetros de crecimiento del Área basal para el modelo BySN de RTT en la zona atlántica de Costa Rica. 2014	35

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Descripción de los modelos evaluados de RTT en tres sitios de la zona atlántica de Costa Rica. 2014	8
Cuadro 2. Incremento Medio Anual diamétrico global para los diferentes modelos de plantación de RTT evaluados en la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	13
Cuadro 3. Incremento Medio Anual diamétrico para <i>A. hunsteinii</i> en los modelos de plantaciones de RTT evaluados en la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	15
Cuadro 4. Incremento Medio Anual diamétrico para <i>E. deglupta</i> en los modelos de plantaciones de RTT evaluados en la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	16
Cuadro 5. Incremento Medio Anual del Volumen obtenido en los modelos de plantaciones mixtas de RTT evaluados en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	21
Cuadro 6. Clases texturales del suelo y carbono total acumulado a los 60 cm de profundidad en los modelos de plantaciones mixtas de RTT y sus testigos evaluados en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014	28

CRECIMIENTO Y FIJACIÓN POTENCIAL DE CARBONO EN PLANTACIONES FORESTALES MIXTAS DE *Araucaria hunsteinii* EN LA ZONA ATLÁNTICA, COSTA RICA.

Víctor Martínez-Albán

Resumen

Se realizó una evaluación silvicultural del crecimiento y la capacidad de fijación de carbono atmosférico en plantaciones de *Araucaria hunsteinii* en la zona atlántica de Costa Rica. Se tomaron los principales parámetros de crecimiento a partir de las mediciones cronosecuentes en los diferentes modelos de plantaciones forestales, además de tomar muestras compuestas de suelos para comparar los niveles de fijación de carbono en los mismos. Se evaluaron 6 modelos de la colección presentada por Reforest The Tropics (RTT), donde 4 son plantaciones forestales mixtas de *A. hunsteinii*, 1 es una plantación en monocultivo de *A. hunsteinii* y el último modelo es una mezcla de 5 especies. Estas plantaciones evaluadas presentaron diferencias significativas en crecimiento diamétrico entre ellas, donde el mejor crecimiento lo presentó el modelo BySN, también se obtuvieron diferencias significativas en el crecimiento presentado por *A. hunsteinii* en los 5 modelos donde es parte del diseño. Por otra parte en la fijación de carbono en biomasa dio como resultado que el modelo con más dióxido de carbono capturado al año 10 es Chancho con 320,86 *mg/ha*. En el análisis hecho a los suelos de las plantaciones forestales se obtuvo que existen diferencias significativas al comparar entre sí a todos los modelos y testigos muestreados, donde la diferencia principal fue presentada por Yale comparado con la plantación de café y el modelo con más carbono en suelos fue Chancho con 256,59 *Mg/ha*.

Palabras claves: Trópico, carbono, biomasa, suelos forestales, plantaciones forestales, evaluación silvicultural, *Araucaria hunsteinii*, Costa Rica.

GROWTH AND POTENCIAL CARBON FIXING IN MIXED FOREST PLANTATIONS OF *Araucaria hunsteinii* IN THE ATLANTIC ZONE OF COSTA RICA.

Victor Martinez-Albán

Abstract

It was performed a silvicultural assessment of growth and the capacity to fix atmospheric carbon in forest plantations of *Araucaria hunsteinii* in the Atlantic zone of Costa Rica. The main growth parameters were taken from the chronosequenced measurements in the different models of mixed forest plantations, besides taking composite soil samples to compare the levels of carbon fixation on it. For this evaluation were taken 6 models in the collection presented by Reforest the Tropics (RTT), where 4 are mixed plantations of *A. hunsteinii*, 1 is a monoculture plantation *A. hunsteinii* and the latest model is a mixture of 5 tropical species . These plantations indicated significant differences in diameter growth between them, where the best growth was presented by BySN, significant differences were also obtained on the growth presented by *A. hunsteinii* in 5 models where it is part of the plantation design. Chanco was the model with the most carbon dioxide fixation in biomass at the age of 10 years with 320,86 *mg/ha*. In the analysis done to soils of the forest plantations were obtained that there are significant differences when all the models and whiteness were compared, the main difference was presented by Yale with Coffee plantation, and the model with the most carbon in soil is Chanco with 256,59 *Mg/ha*.

Key words: Tropic, carbon, biomass, forest soils, forest plantations, silvicultural assessment, *Araucaria hunsteinii*, Costa Rica.

Introducción

Las plantaciones forestales en Costa Rica tomaron gran importancia en las últimas décadas no solo como fuente de madera, sino también como elementos encargados de suplir bienes y servicios ambientales (Moreno, Salas, y Garcia, 2005). El bosque como ecosistema natural se ha ido degradando por prácticas sin un debido control (Louman, Quirós, y Nilson, 2001). La expansión de la frontera agrícola y fragmentación de los bosques, ha hecho que los ecosistemas naturales aumenten su fragilidad y el riesgo de no producir los servicios ambientales requeridos por los seres humanos (Guariguata y Kattan, 2002). En este contexto, las plantaciones forestales juegan un rol importante al suplir en cierta forma los servicios ambientales.

La producción de madera se ha ido relegando del ecosistema natural a las plantaciones forestales (OET, 2008) y la tendencia a nivel global ha sido creciente en cuanto a la cantidad de área destinada a la producción forestal (FAO, 2010). La creciente demanda por parte del mercado, de las plantaciones busca obtener altos rendimientos de los árboles, mediante un manejo silvicultural y el desarrollo óptimo de ciertas características que favorezcan su tasa de producción por unidad de área en un tiempo adecuado (Murillo y Badilla, 2004).

Las plantaciones forestales donde se emplea una sola especie, permiten un manejo silvicultural uniforme en toda su extensión. En estos sistemas los individuos compiten de manera continua por luz y nutrientes (Ladrach, 2010). El tener un ecosistema manejado bajo estas condiciones, repercute en la variabilidad de servicios ambientales que puede brindar y su duración (Wormald, 1995). Por eso la cantidad y calidad de los servicios ambientales va a depender en gran medida del turno de rotación que tenga la plantación, que estará determinado por el objetivo de siembra. (Varmola, Lee, Montagnini, Saramäki, y Gautier, 2006).

Según Varmola et al. (2006) las plantaciones forestales mixtas son una opción más cercana a la representación de un ecosistema natural, ya que pueden desarrollar varios doseles en un mismo sitio, así como brindar una gran variedad de servicios ambientales, además, de cumplir los fines productivos comerciales, donde la menor competencia interespecífica podría denotarse en mayores rendimientos (Alice, Montagnini, y Montero, 2004; Mollinedo-García, 2002). Su principal reto es el adecuado manejo silvicultural de diferentes especies en un mismo sitio, sin embargo, en los últimos años se ha

desarrollado experiencia en este tema para llevar a cabo una buena gestión de este tipo de plantaciones (Piotto, 2001; Wormald, 1995), lo que permite esperar resultados promisorios en un futuro cercano.

En la actualidad uno de los principales servicios ambientales atribuidos a las plantaciones forestales, es la función de capturar y ser sumideros de carbono, donde se logra secuestrar el CO₂ atmosférico y convertirlo en biomasa tanto aérea como subterránea (Zambrano, Franquis, y Infante, 2004), por lo que se debe saber cuantificar la capacidad de captura de carbono de los ecosistemas forestales (Fonseca, Alice, Montero, Toruño, y Leblanc, 2008). Con esto se logra disminuir, o inclusive se llega a contra-restar la cantidad de Gases de Efecto Invernadero (GEI) liberados a la atmósfera (Cuenca, 2009; Moreno et al., 2005).

Los bonos de carbono existen mediante este concepto de mitigación de GEI, donde se lleva a cabo un mecanismo de venta de las toneladas de CO₂ que son acumuladas en las plantaciones forestales. Es en este ámbito donde trabaja RTT, que sirve de intermediario entre los emisores de GEI y los finqueros que están anuentes a participar en el proceso de captura de CO₂, mediante plantaciones forestales mixtas en un período mínimo de 25 años, al final del cual el finquero es dueño de la madera comercial producida en la plantación. La meta de captura de carbono al final del periodo es de 500 toneladas de CO₂ o 500 m³ de madera por hectárea (Camacho-Herrera, 2013; Cuenca, 2009).

Objetivos

Se enumeran a continuación el objetivo general y específicos de este estudio.

Objetivo general:

- Evaluar el crecimiento y la fijación potencial de carbono en plantaciones mixtas de *Araucaria hunsteinii* en el proyecto de RTT en la zona atlántica de Costa Rica. Con el fin de aportar información a la empresa RTT en cuanto al desarrollo de sus plantaciones y el alcance de sus objetivos iniciales para con los finqueros y los donantes.

Objetivos específicos:

- Analizar el crecimiento diamétrico presentado por cada modelo evaluado y cada especie repitente.
- Analizar la producción de fijación de carbono en los diferentes modelos de plantaciones mixtas.
- Comparar el carbono fijado en el suelo en los modelos de plantaciones mixtas con terrenos aledaños que mantengan la cobertura anterior a plantaciones forestales.
- Recomendar el mejor manejo silvicultural para algunas especies y/o modelos presentes en las diferentes plantaciones forestales evaluadas.

Revisión de literatura

Plantaciones forestales

En Costa Rica desde los años 80's se han puesto en marcha diversos mecanismos de incentivos para aumentar la cobertura forestal, debido a la explotación expansiva del bosque presentada en la décadas previas. Uno de los mecanismos puestos en marcha fue el incentivar el establecimiento de plantaciones forestales (Prado, 2012).

Es a través de estos mecanismos que el país fomenta la actividad de reforestación como una opción productiva para el uso de la tierra, sin embargo, por ser una actividad que se lleva a cabo en un tiempo considerable es que requiere de una buena planificación y aplicación de medidas de manejo adecuadas, de forma que resulte económicamente viable (Ladrach, 2010; Prado, 2012).

En Costa Rica la gran mayoría de las plantaciones se han establecido como monocultivos, pero, las plantaciones forestales mixtas también representan una opción para producir servicios ambientales, así como bienes económicos en un ciclo productivo por lapsos (Alice et al., 2004; Varmola et al., 2006), según sea la composición del diseño de la plantación.

Plantaciones forestales mixtas

Una plantación forestal mixta se compone de varias especies forestales plantadas en un mismo sitio donde se busca maximizar la productividad del lugar, ya que esto diversifica la producción y reduce el riesgo en el ataque de plagas (Wormald, 1995). Además se puede definir la composición de las especies en la plantación siguiendo diversos métodos, ya sea que se quiera desarrollar uno o varios doseles (Torres-Ortega, 2007). Esto se logra buscando especies de características silvícolas similares o compatibles en cuanto a requerimientos de luz y nutrientes.

El diseño de las plantaciones forestales mixtas puede darse de formas variadas, donde pueden ser en líneas, bloques o árboles adyacentes, la complejidad del diseño va a influir en el manejo que requiera y el objetivo del establecimiento de la misma (Alice et al., 2004). Estas plantaciones al poder combinar especies de diferentes turnos de cosecha, pero de características compatibles, presentan una forma de producción idónea para ser sumideros de carbono y paralelamente producir bienes económicos como madera u postes, así como una amplia gama de servicios ambientales.

Evaluación forestal

Una evaluación forestal es la medición y obtención de los principales parámetros de crecimiento y rendimiento del rodal, ya que como menciona Ortiz (2008) el profesional solamente con información confiable puede diagnosticar el estado del bosque o plantación, ya sea para la aplicación de tratamientos silviculturales o el resultado de la aplicación de los mismos.

Las evaluaciones forestales se pueden llevar a cabo con mediciones temporales o cronosecuentes con parcelas permanentes. De estas mediciones se puede ubicar el desarrollo del rodal en un modelo predictivo de crecimiento o se puede ir desarrollando un modelo propio de crecimiento, donde el mismo nos va a brindar información sobre la cantidad de biomasa acumulada en el tiempo en función del objetivo del establecimiento del rodal (Cuenca, 2009; Ortiz, 2008).

Captura de Carbono en plantaciones forestales y su mercado

Las plantaciones forestales representan una importante opción para la captura de carbono atmosférico ya que lo acumulan en biomasa tanto aérea como subterránea. Esto debido a que las plantas a través de la fotosíntesis absorben este carbono y convierten en el principal componente de sus estructuras (IPCC, 2000).

La tasa de fijación de carbono por hectárea plantada puede variar dependiendo de factores como la especie, el diseño de la plantación, el manejo, los suelos, entre otros; sin embargo, para toda área reforestada al crecer el volumen acumulado de biomasa, incrementa la cantidad de toneladas de carbono mitigadas (Arguedas-Marín, 2012).

Las toneladas mitigadas de carbono son un bien que puede ser comercializado con empresas que deseen ser ambientalmente responsables, ya que todas aquellas empresas que deseen reducir y mitigar su huella de carbono pueden acceder a este tipo bienes, fomentado así la reforestación y obteniendo un valor agregado como la carbono neutralidad (Salgado, Dumas, Feoli, y Cedeño, 2013). En Costa Rica el mayor ente encargado de comercializar este carbono fijado en las plantaciones o bosques (bonos de carbono) es FONAFIFO (Rojas, 2013).

El modelo de producción de RTT funciona mediante el pago de \$ 7500 por parte del emisor de GEI en los Estados Unidos Americanos para el establecimiento y manutención de una hectárea donde se emplearán plantaciones forestales mixtas con la meta de

alcanzar 500 toneladas de CO₂ a los 25 años de edad en Costa Rica. De los \$ 7500 que paga el emisor en Estados Unidos, al finquero se le hacen una serie de pagos que se describen a continuación: \$ 2000 son para el establecimiento en el año 1 y 2, \$ 1000 son para mantenimiento en los años 3 y 4, y \$ 4500 para el manejo silvicultural y gastos administrativos de RTT durante los 25 años (Camacho-Herrera, 2013).

