

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE
DE DIOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL
Y MEDIO AMBIENTE**



**ESTIMACIÓN DEL ALMACENAMIENTO ANUAL DE CARBONO EN
PLANTACIONES FORESTALES MANEJADAS DE *Tectona grandis* L.f.
MEDIANTE DENDROCRONOLOGÍA Y DENSITOMETRÍA DE RAYOS X,
EN TAHUAMANU-MADRE DE DIOS**

PROYECTO DE TESIS PRESENTADO POR:

Bachiller: YAUTA MAMANI, Edwin Dunga

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO FORESTAL Y MEDIO
AMBIENTE**

ASESOR: Ing. VELA DA-FONSECA, Mauro

**CO-ASESOR: MSc. CHAMBI LEGOAS,
Roger**

PUERTO MALDONADO, 2019

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE
DE DIOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL
Y MEDIO AMBIENTE**



**ESTIMACIÓN DEL ALMACENAMIENTO ANUAL DE CARBONO EN
PLANTACIONES FORESTALES MANEJADAS DE *Tectona grandis* L.f.
MEDIANTE DENDROCRONOLOGÍA Y DENSITOMETRÍA DE RAYOS X,
EN TAHUAMANU-MADRE DE DIOS**

PROYECTO DE TESIS PRESENTADO POR:

Bachiller: YAUTA MAMANI, Edwin Dunga

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO FORESTAL Y MEDIO
AMBIENTE**

ASESOR: Ing. VELA DA-FONSECA, Mauro

**CO-ASESOR: MSc. CHAMBI LEGOAS,
Roger**

PUERTO MALDONADO, 2019

DEDICATORIA

A Dios: Por darme la vida, su amor y su perdón.

A mi Madre, Leocadia Mamani Hilari y a mi Padre, Gabino Yauta Condori: Por sus buenos consejos y por estar siempre presentes.

A mis hermanos (as), Charles Zuimar, Judith Rocio, Daysi Adelaida y a toda mi familia. Quienes estuvieron siempre apoyándome incondicionalmente y motivándome para concluir esta etapa de mi vida.

A mi pareja, Rina Lucas. Por estar siempre conmigo en los malos y buenos momentos, por su amor, comprensión y por apoyarme a impulsar este proyecto tan anhelado.

AGRADECIMIENTO

Expresar mis agradecimientos a mi asesor: Ing. Mauro Vela Da Fonseca y co - asesor: MSc. Roger Chambi Legoas, quienes sin duda alguna decidieron apoyarme en este proceso de mi proyecto de investigación, quedo muy agradecido por compartirme sus conocimientos y experiencias.

A la “Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios”, por haberme permitido ser parte de esta importante casa de estudio, a la Facultad de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente, por darme la oportunidad de adquirir e intercambiar conocimiento con grandiosas personas, agradecer a mis docentes de carrera, al Ing. Gabriel Alarcon Aguirre, Blgo. Hugo Dueñas Linares, Ing. Edgar Rafael Julián Laime, M.Sc. Leif Armando Portal Cahuana, MSc. Liset Rodríguez Achata, quienes supieron brindarme sus conocimientos y experiencias en cada etapa de mi carrera profesional y agradecer tambien a mis compañeros (as) y amigos (as): Cristina Florez, Willian Hanco Ccahuantico y Judith Quispe Ruiz, gracias a todos por darme esa confianza y poder ser parte de este circulo profesional que conlleva grandes retos en la sociedad.

Finalmente, agradecer a los miembros del jurado de tesis: Dr. Carlos Emerico Nieto Ramos, M.Sc. Martha Olivera Condori y M.Sc. Leif Armando Portal Cahuana por formar parte de este momento tan importante y anhelado de mi vida.

PRESENTACIÓN

El presente trabajo de investigación, se presenta como parte de los requisitos para la obtención del título profesional de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.

Esta investigación nace de un análisis del contexto actual de investigaciones en servicios ambientales de las plantaciones forestales en el departamento de Madre de Dios, y el Perú. Así, se pudo identificar el problema central que justifica el desarrollo de la presente propuesta de investigación, siendo el siguiente: “¿Cuánto carbono es almacenado en el fuste de los árboles anualmente por las plantaciones forestales de *Tectona grandis*, en la Provincia de Tahuamanu, Madre de Dios?”.

Considerando la creciente expansión de las áreas plantadas con teca en la provincia de Tahuamanu, es necesario estimar y valorar los servicios ambientales como el secuestro de carbono, para que, en un mediano a largo plazo, puedan ser considerados en venta como fondos de carbono en el mercado internacional, en beneficio de los pequeños, medianos y grandes silvicultores de teca asentados en la provincia de Tahuamanu, Madre de Dios.

La presente Tesis, trae una primera aproximación del carbono almacenado en el fuste de árboles en plantaciones manejadas de Teca en Madre de Dios, utilizando técnicas de densitometría de rayos X y dendrocronología.

RESUMEN

El objetivo del presente estudio, fue estimar el almacenamiento de carbono en plantaciones de *Tectona grandis* L. f., mediante técnicas de densitometría de rayos X y dendrocronología. Se evaluó una plantación de 1 hectárea (ha) de *Tectona grandis* de 7 años de edad con densidad de 1110 árboles por ha, en Tahuamanu, Madre de Dios, en donde se muestrearon 34 árboles aleatoriamente. En cada árbol se extrajeron dos muestras de leño, conteniendo cada una dos radios, utilizando el barreno de pressler. Las muestras fueron preparadas para medición del ancho de los anillos de crecimiento y determinación de la densidad aparente mediante densitometría de rayos X. A partir de estos datos se calculó el incremento corriente anual (ICA), incremento medio anual (IMA), y rendimiento para el volumen (V), biomasa (B) y almacenamiento de carbono (C) del fuste por hectárea.