Modelos a evaluar

A continuación en el Cuadro 1 describe los modelos evaluados en el presente estudio, donde el nombre fue dado según el donante o la especie principal empleada:

Cuadro1. Descripción de los modelos evaluados de RTT en tres sitios de la zona atlántica de Costa Rica.2014

Modelo	Edad	Cantidad de Especies	Especies que lo integran	N _{inicial} (arb/ha)	N _{actual} (arb/ha)	Raleado
Klinkii	12	1	- <i>Araucaria hunsteinii</i>	833	485	Si
Yale	6	5	- <i>Cordia alliodora</i> - <i>Vochysia ferruginea</i> - <i>Vochysia guatemalensis</i> - <i>Schizolobium parahyba</i> - <i>Cedrela odorata</i>	625	625	No
Pilón	12	4	- <i>Hieronyma alchorneoides</i> - <i>Araucaria hunsteinii</i> - <i>Swietenia macrophylla</i> - <i>Eucalyptus deglupta</i>	1094	561	Si
Chancho	12	4	- <i>Vochysia guatemalensis</i> - <i>Araucaria hunsteinii</i> - <i>Swietenia macrophylla</i> - <i>Eucalyptus deglupta</i>	875	450	Si
Km42	13	2	- <i>Araucaria hunsteinii</i> - <i>Pinus tecunumanii</i>	816	573	No
BySN	4	3	- <i>Araucaria hunsteinii</i> - <i>Eucalyptus deglupta</i> - <i>Cedrela odorata</i>	599	599	No

Materiales y métodos

Sitios de estudio

Los sitios de estudios son: - Finca Hacienda Las Delicias, ubicada el cantón de Guácimo, provincia de Limón, Costa Rica, (10° 12' N, 83° 37' W), - Finca Los Pavones, Turrialba, Cartago (9° 54' N, 83° 36' W), - el último sitio se encuentra en las inmediaciones del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) (9° 53' N, 83° 39' W), en el distrito central, cantón Turrialba. Hacienda Las Delicias se encuentra a 295 msnm, tiene una temperatura promedio de 25,1°C y una precipitación media anual de 3464 mm. Finca Los Pavones tiene una temperatura promedio de 21.7°C, una precipitación media anual de 2,619 mm y una altura de 1,180 msnm. La temperatura promedio del CATIE es de 22,5°C, posee una precipitación promedio de 2645 mm y una altura de 602 msnm (Cuenca, 2009).

Selección de modelos de plantaciones mixtas

Se llevó a cabo una visita a los 25 modelos empleados por RTT para realizar posteriormente una selección de 6 y llevar a cabo esta evaluación. La selección se efectuó según la aplicación de diferentes parámetros como: el buen desarrollo de un conjunto de especies en el tiempo, la cantidad de especies presentes en el modelo, el rápido crecimiento de un modelo a corta edad, cantidad de CO₂ fijado a cierta edad, entre otros.

Parcelas Permanentes de Medición (PPM)

Las parcelas evaluadas son rectangulares, de varios tamaños que van desde 680 a 1024 m²., se evaluaron 16 parcelas distribuidas en los 6 modelos de plantaciones, donde la intensidad de muestreo promedio es de un 8%, el área total abarcada por las parcelas de muestreo es 1,31 ha. La distribución de las parcelas en los modelos es desigual, donde 3 de los 6 modelos presentan solamente 1 parcela (BySN, Yale, Km42) y los otros tres modelos: Chancho, Pilón y Klinkii tienen respectivamente 7, 4 y 2 parcelas.

Variables de medición

Se ha realizado mediciones de crecimiento desde el 1 año posterior al establecimiento hasta el año 2014. La base de datos conformada brindó información del volumen total y el carbono fijado aproximado mediante su cálculo con el diámetro y la altura total, así como la obtención de parámetros de crecimiento como el área basal (G), cantidad de árboles por hectárea (N). Además se tomó la posición sociológica para poder identificar las principales especies que tenían acceso a luz en los diferentes modelos, así como identificar donde se encuentran más porcentaje de individuos en los doseles inferiores.

Estimación de carbono en la biomasa

Se efectuó una estimación del carbono capturado por plantaciones forestales, mediante la aplicación de la fórmula de volumen empleada por Camacho-Herrera (2013):

$$V_{\text{carbono}} = G \times H \times FF \times FBT \times PEB \times 0,5$$

$$V_{\text{CO}_2} = V_{\text{carbono}} \times \frac{1}{0,273}$$

Dónde:

G = Área basal

H = Altura total

FF = Factor de forma

FBT = Factor Biomasa Total (Fonseca, Alice, y Rey, 2009)

PEB = Peso Específico Base (Para cada especie)

0,5 = Factor para obtener el Carbono (IPCC, 2006; West, 2009)

Carbono fijado en suelos

Se determinó el carbono orgánico capturado en suelos con los diferentes modelos de plantaciones por la descomposición de biomasa, mediante un muestreo de suelos de cada modelo a tres profundidades (20, 40 y 60 cm). Debido a la ausencia de una línea base para la cuantificación del carbono capturado en suelos, se tomó como punto de partida un área adyacente a las plantaciones de RTT, donde aún se mantiene el uso del suelo anterior al desarrollo del proyecto de reforestación, para así poder cuantificar si se ha capturado más carbono en el suelo con las plantaciones forestales mixtas que con la cobertura anterior.

El estudio en suelos se realizó en 6 modelos de plantaciones y 3 testigos. Se obtuvieron 81 muestras compuestas de suelo (27 por cada profundidad) y 81 muestras de densidad aparente (3 por cada modelo para cada profundidad), las cuales fueron procesadas en el laboratorio de suelos del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). El muestreo de suelos se llevó a cabo utilizando una muestra compuesta, a partir de 7 submuestras individuales en cada una de las tres profundidades.

El análisis de laboratorio se realizó según el procedimiento utilizado por Esquivel et al. (2013) y planteado por Magdoff (1996), donde se hizo una medición del carbono por combustión. El procedimiento se lleva a cabo en un lapso de 24 horas a 450 °C, donde el aumento inicial de temperatura fue de forma gradual hasta alcanzar y mantener la temperatura supra mencionada. Previamente la muestra pasó por un periodo de 24 horas a 105 °C para que perdiera toda la humedad y no sesgar la cantidad de carbono acumulado en la calcinación por contenido de humedad.

Además se llevó a cabo una caracterización para ver la textura, ya que la cantidad de carbono almacenada en el suelo está relacionada con las arcillas presentes en el mismo como lo menciona Esquivel et al. (2013), también se realizó un análisis de porcentaje de materia orgánica y la densidad aparente de los sitios para la obtención de la cantidad de carbono por unidad de área presente en los suelos.

Análisis estadístico

Los datos de crecimiento silvicultural fueron analizados en el Software Statistica 8 (Statsoft, 2007), donde primeramente se llevaron a cabo dos análisis de normalidad uno de Shapiro-Wilks y un segundo de kolmogrov-Smirnov, para verificar si los datos tenían una distribución normal, sin embargo, al no presentar una distribución gaussiana, se utilizó una prueba estadística no paramétrica de Krustal-Wallis donde se compararon más de 2 muestras o una de Mann-Whitney donde solo se compararon 2 muestras. Con el fin de detectar si existen diferencias significativas entre el crecimiento de cada modelo en el tiempo, entre las especies que componen los mejores tres modelos y si dos o más especies que están presentes en dos o más modelos presentan diferencias significativas en su crecimiento. Además para los datos de carbono en suelos se les hizo un análisis de normalidad, para posteriormente aplicar un ANDEVA y finalmente una prueba específica, ya sea LSD Fisher en la comparación general de los nueve puntos de toma de datos o Dunnett donde se compararon los modelos de plantación con sus respectivos testigos de

cada sitio muestreado. Esto con el fin de obtener si existen diferencias significativas entre los modelos de plantación en general y las diferencias entre los modelos y sus respectivos testigos de captura de carbono en suelos.

Las principales hipótesis que se probaron son las siguientes:

H_0 : No existen diferencias significativas de crecimiento diamétrico entre los modelos evaluados.

H_a : Si existen diferencias significativas de crecimiento diamétrico entre los modelos evaluados.

H_{0a} : No existen diferencias significativas de fijación de carbono en biomasa entre los modelos evaluados.

H_{aa} : Si existen diferencias significativas de fijación de carbono en biomasa entre los modelos evaluados.

H_{0b} : No existen diferencias significativas de fijación de carbono en suelos entre los modelos evaluados.

H_{ab} : Si existen diferencias significativas de fijación de carbono en suelos entre los modelos evaluados.

Resultados y Discusión

Crecimiento diamétrico

En el cuadro 2 se muestran los valores de Incremento Medio Anual diamétrico (IMAd) al ser tomado de manera global, o sea todas las especies que componen cada modelo. La posibilidad de que existieran diferencias significativas a nivel interno de los modelos fue evaluada, con los IMAd de cada especie de los 4 mejores modelos de plantación mixta, el resultado fue negativo, sin embargo al comparar los modelos entre sí, presentaron diferencias significativas.

El cuadro 2 muestra al modelo BySN (2,93 *cm/año*) como el que tiene mayor crecimiento, el cual presenta diferencias significativas con 3 de los 5 modelos restantes, este crecimiento es poco más de 0,5 *cm* por encima del reportado por Torres-Ortega (2007) para plantaciones mixtas de tres especies con *A. hunsteinii* (2,36 *cm/año*). Una de las especies de este modelo es *C. odorata* donde si comparamos el Incremento Medio Anual diamétrico (IMAd) global de BySN con una plantación pura a 6 años de edad como la reportada por Piotto (2001) de 1,94 *cm/año*, existe una diferencia de alrededor de 1 *cm* por arriba de la misma, sin embargo al tener un IMAd cercano o mayor a 2 *cm/año* se muestra un buen crecimiento de la especie en comparación con muchos de los modelos analizados por Cuenca (2009) en el mismo sitio.

Cuadro 2. Incremento Medio Anual diamétrico global para los diferentes modelos de plantación de RTT evaluados en la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014

Modelo Plantación	IMAd (cm/año)	Intervalo Edad (Años)	Número de árboles (N/ha)
Klinkii	2,02 (ab)	3 – 11	485
Yale	2,71 (ab)	2 – 6	625
Pilón	0,81 (d)	4 – 12	562
Chancho	0,98 (c)	4 – 12	450
Km42	1,86 (b)	5 – 13	573
BySN	2,93 (a)	2 – 4	599

Las letras diferentes corresponden a diferencias significativas con un 95% de confiabilidad.

En el caso de plantaciones de Pilón en rodales puros se reporta un IMAd de 2,29 *cm/año* con una cantidad de individuos por hectárea de 535 (Brenes, 2012) y Piotto (2001) reporta 1,85 *cm/año*, en este estudio el IMAd global para plantaciones mixtas de la misma

especie con una cantidad de individuos por hectárea de 562 es de 0,81 *cm/año*. Este crecimiento obtenido en las plantaciones evaluadas hace suponer que el manejo de los raleos y podas de formación no ha sido suficiente para poder explotar el potencial de crecimiento de la especie principal de la plantación mixta.

Para las plantaciones de *V. guatemalensis* los IMA_d reportados por Brenes (2012) y Piotto (2001) en plantaciones puras y mixtas son respectivamente 2,04 *cm/año* y 2,59 *cm/año*, las cuales son más del doble al IMA_d obtenido en esta evaluación en el modelo Chanco de 0,98 *cm/año*, esto puede deberse a manejo de las densidades del rodal, diferentes procedencias del material genético u condiciones de sitio como el suelo.

Se denota que el crecimiento no necesariamente está ligado con la cantidad de especies como mencionaba Cuenca (2009), donde recomienda no utilizar más de 3 especies para el diseño de plantaciones mixtas, ya que el modelo de plantación Yale no tiene diferencias significativas con BySN. Es posible que la recomendación de no utilizar más de tres especies sea hecha desde el punto de vista silvicultural, debido a la complejidad que podría presentar un modelo como Yale con 5 especies en la aplicación de raleos o podas.

Los dos modelos con los crecimientos más altos en el IMA_d son los modelos más jóvenes de los 6 evaluados, donde BySN tiene 4 años y Yale con 6 años presentan un potencial de incremento elevado, pero requieren tener el mejor manejo posible para mantener este ritmo de crecimiento, ya que el desarrollo de las variables en los rodales forestales tienen forma sinodal y las prácticas de manejo lo que buscan es optimizar el crecimiento por el mayor tiempo posible (Fassola et al., 2010; Piotto, 2001). Además Yale no posee diferencias significativas con el tercer y cuarto modelo de mejor crecimiento, donde Klinkii (3^{er}) y Km42 (4^{to}) presentan edades de al menos el doble de la misma por lo que se demuestra que los mejores crecimientos no están siendo sesgados por la edad del modelo.

En el Cuadro 3 se observan los crecimientos para la especie *Araucaria hunsteinii* en los modelos de plantaciones donde se encuentra presente en el diseño de siembra y que fueron evaluados, aquí se muestra que el mejor IMA_d lo presentaron los modelos Km42 y BySN que no tienen diferencias significativas entre sí. Esto demuestra en la especie supra mencionada podría no presentar diferencias en el crecimiento potencial si se emplea en una plantación mixta en líneas de monocultivo como BySN o en una matriz de especies como en Km42. También es importante resaltar que el modelo Km42 es cerca de 10 años

mayor que BySN pero, el IMAd se ha mantenido en el tiempo, una posible razón para obtener estos buenos crecimientos es la combinación de especies de los modelos, ya que en estos modelos no tienen una especie tan agresiva como *V. guatemalensis* que podría producir un alto grado de sombra para las demás especies una vez que cierra el dosel estrechando las copas, si bien es cierto que *A. hunsteinii* puede tolerar cierto grado de sombra (Nutto, Spathelf, y Rogers, 2005), el mantener esa condición por un tiempo prolongado puede llegar a suprimir su crecimiento, llegando a ser solo cercano a un 1/3 del posible crecimiento denotado en los modelos evaluados por Km42 y BySN.

Karmar, Yoshida, Mizoue, y Murakami (2006) reporta para *A. hunsteinii* un IMAd de 1,1 *cm/año* en plantaciones de 45 años, mientras que Torres-Ortega (2007) reporta un crecimiento de 1,82 *cm/año*, a una edad similar con las plantaciones de este estudio, las cuales mostraron un crecimiento de 2,02 *cm/año*, lo cual hace pensar que el IMAd decrece en el tiempo pero a una tasa muy baja a pesar de tener un turno largo para una especie en el trópico, ya que en el modelo de Km42 que tiene cerca de 1/3 de la edad propuesta de turno de corta (45 años) y presenta una IMAd cerca de 3 veces mayor al de Karmar et al. (2006), una de las características de la madera obtenida por la familia de *Araucariaceae* es que la misma llevada al turno de rotación es de buen valor económico, lo que justifica la duración de periodos largos de cosecha (Modrego, Melo, y Gilabert, 2006).

Cuadro 3. Incremento Medio Anual diamétrico para *A. hunsteinii* en los modelos de plantaciones de RTT evaluados en la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014

Modelo Plantación	IMAd (cm/año)	Intervalo Edad (Años)	Árboles por hectárea (N/ha)	Porcentaje del modelo (%)
Klinkii	2,02 (a)	3 – 11	485	100
Pilón	0,81 (b)	4 – 12	225	40
Chancho	0,94 (b)	4 – 12	170	38
Km42	2,91 (c)	5 – 13	204	36
BySN	2,90 (c)	2 – 4	286	48

Las letras diferentes corresponden a diferencias significativas con un 95% de confiabilidad.

Las diferencias en crecimiento de *Eucalyptus deglupta* presentadas en el Cuadro 4 pueden deberse a varias razones como el origen de la semilla, el diseño de siembra de la plantación o que el IMAd para la especie disminuyó abruptamente en el tiempo, ya sea

por falta de acceso a luz o falta de raleos tempranos, sin embargo en el mejor crecimiento obtenido por el modelo BySN, se denota un gran potencial de desarrollo para la especie a pesar de solo representar un 30% del total de árboles.

Cuadro 4. Incremento Medio Anual diamétrico para *E. deglupta* en los modelos de plantaciones de RTT evaluados en la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014

Modelo Plantación	IMAd (cm/año)	Intervalo Edad (Años)	Árboles por hectárea (N/ha)	Porcentaje del modelo (%)
Pilón	0,81 (a)	4 – 12	30	5
Chancho	0,94 (a)	4 – 12	45	10
BySN	4,52 (b)	2 – 4	182	30

Las letras diferentes corresponden a diferencias significativas con un 95% de confiabilidad.

Una especie presente en Yale de gran importancia para el mercado nacional es el Laurel (*Cordia alliodora*), donde el IMAd obtenido en este estudio fue de 2,71 *cm/año* en plantaciones mixtas el cual es bastante bueno para una plantación de 6 años, ya que los IMAd reportados en Costa Rica y Panamá por Piotto (2001) en edades de 6 años son de 2,09 *cm/año* en la zona caribe y 2,38 *cm/año* en la zona pacifica, así como Brenes (2012) reporta 1,91 *cm/año* en rodales puros y Valdivieso (1997) 4,1 *cm/año* en sistemas agroforestales de la misma edad, también Pérez-Castellon, Ruíz-Fonseca, Reyes, López-Larios, y Calero (2005) reportan un crecimiento similar en Nicaragua con 2 *cm/año* por lo que podría suponerse que la especie tiene un crecimiento similar en plantaciones para la región.

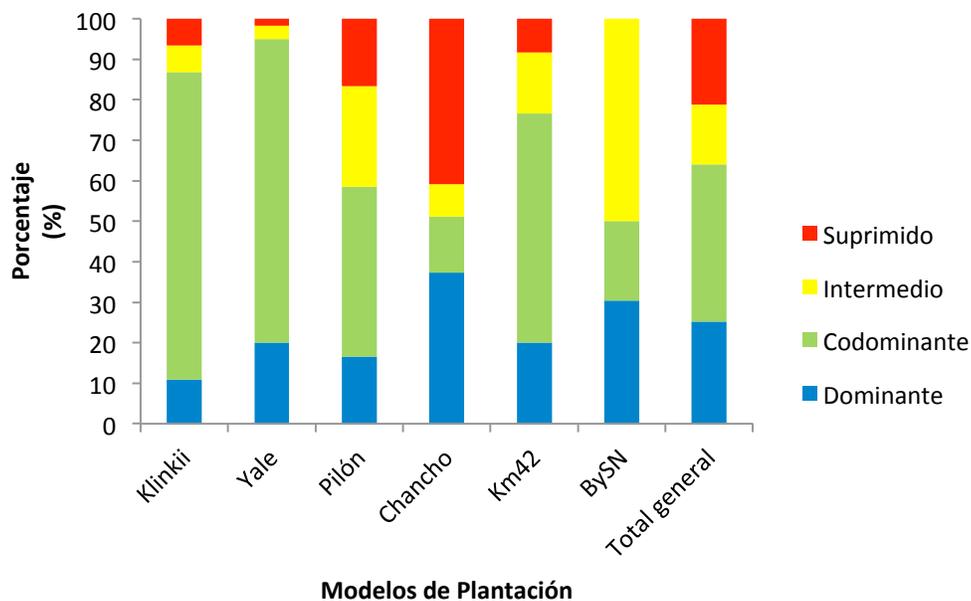
Posición Sociológica

La Figura 1 muestra la clasificación de copas según Galloway (1993) tomada para cada uno de los modelos evaluados, así como para el total general de manera porcentual, de esta forma si lo comparamos con el Cuadro 2, se nota como los modelos con menor cantidad de árboles suprimidos son los que presentan mejor crecimiento diamétrico global, además estos modelos no han alcanzado o están cercanos a llegar al punto de requerir un raleo para mantener el ritmo de crecimiento denotado hasta el momento de la evaluación realizada (Phillips, 2004). Esto porque RTT al buscar dos objetivos principales en los modelos de plantación, como lo son el almacenamiento de carbono y la producción de madera, entonces se debe tratar de ir eliminando los individuos suprimidos o codominantes de peor forma mediante los raleos, para maximizar el crecimiento,

concentrándolo en los mejores individuos de la plantación y abriendo el dosel para *A. hunsteinii* (especie de largo plazo), para así poder obtener carbono fijado en la biomasa de la plantación y a la vez árboles maderables de buena calidad e ingresos por raleos para el finquero.

En el total general presentado en la Figura 1, un 21% de árboles están categorizados como suprimidos, donde 3/4 de estos son de *A. hunsteinii*. Esto debe considerarse al analizar el crecimiento de la especie en los dos modelos con más individuos suprimidos (Chancho y Pílon), ya que en estos modelos el IMAd de la especie estuvo por debajo de 1 cm/año y los individuos de *A. hunsteinii* representan alrededor de un 40% del total de individuos del diseño de plantación (Cuadro 3). Una posible razón es que el crecimiento diametral está estrechamente relacionado con la disponibilidad lumínica en la familia *Araucariaceae* por lo que si los árboles de *A. hunsteinii* no tienen suficiente exposición a la luz solar directa, estos no van a crecer de la forma adecuada (Zamin, Machado, Filho, y Koehler, 2013). Un dato de interés para esta especie en los modelos evaluados, es que solo una décima parte del 60% del total general que está en las dos primeras categorías (Dominante y Codominante), son individuos de *A. hunsteinii*, los cuales reciben la luz necesaria para tener un desarrollo óptimo por condiciones de acceso a la luz.

Figura 1. Posición sociológica en forma porcentual para los diferentes modelos de plantación de RTT evaluados en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014

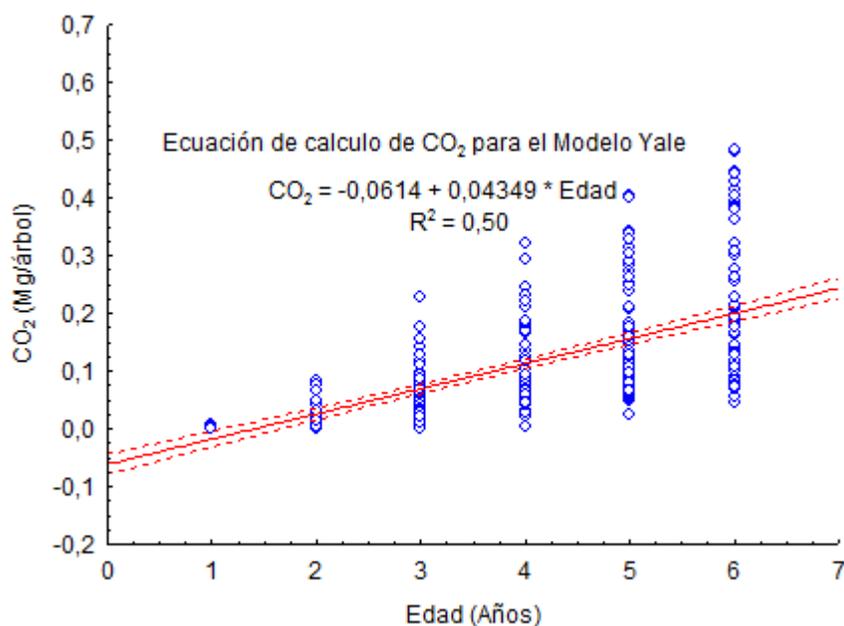


Fijación potencial de carbono en biomasa

Al evaluar la fijación de carbono en los modelos de plantación de diferentes edades se tomó como base para la comparación la edad de 10 años, ya que esta representa un 40% del contrato de 25 años propuesto por RTT, ya sea que fuesen los datos reales del crecimiento del modelo a esa edad o en dos casos donde los modelos no habían alcanzado esa edad, se proyectó con modelos de crecimiento como lo muestran las Figuras 3 y 4.

En la Figura 2 se muestra el modelo de acumulación potencial de CO₂ en relación al tiempo que se obtuvo con el modelo de plantación Yale y las mediciones que se tenían hasta el año 6, por lo que se proyectan solo 4 años de crecimiento, el R² es relativamente bajo (50%) pero posiblemente se debe a que es una plantación mixta de 5 especies y los datos anuales presentan una amplitud considerable.

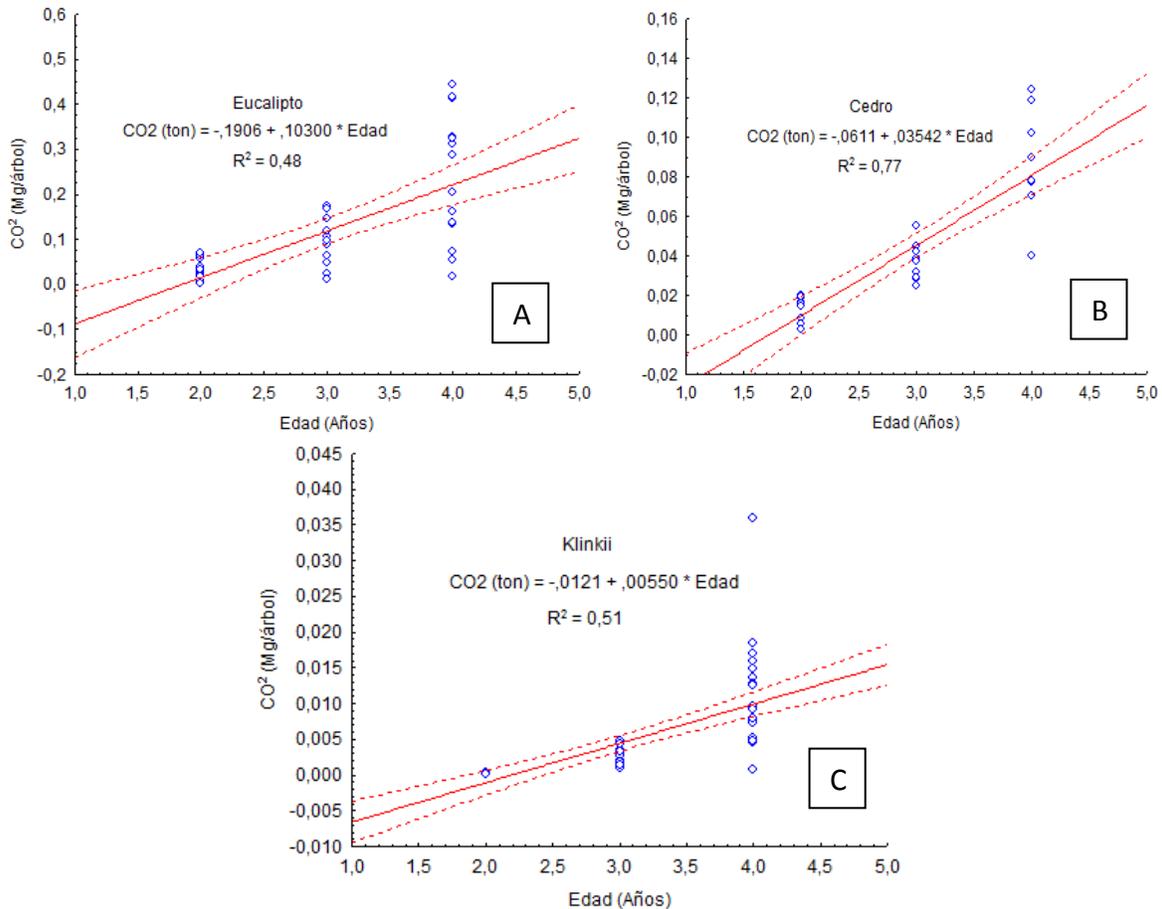
Figura 2. Modelo de acumulación potencial de CO₂ en el tiempo para el modelo de plantación Yale de RTT en la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014



Para el segundo caso de los modelos que al momento de realizar esta evaluación no alcanzaban la edad propuesta (BySN), al crear un modelo de acumulación de CO₂ global se obtuvo un R² muy bajo (15%), por lo que se optó por realizar un modelo de acumulación de CO₂ en el tiempo por cada especie que lo constituye: *-E. deglupta*, *-C. odorata* y *-A. hunsteinii*. Donde el R² obtenido para cada especie fue como mínimo muy

cercano al 50%, estos modelos creados para cada especie se observan en la Figura 3. En el caso de *C. odorata* (Figura 3-B), en *E. deglupta* (Figura 3-A) y con el caso de *A.hunsteinii* (Figura 3-C) solo fueron utilizados los datos del modelo BySN.

Figura 3. Modelos de acumulación de CO₂ en el tiempo para las tres especies del modelo de plantación mixta BySN de RTT en la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014

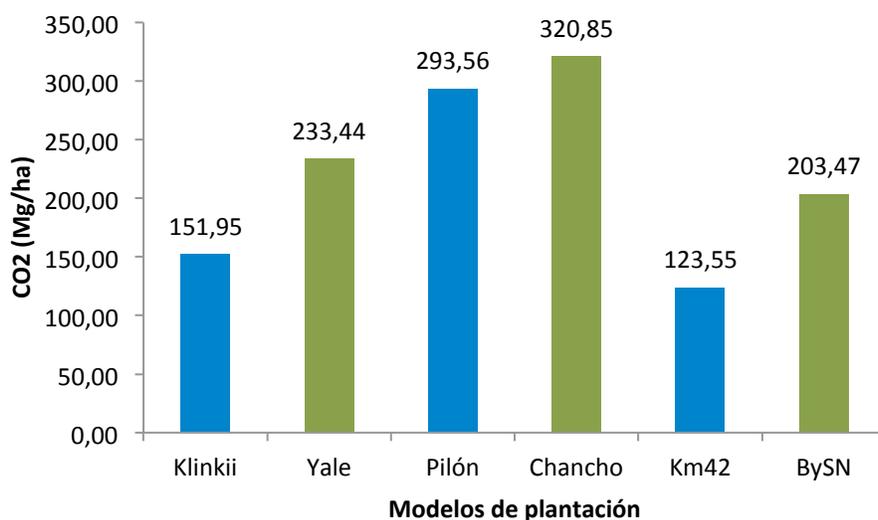


En la comparación del CO₂ (*Mg/ha*) acumulado al año 10 por los diferentes modelos que se muestra en la Figura 4, no se obtuvieron diferencias significativas entre los modelos de Pilón y Chanco con un Incremento Medio Anual de Dióxido de Carbono (IMACO₂) a los 10 años de edad de 32,1 y 29,35 *Mg/ha/año* y este está directamente relacionado con el Incremento Medio Anual en Volumen (IMAVol) respectivamente de 35,9 y 18,7 *m³/ha/año*. Esta comparación pudo ser realizada debido a que la cantidad de unidades muestrales en estos modelos era suficiente para calcular los valores estadísticos requeridos por la prueba, estos valores obtenidos son superiores a los reportados por Piotto (2001) con 23,51 y 10,20 *m³/ha/año* en plantaciones con las mismas especies

principales. Para los demás casos la cantidad de unidades muestrales no eran suficientes por lo que no se hizo el análisis estadístico para todos los 6 modelos, solamente se logró hacer una comparación descriptiva de los datos.

En el caso de Klinkii, la cantidad de CO₂ acumulada al año 10 es bastante baja con respecto a Chanco y Pílon, sin embargo el desarrollo de la especie principal de este modelo puede tener rangos de crecimiento altos después del año 10, tal como se mostró en las mediciones del año 13 del modelo Km42, donde en el año 10 posee 123,55 *Mg/ha* pero, en el año 13 presenta alrededor de 220 *Mg/ha* casi doblando su producción en 3 años, después de haber llegado al año 10, donde según Camacho-Herrera (2013) la especie *A. hunsteinii* comienza a mostrar un mejor crecimiento. Además si utilizamos los datos de crecimiento del modelo de Klinkii con el modelo volumétrico de Karmar et al. (2006) el resultado es muy similar en cuanto al secuestro potencial de CO₂ que esta especie podría presentar en su zona de origen.

Figura 4. Comparación de CO₂ acumulado a los 10 años para los diferentes modelos evaluados de RTT en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014



El IMACO₂ promedio para los modelos de plantaciones evaluados fue de 22,1 *Mg/ha/año*, considerando los datos medidos hasta los diez años y los proyectados a dicha edad, este dato es bastante alto si lo comparamos con los obtenidos por Biswas, Bala, y Mazumdar (2014) y Pérez-Castellon et al. (2005) con 6 y 10 *Mg/ha/año* respectivamente, sin embargo hay datos muy similares en la tasa de captura anual de

CO₂ como los reportados por Bouillet et al. (2013) y Crossman, Bryan, y Summers (2011) con 19 y 20,5 Mg/ha/año respectivamente, así como datos muy superiores (29 Mg/ha/año) obtenidos por Brenes (2012) con una especie nativa como *Carapa guianensis* en la zona atlántica de Costa Rica.

El Cuadro 5 presenta los valores de IMA del Volumen (IMAVol) para los modelos evaluados en este estudio, donde sobresale el dato de Chancho con una diferencia superior de más de 10 m³/ha/año con respecto al seguidor más cercano. Esto quiere decir que el modelo Chancho es que más volumen ha acumulado a los 10 años por tener la mejor tasa de crecimiento, sin embargo en la Figura 5 se observa como una sola especie es la que acapara alrededor del 75% del mismo.

Con respecto a la *A. hunsteinii* (modelo Klinkii) esta denota una tasa de crecimiento normal, dentro de los rangos establecidos para otras especies de *Araucaria* en el hemisferio sur del continente americano, reportadas por Nutto et al. (2005) y Ugalde y Pérez (2001), donde los rangos dados son de 10-25 y 8-24 m³/ha/año. Lo cual sitúa bastante bien el desarrollo del modelo para un turno de cosecha propuesto cercano a los 45 años con diámetros de alrededor de 50 cm (Karmar et al., 2006).

Cuadro 5. Incremento Medio Anual del Volumen obtenido en los modelos de plantaciones mixtas de RTT evaluados en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014

Modelo de Plantación	IMA (m ³ /ha/año)
Klinkii	15,80
Yale*	24,95
Pilón	18,71
Chancho	35,79
Km42	12,85
BySN*	20,85
Promedio general	21,49

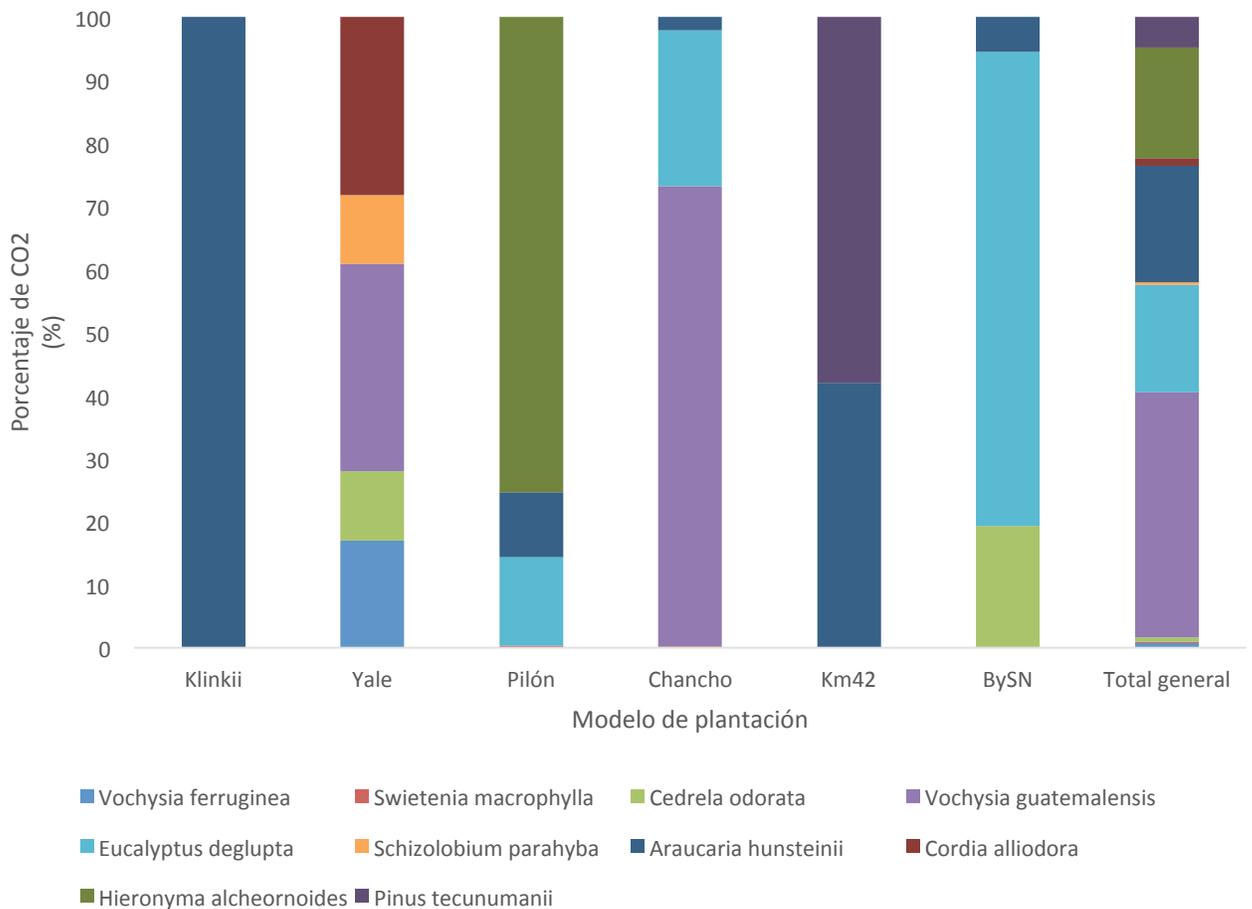
*Datos obtenidos con base en los modelos de las figuras 2 y 3.

En la Figura 5 se aprecia las proporciones por especie en las que está fraccionado el CO₂ de cada modelo de plantación y el total general al momento de realizar esta evaluación, esto implica que los modelos están en diferentes edades, pero la distribución es porcentual.

Se denota que en el modelo Chancho con casi un 75% del CO₂ está capturado por individuos de *V. guatemalensis*, esta especie también representa en el total general alrededor de un 40% del CO₂ capturado.

En la mayoría de los modelos evaluados hay una especie que ha crecido mejor que las demás presentes en el diseño de plantación mixta, es por esto que podría conllevar el riesgo de que si la especie no tiene un periodo de vida medio, la cantidad de carbono acumulado en los modelos podría perderse, al desaparecer o menguar la cantidad estos individuos, presentes en sus respectivos modelos de plantación antes de los 25 años esperados como en el caso de Chancho. Estas variaciones pueden ser observadas en el modelo Yale donde la competencia ha comenzado a regir desde edades tempranas y las especies se diferencian por sus niveles de tolerancia a las condiciones.

Figura 5. Porciones porcentuales de CO₂ capturado por cada modelo de plantación mixta de RTT evaluado en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014



Carbono orgánico en suelos

En la Figura 6 se observan las diferentes características presentadas por los suelos en las profundidades muestreadas, se observa la tendencia de que a mayor profundidad incrementa la densidad aparente de la muestra (Figura 6), similar a lo reportado por Fonseca (2008) para uno de los sitios de estudio, aunque la diferencia obtenida no es significativa, la tendencia presentada por la densidad aparente con respecto a la profundidad del suelo puede deberse a la cobertura forestal presente en la mayoría de las 81 muestras, Coleman, Isebrands, Tolsted, y Tolbert (2004) explica como el cambio de cobertura puede variar la densidad aparente del sitio pero que el cambio más significativo se da con el paso de agrícola a forestal, este cambio de cobertura fue el realizado por RTT en los sitios de establecimiento de las plantaciones muestreadas.

Se puede considerar el incremento en la cantidad de arcillas por hectárea de manera no significativa pero proporcional al aumento en la profundidad (Figura 8), con una posible relación a la densidad aparente de las muestras, ya que esta también aumenta conforme a la profundidad. Se determinó que al aumentar la cantidad de arcillas en cada profundidad el carbono podría eventualmente sufrir un proceso de lixiviación y acumularse en las capas inferiores del suelo y así presentar una mayor cantidad de carbono donde hay mayor cantidad de arcillas como lo presenta Sartori, Lal, Ebinger, y Eaton (2007), sin embargo el carbono encontrado en las profundidades muestreadas (Figura 7), no presentó diferencias significativas y la distribución obtenida por profundidad está conforme a lo mostrado por Sanchez et al. (2007), al igual que la distribución del porcentaje de Materia Orgánica (MO) obtenida por este estudio (Figura 9) y la expuesta por Fonseca (2008).

Figura 6. Densidad aparente de los suelos muestreados en los diferentes modelos de plantaciones mixtas de RTT y sus testigos en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014

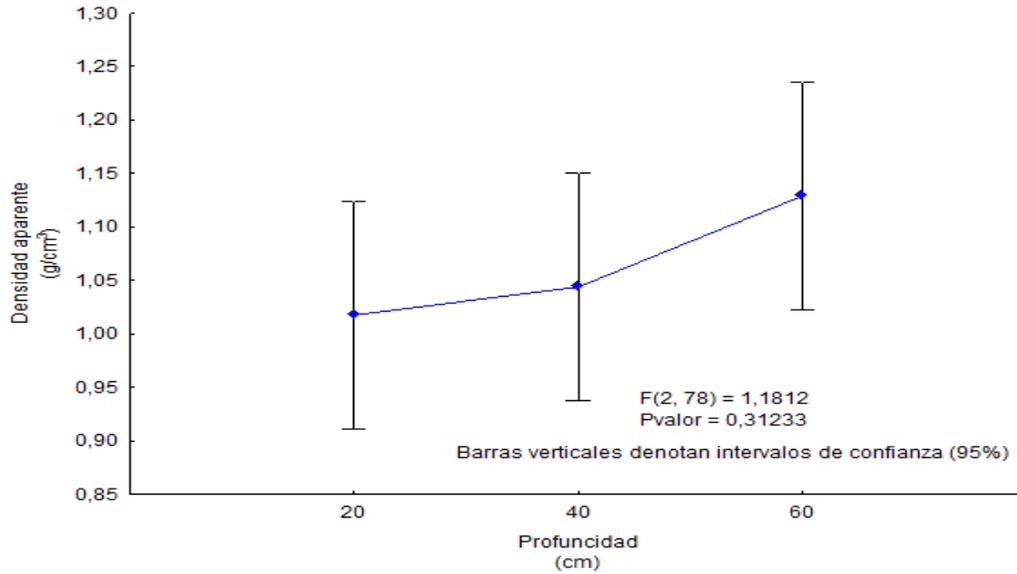


Figura 7. Carbono de los suelos muestreados en los diferentes modelos de plantaciones mixtas de RTT y sus testigos en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014

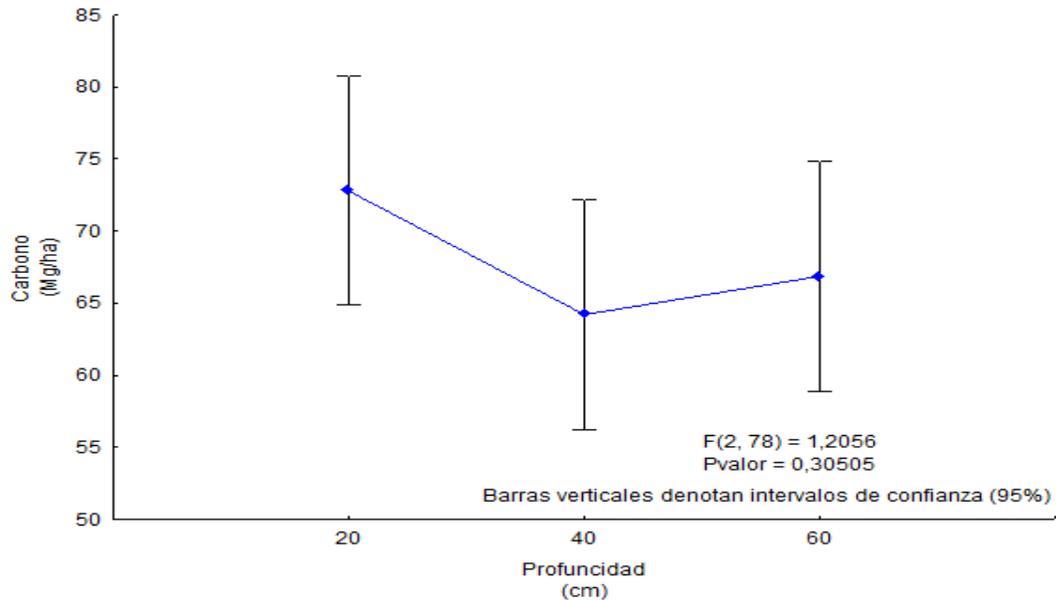


Figura 8. Arcilla de los suelos muestreados en los diferentes modelos de plantaciones mixtas de RTT y sus testigos en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014

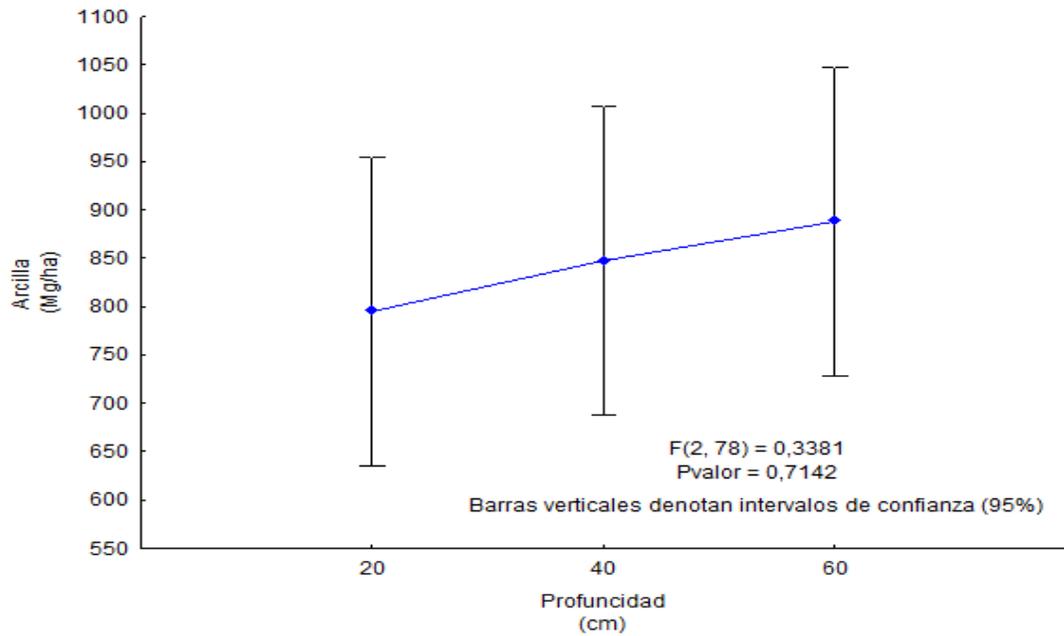
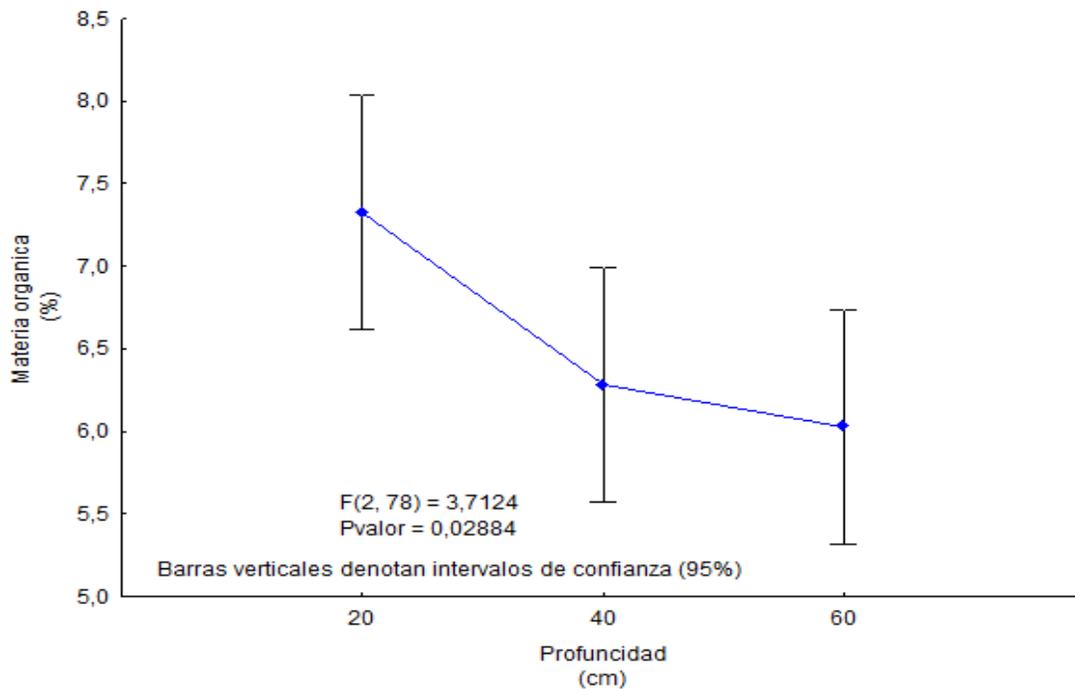
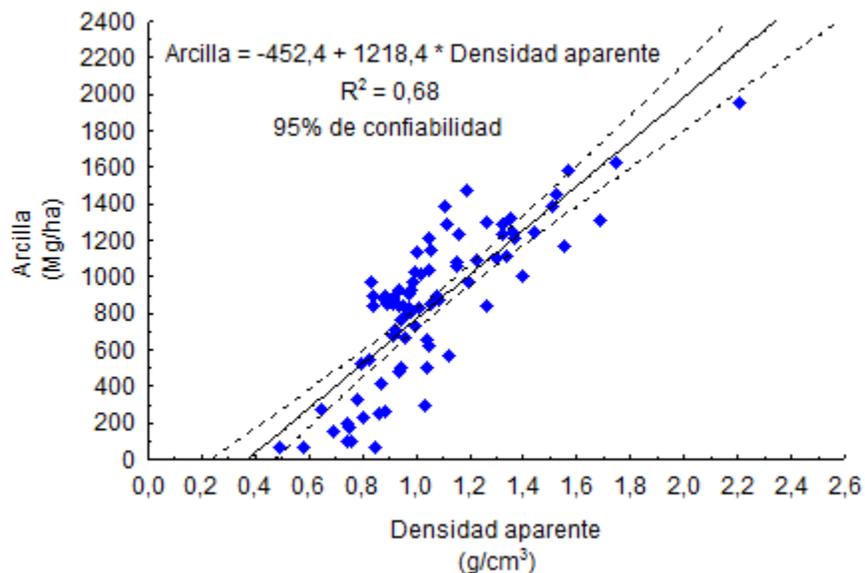


Figura 9. Porcentaje de Materia orgánica de los suelos muestreados en los diferentes modelos de plantaciones mixtas de RTT y sus testigos en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014



Se determinó una ecuación para estimar el contenido de arcilla presente en los suelos muestreados por medio de la densidad aparente, la cual explica en un 68% el comportamiento de las observaciones medidas (Figura 10). La gran mayoría de los datos encontrados se encuentran entre los valores de densidad aparente de 0,8 y 1,4 g/cm^3 .

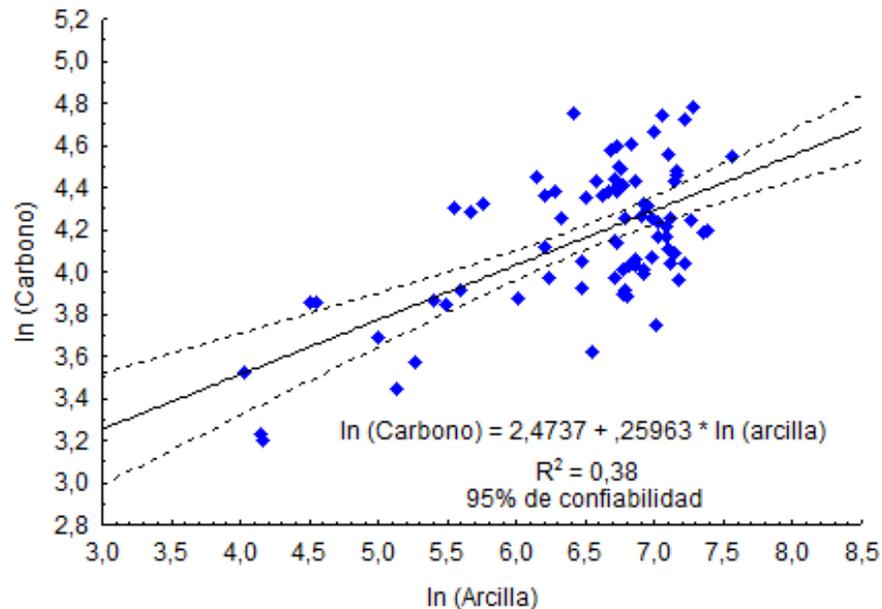
Figura 10. Correlación entre la cantidad de arcilla y la densidad aparente del suelo para los modelos de plantaciones mixtas de RTT y sus testigos evaluados en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014



La relación de carbono con la densidad aparente encontrada por Powers, Sanchez, Scott, y Page-Dumroese (2005), donde al incrementar la densidad también lo hace el carbono no tuvo un R^2 significativo, ya que apenas alcanzó a explicar un 14% de las muestras.

En la siguiente figura se muestra la relación entre la cantidad de arcillas y la cantidad de carbono expuesta por Sartori et al. (2007), donde se tomaron en cuenta las 81 muestras compuestas exploradas. El R^2 obtenido es de un 38%, pero esto podría deberse a que las clases texturales de los suelos muestreados varían y solo un 70% son arcillosos (Cuadro 6).

Figura 11. Correlación entre la cantidad de carbono y la cantidad de arcillas del suelo en los modelos de plantaciones mixtas de RTT y sus testigos evaluados en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014



En las comparaciones del carbono en suelos realizadas por sitio entre los modelos de plantación y sus respectivos testigos (Figura 12,13,14), se observa como en solo uno de los sitios hubo una diferencia significativa superior al testigo utilizado (Figura 12), la cual muestra una diferencia amplia significativamente entre el modelo de plantación Yale y su testigo (Café), en este sitio (CATIE) la densidad aparente y el contenido de arcillas dio valores altos por consecuencia mayor cantidad de carbono acumulado por área. Este valor para café es de 168,66 *Mg/ha* a 60 cm de profundidad (Cuadro 6) valor comparable con los reportados por Ávila, Jiménez, Beer, Gómez, y Ibrahim (2001) con 184,4 *Mg/ha* a 25 cm y Carvajal, Feijoo, Heimar, y Rondón (2009) con 92.33 *Mg/ha* a 30 cm.

Cuadro 6. Clases texturales del suelo y carbono total acumulado a los 60 cm de profundidad en los modelos de plantaciones mixtas de RTT y sus testigos evaluados en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014

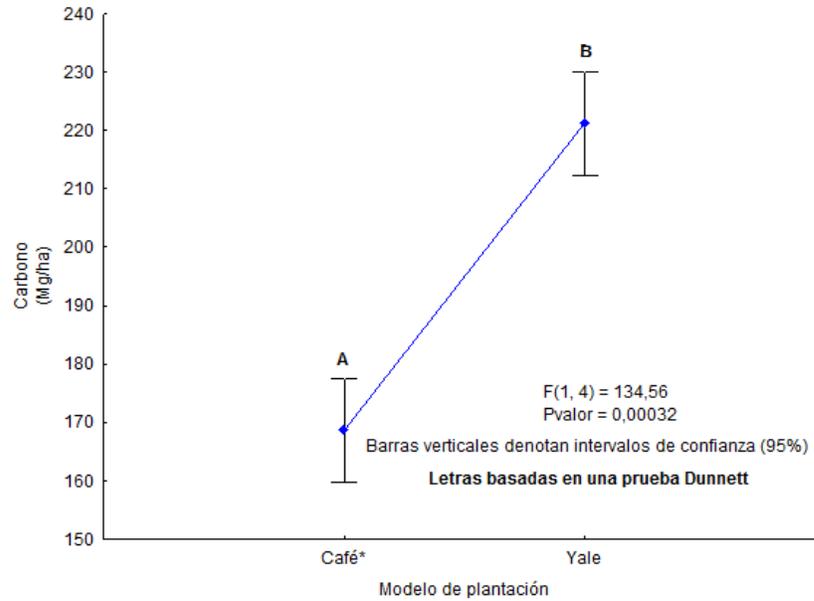
Modelo	Sitio	Clase Textural	Carbono (Mg/ha)
BySN	Delicias	Franco Arenosa Gravosa	117,88
Café*	CATIE	Arcillosa	168,66
Chancho	Delicias	Arcillosa	256,59
Klinkii	Delicias	Arcillosa	201,42
Km42	Pavones	Arcillosa	199,45
Pa*	Delicias	Franco Arcillo Limosa	225,25
PaKm42*	Pavones	Arcillosa	204,01
Pilón	Delicias	Arcillosa	240,43
Yale	CATIE	Franco Arcillo Arenosa	221,23

*Corresponden a los testigos muestreados.

En los sitios de Pavones (Figura 13) y Delicias (Figura 14) no se observaron diferencias significativas de mayores acumulaciones de carbono entre los modelos de plantación de cada sitio y sus respectivos testigos, sin embargo esto puede ser producto de cantidades de carbono muy altas en los testigos muestreados, posiblemente debido a la descomposición de las raíces de la cobertura anterior del suelo (Ludocivi, Zarnoch, y Richter, 2002), ya que según Ibrahim et al. (2007) el contenido de carbono para los pastos es alrededor de 130 Mg/ha a 1 m de profundidad, pero el carbono es muy cambiante de un sitio a otro ya que Ávila et al. (2001) reporta que en otro sitio a 25 cm de profundidad el contenido de carbono de los pastos es de 84 Mg/ha y los pastos muestreados en este estudio superan los 200 Mg/ha a los 60 cm de profundidad.

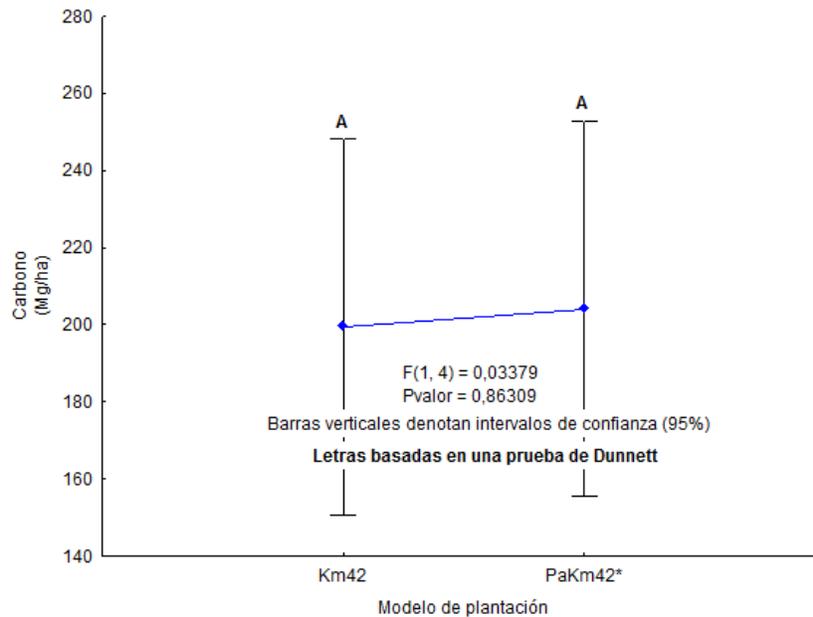
Al comparar todos los modelos y testigos muestreados se observa que hay pocas diferencias significativas (Figura 15), donde el modelo BySN es el que posee la cantidad significativamente menor de carbono en suelos, igual que en la Figura 12 donde es el único modelo del sitio Delicias que posee diferencias significativamente menores en comparación con el testigo (Pa). Esta cantidad menor de carbono podría deberse a la lixiviación de la materia orgánica por sus características de textura presentes en el Cuadro 6, ya que este modelo presenta una característica en suelos diferente a los demás, por el porcentaje de fragmentos gruesos que tiene, es un suelo Gravoso y su textura Franco Arenosa no retiene la materia orgánica de la misma forma que lo hace un suelo Arcilloso (Powers et al., 2005; Sartori et al., 2007).

Figura 12. Comparación de carbono en el suelo en el modelo de plantación mixta Yale de RTT y su testigo evaluado para el sitio CATIE de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014



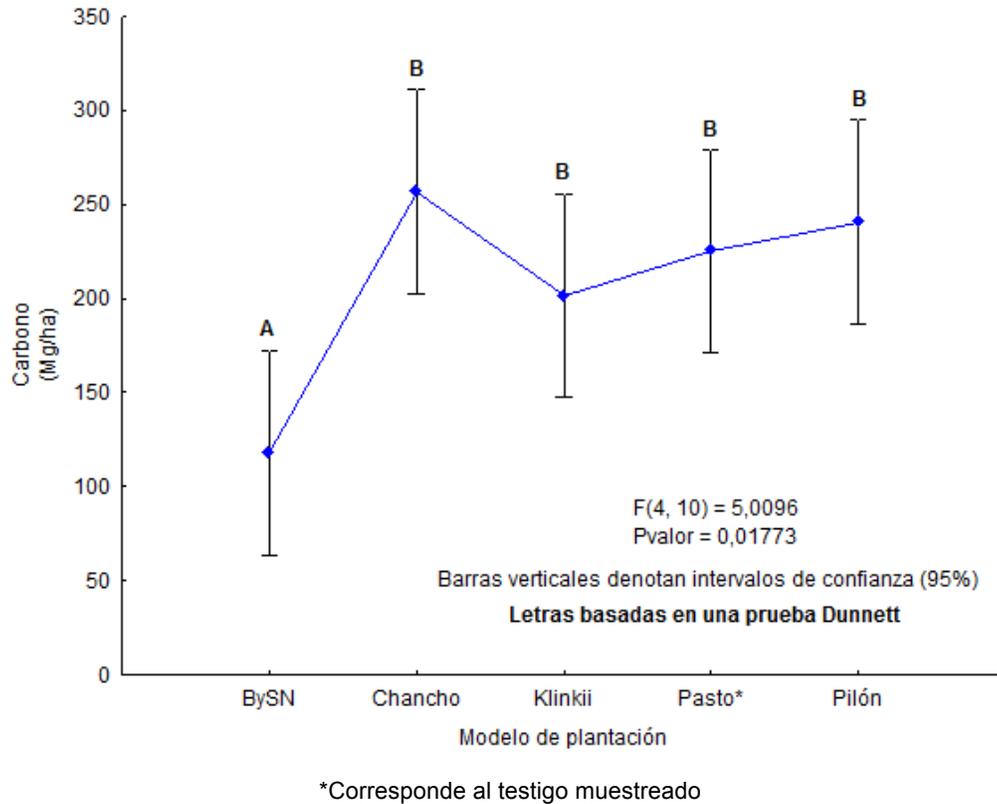
*Corresponde al testigo muestreado

Figura 13. Comparación de carbono en el suelo en el modelo de plantación mixta Km42 de RTT y su testigo evaluado para el sitio Pavones de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014



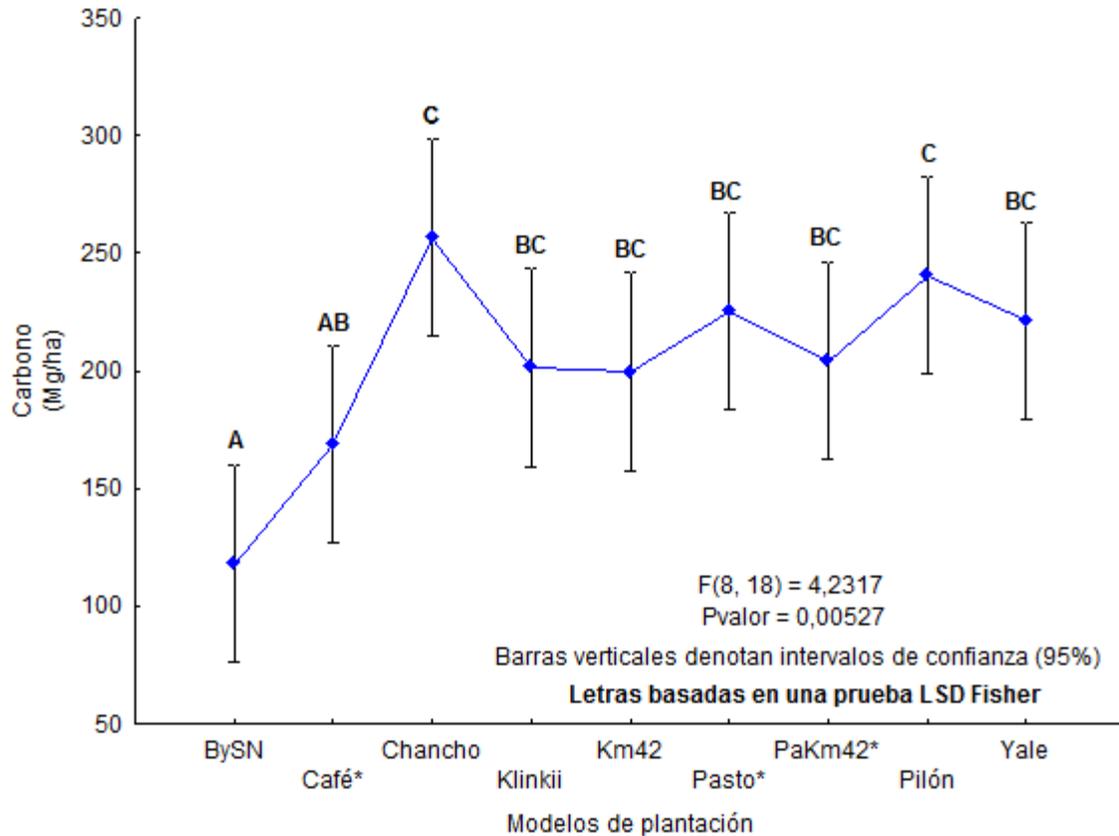
*Corresponde al testigo muestreado

Figura 14. Comparación de carbono en el suelo de varios modelos de plantación mixta de RTT y su testigo evaluado para el sitio Delicias de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014



Los tres testigos muestreados en este estudio no presentan diferencias significativas entre si y rondan los valores de alrededor de 168 *Mg/ha* para café y de más de 200 *Mg/ha* para pastos (Figura 15), los cuales son bastante altos en comparación los obtenidos por Fonseca et al. (2008) y Fonseca (2008), donde a una profundidad de 60 cm la cantidad de carbono promedio fue de 172,92 *Mg/ha* en plantaciones forestales y en cobertura de pastos a una profundidad de 30 cm encontró 73 *Mg/ha* de carbono. En el caso del primer valor es bajo en comparación a los testigos medidos de pastos en este estudio y en el segundo caso si se extrapolara a 60 cm sin considerar la pérdida de carbono por la profundidad el valor resultante estaría debajo de los testigos por más de 50 *Mg/ha*.

Figura 15. Comparaciones de carbono en el suelo en los modelos de plantaciones mixtas de RTT y sus testigos evaluados en tres sitios de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2014



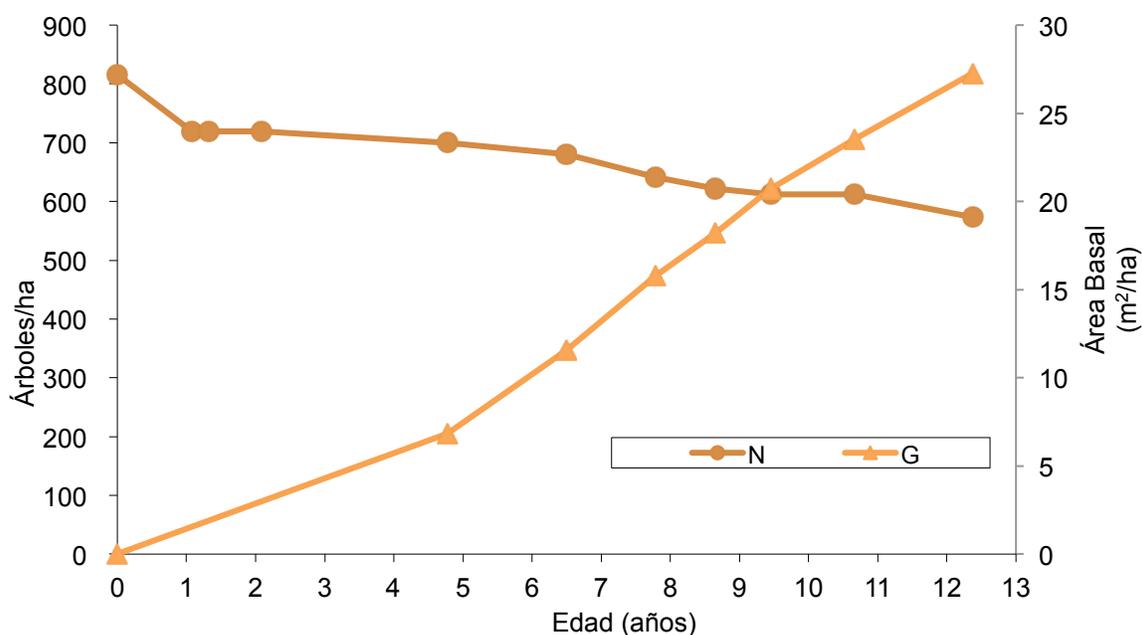
Los modelos que obtuvieron diferencias significativas por mayor cantidad de carbono fue Chancho con cerca de 30 *Mg/ha* y Pilón con alrededor de 15 *Mg/ha* por encima de la muestra más cercana, este valor los coloca con una cantidad de carbono importante en el suelo y si se compara con el carbono obtenido por Fonseca (2008) para una plantación de *V. guatemalensis* a los 2 años de edad presentaba 90 *Mg/ha* y a los 7 años 143,1 *Mg/ha*, la edad de la plantación de Chancho en este estudio es de 12 años en la cual se observa una diferencia de más de 100 *Mg/ha* en 5 años de diferencia entre el modelo muestreado en este estudio y el muestreado por el autor. Además si lo comparamos con los datos de Rodríguez y Lenin (1998) de bosque tropical natural, ellos mencionan que el bosque natural posee alrededor de 320 *Mg/ha* de carbono y en el Cuadro 6 se observa que ninguno de los modelos de plantación mixta tienen más carbono que el parámetro antes mencionado, pero están a menos de 100 *Mg/ha* de alcanzarlo, por lo que si se

mantiene el ritmo de acumulación del carbono se sobrepasaría este valor en menos de 5 años.

Recomendaciones Silviculturales

En la Figura 13 se muestra la relación que puede existir entre el crecimiento obtenido por el modelo Km42 y la cantidad de árboles existente, ya que la cantidad de árboles se ha reducido constantemente a través de los años (mortalidad), lo cual ha simulado el ir aplicando una serie de raleos de baja intensidad pero de forma continua. Esto ha permitido un buen desarrollo del indicador de Área basal (G) y a la vez ir mejorando la plantación, concentrando el crecimiento en una menor cantidad de individuos pero con un diámetro de mayor talla tal como lo mencionan Fassola et al. (2010), Ladrach (2010); Nutto et al. (2005), Phillips (2004) y Piotto (2001). Este es uno de los ejemplos en los que se pueden fundir ambos objetivos seguidos por RTT, tanto el secuestro de Carbono (producción de biomasa) como la producción de árboles maderables (buen tamaño).

Figura 16. Área basal y cantidad de árboles por hectárea registrados en el tiempo para el modelo Km42 de RTT en la zona atlántica de Costa Rica. 2014

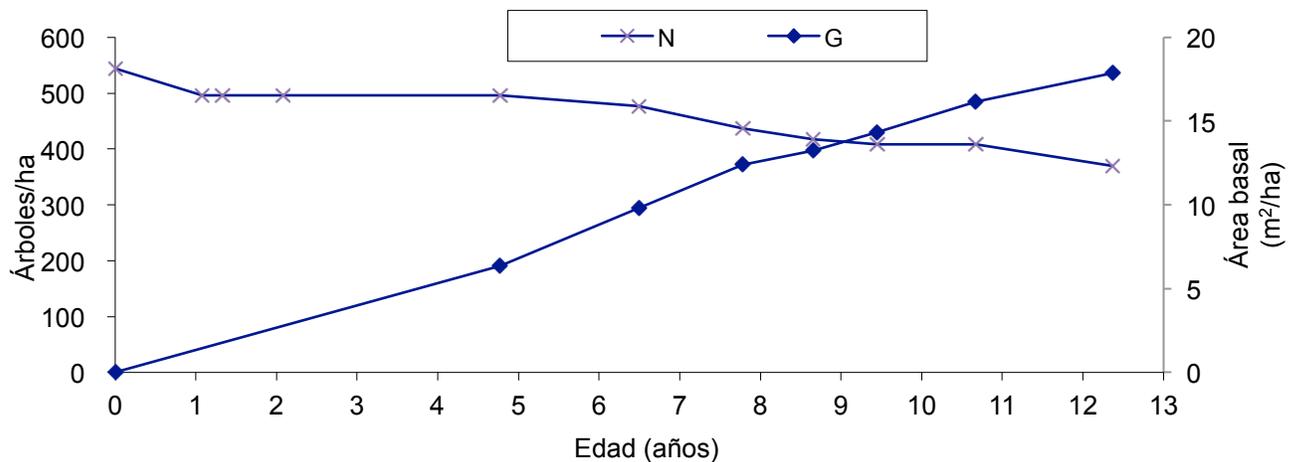


La condición especial de este sitio al mantener la mortalidad presente y casi continua ha permitido que la relación directa que menciona Piotto (2001) entre el desarrollo de G y el efecto de los raleos, sin embargo, este resultado no sugiere que un primer raleo deba ser

de baja intensidad (menor a 30%), ya que un primer raleo de baja intensidad no genera buenos resultados para mantener la tasa de crecimiento (Ladrach, 2010; Phillips, 2004).

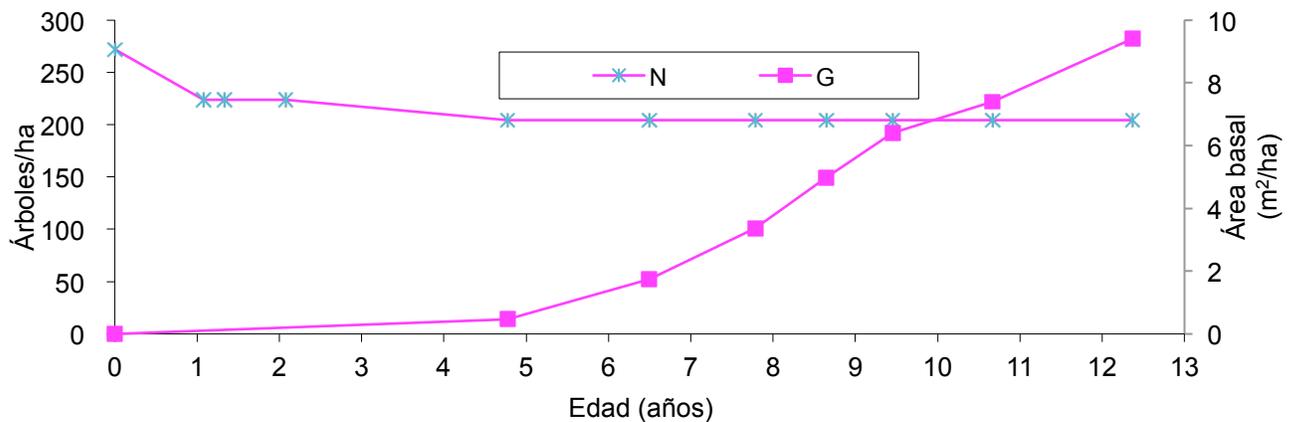
En la curva de crecimiento denotada por G en la Figura 13 se observa que en las 2 últimas mediciones la curva ha reducido su pendiente, por lo que se recomienda expresamente el realizar un raleo para mantener la tasa de crecimiento, priorizando a cortar el pino, ya que como se observa en la Figura 14 el pino es la especie que tiene en detrimento su crecimiento, debido a que la mortalidad se ha disminuido.

Figura 17. Área basal y cantidad de árboles por hectárea registrados en el tiempo para *Pinus tecunumani* en el modelo Km42 de RTT en la zona atlántica de Costa Rica. 2014



En la Figura 15 se observa que *A. hunsteinii* a pesar de haber mantenido casi de manera constante su cantidad de individuos por hectárea su crecimiento se ha incrementado a partir de los 10 años de edad. Es en esta edad (10-15 años) que Karmar et al. (2006) reporta que se realiza el primer raleo en las plantaciones de esta especie, luego de esta edad se realizan cada 10 años hasta completar el turno de corta alrededor de 45 años.

Figura 18. Área basal y cantidad de árboles por hectárea registrados en el tiempo para *A. hunsteinii* en el modelo Km42 de RTT en la zona atlántica de Costa Rica. 2014



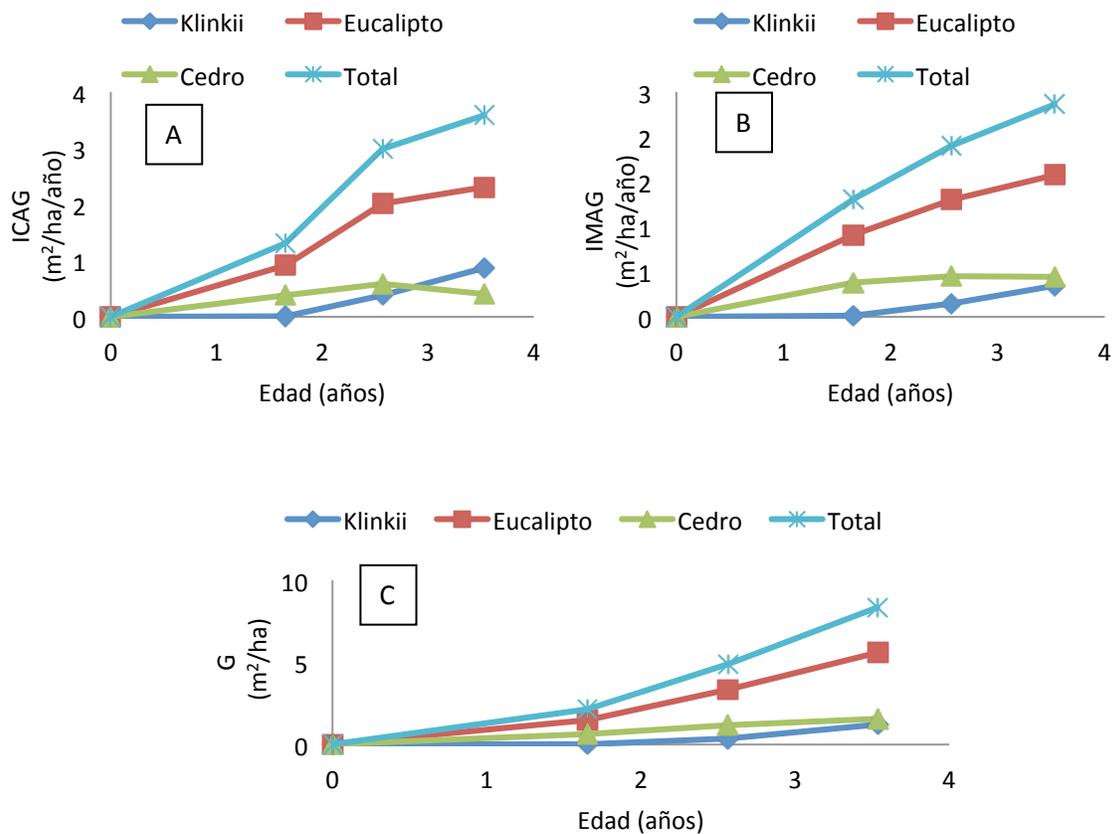
En el caso del joven y promisorio modelo de BySN se recomienda un raleo por lo bajo de un 30% de los individuos en *E. deglupta*, de esta forma se eliminarían los individuos de mala forma y además en la Figura 19-A se observa como la especie está presentando una ligera caída en su Incremento Corriente Anual de G (ICAG), este parámetro en los primeros años crece de forma acelerada hasta llegar a un máximo y luego decaer en el resto del turno de rotación (Ortiz, 2008), por lo que se recomienda impulsar el crecimiento del parámetro en la especie en el modelo hasta el máximo posible, buscando obtener al final del turno de rotación, individuos sanos de dimensiones aprovechables para madera y no muchos individuos de diámetros pequeños y susceptibles al ataque de plagas por estrés (Ladrach, 2010).

En el crecimiento mostrado por *C. odorata* en la Figura 19-A también se denota una clara caída, posiblemente debido a la competencia contra los individuos de mayor crecimiento del modelo, ya que en cuanto a la altura la diferencia con respecto a *E. deglupta* es poca, donde inclusive comparten posiciones en la clasificación de copas realizada en esta evaluación, en el crecimiento diametral si existe una diferencia, aunque estadísticamente no significativa. A pesar de la competencia dada entre las dos especies supra mencionadas, *A. hunsteinii* muestra un crecimiento lento pero constante, alcanzando al Incremento Medio Anual del área basal (IMAG) de *C. odorata* (Figura 19-B).

La aplicación de las prácticas va en pro de los dos objetivos de RTT, favoreciendo al finquero con madera de los raleos y también no haber interrumpido el crecimiento de las demás especies (*C. odorata* y *A. hunsteinii*), para de esta forma capturar la mayor

cantidad de carbono y que al aplicar un segundo raleo de intensidad moderada (30%) o la corta final del *E. deglupta*, la disminución en el carbono capturado por el modelo de plantación mixta no sea excesivamente grande en comparación al carbono acumulado en las otras 2 especies, de esta forma las otras dos especies lo recuperen en un lapso máximo de 2 años, revertiendo la relación observada en la Figura 19-C.

Figura 19. Desarrollo y parámetros de crecimiento del Área basal para el modelo BySN de RTT en la zona atlántica de Costa Rica. 2014



Para el modelo Chanco se destaca que es muy sensible al manejo que se le aplique a la especie principal *V. guatemalensis*, debido a que la mayoría del volumen y área basal que presenta pertenecen a individuos de esta especie. Esto a la vez representa un grave riesgo para la continuidad de la captura de carbono, ya que si alguna plaga ataca con alta intensidad a esta especie y mueren gran cantidad de individuos, el carbono fijado en la biomasa sería liberado a la atmosfera de nuevo. Por lo que se recomienda utilizar este modelo para generar experiencia con especies promisorias para sembrar bajo dosel, buscando obtener al menos dos especies que presenten buen crecimiento y rendimiento

en estas condiciones de luz en un periodo no mayor a 5 años, de forma que los restantes años del periodo del contrato de RTT con el finquero se obtengan individuos capaces suplir el volumen de carbono captado por *V. guatemalensis* y se pueda resembrar el sotobosque o piso inferior de la plantación, para así crear ciclos rotativos de producción de madera, manteniendo el carbono capturado por los individuos ya desarrollados.

En el modelo de plantación Pílon se muestra que *A. hunsteinii* ha mantenido constante su crecimiento previo al raleo y que a pesar de solo haber pasado 1 año después del raleo, el cambio generado en la tasa de luminosidad en los estratos inferiores del dosel, se han comenzado a detectar signos de respuesta por parte de esta especie, aumentando su IMAG. Es importante seguir de cerca esta respuesta temprana al raleo y si el comportamiento se mantiene, se recomienda hacer un nuevo raleo 5 años después del primero, para liberar más espacio y que la especie antes mencionada remplace a la especie principal en este momento (*H. alchorneoides*). Al igual que seguir depurando los individuos de *H. alchorneoides* que poseen mala forma, ya que aún luego de aplicar un primer raleo considerable el porcentaje remanente con mala forma supera el 10%.

Una recomendación con base en los datos de crecimiento de los modelos Chancho y Pílon es no utilizar Caoba (*S. macrophylla*) con especies de rápido crecimiento y copas densas, ya que se puede observar como esta especie está completamente suprimida en desarrollo, principalmente por condiciones de luz, ya que al ser una especie heliófita y al estar en los estratos bajos del dosel, las condiciones lumínicas no son las óptimas para su desarrollo.

Conclusiones

- La cantidad de especies que presente un modelo de plantación forestal mixta no influye sobre su desarrollo, al menos no en los primeros 10 años de crecimiento, según lo analizado en este estudio, si todos poseen una tasa de crecimiento similar o si se les aplica tratamiento diferenciados por especie de forma que tengan un crecimiento similar.
- El diseño de siembra debe ser realizado utilizando especies compatibles, principalmente en cuanto a los requerimientos de luz, ya que si se utilizan especies de rápido crecimiento y arquitectura amplia con especies de altos requerimientos de luz y crecimientos de mediano plazo, el desarrollo de las segundas especies va a ser precario.
- Los mejores modelos de crecimiento diamétrico global fueron BySN y Yale con un IMAAd mayor a $2,7 \text{ cm/año}$.
- El modelo con la mayor cantidad de CO_2 acumulado en biomasa a la edad establecida de 10 años fue Chancho con $320,85 \text{ Mg/ha}$.
- En la evaluación de carbono en suelos el modelo con más carbono capturado en suelos fue Chancho con $256,59 \text{ Mg/ha}$ en un suelo Arcilloso y el que menos carbono capturado tiene es BySN con $117,88$ en un suelo Franco-Arenoso-Gravoso.
- La mayoría de los suelos evaluados son de textura Arcillosa, donde, la mayor cantidad de arcillas la presentan en las profundidades de 20 a 40 y 40 a 60 cm.

- La procedencia de la semilla de *H. alchorneoides* utilizada en el modelo Pilón fue de mala calidad, ya que aún luego de aplicar el raleo, el porcentaje de individuos de mala forma es considerable.
- La especie *A. hunsteinii* puede tolerar cierto grado de sombra en una plantación forestal mixta, sin embargo, la falta de acceso a luz solar por falta de raleos en el modelo o por la arquitectura de copa de las especies aledañas en el diseño de siembra, provoca que la misma se suprima en los doseles inferiores de la plantación, poniendo en riesgo el tener un buen desarrollo silvicultural de esta especie.

Recomendaciones generales

- Realizar una evaluación de daños post raleo, de manera que se tengan parámetros de la cantidad de árboles remanentes en términos de daños y posibles ataques de plagas.
- Llevar a cabo una evaluación de calidad y comercial de las plantaciones.
- Utilizar especies de rápido crecimiento con copas poco densas tales como: *Eucalyptus deglupta*, *E. camaldulensis*, *Schizolobium parahiba*, *Jacaranda copaia*, entre otros; de manera que la tasa de luminosidad en las especies de menor altura no se vea muy afectada.
- Incrementar el área sembrada con cada modelo a un mínimo de 3 a 5 hectáreas por sitio, de forma que el número de parcelas sea un mínimo de 3 y se puedan realizar comparaciones estadísticas entre los modelos sobre la captura de CO₂.
- Repetir los modelo de Km42 y BySN, pero siguiendo el parámetro del mínimo de área y realizando un raleo pre comercial o sanitario a los 5 o 6 años, para potenciar el crecimiento del *P. tecunimani* en los primeros años, ya que luego de los 10 el crecimiento de *A. hunsteinii* se incrementa manteniendo su N (*arb/ha*).
- Implementar un raleo temprano a los 4 o 5 años previo a la primer cuantificación de dióxido de carbono secuestrado en la biomasa, de forma que el crecimiento de los mejores individuos sea potenciado y la cantidad de dióxido de carbono capturado para los donantes no tenga un diferencial negativo.
- Realizar raleos procurando no prolongar periodos sombra excesiva sobre la especie *A. hunsteinii* mayores a 5 años, para no poner en riesgo la respuesta esperada de crecimiento de la especie en las etapas de mediano y largo plazo del proyecto.
- Si se utiliza *S. macrophyla* en el diseño de siembra, emplearla principalmente en los bordes de la plantación forestal de manera que reciba la mayor cantidad de luz solar, optimizando su desarrollo.

Bibliografía

- Alice, F., Montagnini, F., y Montero, M. (2004). Productividad en plantaciones puras y mixtas de especies forestales nativas en la Estación Biológica La Selva, Sarapiquí, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 2(28), 61-71.
- Arguedas-Marín, M. (2012). La huella de carbono del Instituto Tecnológico de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 9(22), 51-59.
- Ávila, G., Jiménez, F., Beer, J., Gómez, M., y Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 8(30), 32-35.
- Biswas, S., Bala, S., y Mazumdar, A. (2014). Diurnal and seasonal carbon sequestration potential of seven broadleaved species in a mixed deciduous forest in India. *Atmospheric Environment*, 89(1), 827-834. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.03.015
- Bouillet, J.-P., Laclau, J.-P., Gonçalves, J. L. de M., Voigtlaender, M., Gava, J. L., Leite, F. P., Hakamada, R., et al. (2013). Eucalyptus and Acacia tree growth over entire rotation in single- and mixed- species plantations across five sites in Brazil and Congo. *Forest Ecology and Management*, 301(1), 89-101. doi:10.1016/j.foreco.2012.09.019
- Brenes, E. (2012). *EVALUACIÓN DE LA CALIDAD, FIJACIÓN DE CARBONO Y ESTADO DEL MANEJO SILVICULTURAL EN PLANTACIONES FORESTALES EN LA UNIVERSIDAD EARTH, GUÁCIMO, LIMÓN* (Tesis de Licenciatura). Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Camacho-Herrera, R. (2013, diciembre 10). Entrevista sobre funcionamiento de RTT.
- Carvajal, A., Feijoo, A., Heimar, Q., y Rondón, M. (2009). CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN DIFERENTES USOS DEL TERRENO DE PAISAJES ANDINOS COLOMBIANOS. *Ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 9(3), 222-235. doi:10.4067/S0718-27912009000300005

- Coleman, M., Isebrands, J., Tolsted, D., y Tolbert, V. (2004). Comparing Soil Carbon of Short Rotatio Poplar Plantations qith Agricultural Crops and Woodlots in North Central United States. *Enviromental Management*, 33(1), S299-S308. doi:10.1007/s00267-003-9139-9
- Crossman, N., Bryan, B., y Summers, D. (2011). Carbon Payments and Low-Cost Conservation. *Conservation Biology*, 25(4), 835-845. doi:10.1111/j.1523-1739.2011.01649.x
- Cuenca, P. (2009). *Evaluación de productividad en volumen y el potencial de fijación de carbono en plantaciones mixtas en la zona Caribe de Costa Rica* (Magister Scientiae). Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Esquivel, E., Rubilar, R., Sandoval, S., Acuña, E., Cancino, J., Espinosa, M., y Muñoz, F. (2013). Efecto de plantaciones dendroenergéticas en el carbono a nivel de suelo, en dos suelos contrastantes de la región de Biobío, Chile. *Revista Árvore*, 37(6), 1135 - 1144.
- FAO, M. (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010: Informe principal* (Informe general). FRA2010/041 (p 346). Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- Fassola, H., Hampel, H., Crechi, E., Henning, A., Keller, A., Pérez, V., Domecq, C., et al. (2010). *Silvicultura de bosques mixtos de especies nativas y exóticas*. Informe Técnico - Jornada de Campo (Francisco Pascual.). Posadas, Misiones, Argentina.
- Fonseca, W. (2008). *Determinación de Carbono en el suelo en la Finca Las Delicias, (sección Curtis) Guácimo, Limón* (Informe de Consultoría No. 1) (p 6). Heredia: Universidad Nacional.
- Fonseca, W., Alice, F., Montero, J., Toruño, H., y Leblanc, H. (2008). Acumulación de biomasa y carbono en bosques secundarios y plantaciones forestales de *Vochysia guatemalensis* e *Hieronyma alchorneoides* en el Caribe de Costa Rica. *Agoforesteria en las Américas*, 46(1), 57-64.

- Fonseca, W., Alice, F., y Rey, J. M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*, 30(1), 36-47.
- Galloway, G. (1993). *EL MANEJO FORESTAL: LA PODA, EL RALEO Y EL MANEJO DE REBROTOS (Conceptos Básicos)*. Técnica (Primera.). Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Guariguata, M., y Kattan, G. (Eds.). (2002). *Ecología y conservación de bosques neotropicales* (Primera edición.). Cartago, Costa Rica: Editorial tecnológica de Costa Rica (EULAC - GTZ).
- Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., Casasola, F., et al. (2007). Almacenamiento de carbono en el suelo y a biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, 45, 27-36.
- IPCC. (2000). *Land Use, Land-Use Change and Forestry* (Robert T. Watson, Ian R. Noble, Bert Bolin, N. H. Ravindranath, David J. Verardo and David J. Dokken.). Cambridge University, Inglaterra: Cambridge University Press. Recuperado a partir de <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-en.pdf>
- IPCC. (2006). *Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra*. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Eds. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K., Vols. 1-5, Vol. 4). Japón: IGES. Recuperado a partir de <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol4.html>
- Karmar, M. J., Yoshida, S., Mizoue, N., y Murakami, T. (2006). Volume table for *Araucaria hunsteini* in Bulolo Wau forest plantations of Papua New Guinea. *Kyushu J. Forestry Resources*, 3(59), 132-136.
- Ladrach, W. (2010). *Manejo práctico de plantaciones forestales en el trópico y subtrópico* (Primera edición., Vols. 1-1, Vol. 1). Cartago, Costa Rica: Editorial tecnológica de Costa Rica.

- Louman, B., Quirós, D., y Nilson, M. (2001). *Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central*. Serie Técnica. Manual Técnico (CATIE.). Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Ludocivi, K., Zarnoch, S., y Richter, D. (2002). Modeling in-situ pine root decomposition using data from a 60-year chronosequence. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(9), 1675-1684. doi:10.1139/x02-073
- Magdoff, F. (1996). *Soil organic matter fractions and implications for interpreting organic matter test*. SSSA Special Publication (Publicación de conferencia., Vol. 1). Madison, Wis., USA: Soil Science Society of America.
- Modrego, F., Melo, O., y Gilabert, H. (2006). Los bosques de Araucaria en Chile: Manejo sostenible, el costo de la sostenibilidad y las restricciones técnicas a su manejo. *Economía Agraria*, 10(1), 73-82.
- Mollinedo-García, M. (2002). Las Plantaciones Forestales: Catalizadoras de la Conservación en Latinoamérica. *Reporte del XII Congreso Forestal Mundial*. Presentado en XII Congreso Forestal Mundial, Quebec City, Canadá: FAO.
- Moreno, M., Salas, F., y Garcia, D. (2005). *Pago por Servicios Ambientales, la experiencia de Costa Rica*. (p 24). Heredia: INBio. Recuperado a partir de <http://www.inbio.ac.cr/otus/pdf/informe-servicios-ambientales.pdf>
- Murillo, O., y Badilla, Y. (2004). Calidad y valoración de plantaciones forestales. Editorial tecnológica de Costa Rica.
- Nutto, L., Spathelf, P., y Rogers, R. (2005). Managing diameter growth and natural pruning of Parana pine, *Araucaria angustifolia* (Bert.) O Ktze., to produce high value timber. *Annals of Forest Science*, 62(2), 163-173. doi:10.1051/forest:2005008

- OET, CRUSA, CATIE, y Camacho-Herrera, R. (2008). *El abastecimiento sostenible de madera en Costa Rica* (Primera edición.). San José, Costa Rica: Organización para Estudios Tropicales.
- Ortiz, E. (2008). Crecimiento y Rendimiento Forestal.
- Pérez-Castellon, E., Ruíz-Fonseca, C., Reyes, F., López-Larios, J., y Calero, C. (2005). *Potencial de plantaciones forestales y fijación de carbono en Nicaragua* (Primera., Vols. 1-1000, Vol. 1). Managua, Nicaragua: La Prensa.
- Phillips, H. (2004). Thinning to improve stand quality. *Silviculture*, COFORD, (10), 1-4.
- Piotto, D. (2001). *Plantaciones forestales en Costa Rica y Nicaragua: Comportamiento de las especies y preferencias de los productores* (Magister Scientiae). Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Powers, R., Sanchez, F., Scott, A., y Page-Dumroese, D. (2005). The North American long-term soil productivity experiment. Findings from the first decade of research. *Forest Ecology and Management*, 220(1-3), 17-30.
- Prado, E. (2012). *ESTABLECIMIENTO Y EVALUACIÓN DE UNA PLANTACIÓN FORESTAL CON MEZCLA DE ESPECIES CONSIDERANDO SU GREMIO ECOLÓGICO, EN LA VIRGEN DE SARAPIQUÍ, COSTA RICA*. (Tesis de Licenciatura). Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Rodríguez, J., y Lenin, C. (1998). *Estimación de la Cantidad de Carbono Conservado y Captado (masa aérea) por los Bosques de Costa Rica* (Segunda.). Costa Rica: USAID.
- Rojas, P. (2013, septiembre 26). FONAFIFO logró comercializar €35 millones en bonos de carbono en año y medio. *CRHoy.com*. Recuperado a partir de <http://www.crhoy.com/fonafifo-logro-comercializar-%C2%A235-millones-en-bonos-de-carbono-en-ano-y-medi/>
- Salgado, L., Dumas, M., Feoli, M., y Cedeño, M. (2013). *Mercado Doméstico Voluntario de Carbono de Costa Rica: Un instrumento hacia la C-Neutralidad*. Programa de las naciones unidas

para el desarrollo: costa rica (PNUD - MINAE.). Contracorriente Editores. Recuperado a partir de http://www.pnud.or.cr/images/stories/Informe_MDVCCR_.pdf

Sanchez, F., Coleman, M., Garten, C., Luxmoore, R., Stanturf, J., Trettin, C., y Wukkschleger, S.

(2007). Soil carbon, after 3 years, under short-rotation woody crops grown under varying nutrient and water availability. *Biomass & Bioenergy*, 2007(31), 793-801.

doi:10.1016/j.biombioc.2007.06.002

Sartori, F., Lal, R., Ebinger, M., y Eaton, J. (2007). Changes in soil carbon and nutrient pools along a

chronosequence of poplar plantations in the Columbia Plateau, Oregon, USA. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2007(122), 325-339. doi:10.1016/j.agee.2007.01.026

Statsoft. (2007). *Statistica*. Electronic Statistics Textbook. Tulsa, OK: Statsoft.com. Recuperado a partir de <http://www.statsoft.com/textbook/>.

Torres-Ortega, M. (2007). *Evaluación de plantaciones forestales mixtas en Santa Cecilia, La Cruz, Guanacaste*. (Tesis de Bachillerato). Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Ugalde, L., y Pérez, O. (2001). *Mean Annual Volmen Increment of Selected Industrial Forest Plantation Species*. Forest Thematic Papers (Primera.). Roma, Italia: Forest Resources Development Service, Forest Resources Division, FAO.

Valdivieso, R. (1997). *Crecimiento de Laurel (Cordia alliodora (Ruiz y Pavón) Oken) como componente maderable de sistemas agroforestales de Talamanca, Costa Rica y Changuinola, Panamá* (Tesis de Maestría). Turrialba, Costa Rica: CATIE.

Varmola, M., Lee, D., Montagnini, F., Saramäki, J., y Gautier, D. (2006). Funciones diversificadas de los bosques plantados. *Forests in the Global Balance – Changing Paradigms*, IUFRO World Series (Eds. Mery, G., Alfaro, R., Kanninen, M. and Lobovikov, M., Vol. 17, pp 117–136).

Viena, Austria, IUFRO. Recuperado a partir de <http://www.cifor.org/nc/online-library/browse/view-publication/publication/1827.html>

West, P. (2009). *Tree and Forest Measurement*. School of Environmental Science and Management, Southern Cross University (Segunda.). Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag.

Wormald, T. J. (1995). *Plantaciones forestales mixtas y puras de zonas tropicales y subtropicales*. Roma, Italia: FAO: Montes.

Zambrano, A., Franquis, F., y Infante, A. (2004). Emisión y Captura de Carbono en los Suelos en Ecosistemas Forestales. *Revista Forestal Latinoamericana*, 19(35), 11-20.

Zamin, N. T., Machado, S. do A., Filho, A. F., y Koehler, H. S. (2013). Effect of climate variables on monthly growth in modeling biological yield of *Araucaria angustifolia* and *Pinus taeda* in the juvenile phase. *International Journal of Forestry Research*, Hindawi, 2013(1), 1-8.

doi:10.1155/2013/646759