Los resultados muestran un rendimiento de biomasa de 93676 kg ha⁻¹, o un IMA-B de 13382 kg ha⁻¹ año⁻¹ en el 7° año. El ICA-B incrementó de manera constante con la edad de la plantación. La plantación evaluada tuvo una alta capacidad de almacenamiento de carbono en el fuste, de aproximadamente 44965 kg ha⁻¹, con un IMA-C de 6424 kg ha⁻¹ año⁻¹ hasta el 7° año. Así mismo, anualmente la plantación incrementa de manera constante su capacidad de almacenamiento de carbono.

Las plantaciones forestales de *Tectona grandis* podrían almacenar 78840 kg ha⁻¹ y 82230 kg ha⁻¹ de carbono en el fuste de los árboles, hasta la edad de 15 y 20 años respectivamente.

Palabras clave: Biomasa; Stock de carbono; Secuestro de carbono; Anillos de crecimiento; Incremento corriente anual; Incremento medio anual, Rendimiento.

ABSTRACT

The objective of the present study was to estimate the storage of carbon in plantations of *Tectona grandis* L. f., using X-ray densitometry and dendrochronology techniques. One hectare (ha) plantation of 7-year-old *Tectona grandis* with a density of 1110 trees per ha was evaluated in Tahuamanu, Madre de Dios, where 34 trees were randomly sampled. In each tree, using the press drill, two wood samples were extracted, each containing two radio. The samples were prepared to measure the width of the growth rings and determination of the wood density by X-ray densitometry. From these data, the current annual increment (CAI), mean annual increment (MAI), and yield, for the volume (V), biomass (B) and carbon storage (C) of the stem per hectare, were calculated.

The results show a biomass yield of 93676 kg ha⁻¹, or an MAI-B of 13382 kg ha⁻¹ year⁻¹ in the 7th year. The CAI-B increased steadily with the age of the plantation. The evaluated plantation had a high storage capacity of carbon in the stem, of approximately 44965 kg ha⁻¹, with a MAI-C of 6424 kg ha⁻¹ year⁻¹ until the 7th year. Likewise, every year the plantation constantly increases its carbon storage capacity.

The forest plantations of *Tectona grandis* could store 78840 kg ha⁻¹ and 82230 kg ha⁻¹ of carbon in the stems, up to the age of 15 and 20 years respectively.

Keywords: Biomass; Carbon storage; Carbon sequestration; Growth rings; Annual current increment; Mean annual increment, Yield.

INTRODUCCIÓN

El cambio de uso del suelo y su impacto en el clima global, son factores importantes que hacen que sea necesario mejorar nuestro conocimiento del ciclo del carbono (C) en los ecosistemas forestales. Los bosques pueden desempeñar un papel importante en la captura y almacenamiento de C de la atmósfera, mitigando así las emisiones de CO₂ (Houghton 2005). Las plantaciones tropicales son de particular interés debido a su crecimiento relativamente rápido.

Son conocidos los beneficios de los proyectos de forestación y reforestación en los trópicos, sin embargo, los costos iniciales de la repoblación forestal y la reforestación pueden ser elevados, dificultando la realización de inversiones. Mientras tanto, los beneficios de los servicios ecosistémicos, como el secuestro de carbono y la conservación de la biodiversidad aún son infravalorados (Cavatassi 2004). El reciente Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y las iniciativas voluntarias brindan oportunidades para la generación y venta de créditos de carbono (Derwisch et al. 2009).

El carbono puede almacenarse en la producción de madera de alta calidad, como la teca (*Tectona grandis* Linn. F.), una de las especies de frondosas tropicales más importantes en el mercado internacional de madera de alta calidad. La fuerte demanda de madera de teca ha llevado al establecimiento de plantaciones dentro y fuera de sus países de origen (Kollert y Kleine 2017).

En Perú, las mayores extensiones de plantaciones de teca se concentran en Madre de Dios y Huánuco. En Madre de Dios, las plantaciones de teca están siendo instaladas por la Empresa Reforestadora Amazónica S.A (RAMSA) desde el 2010, a lo largo del eje carretero Iberia – Iñapari, con adecuado manejo silvicultural y buen material genético, que consiste principalmente en semillas seleccionadas y clones altamente productivos provenientes de Brasil y Costa Rica. Las plantaciones instaladas son propiedad de pequeños, medianos y grandes inversionistas. Hasta el año 2018 la superficie plantada con *Tectona grandis* fue de 800 ha a 1000 ha.

Estas plantaciones, además de su importancia como fuente de madera de alta calidad, proveen servicios ambientales como el secuestro de carbono atmosférico. La literatura científica menciona, por ejemplo, que en Costa Rica las

plantaciones de teca de entre 8 a 47 años pueden acumular en su fuste una biomasa de entre 70 y 221 Mg ha⁻¹ (Pérez y Kanninen 2003), equivalente a 35 y 110 Mg ha⁻¹ de C. En Perú, debido al reciente desarrollo de la silvicultura y escasas áreas plantandas, aún no existen antecedentes sobre la cantidad de carbono que las plantaciones de teca pueden almacenar. No obstante, en un escenario donde esta especie se consolide como una de las especies más importantes para la reforestación y producción de madera, la estimación del stock de carbono secuestrado es importante para valorización económica de los servicios ambientales.

Además, conocer la cantidad de carbono secuestrado anualmente por las plantaciones, es importante para desarrollar proyecciones del carbono que almacenarían las plantaciones hasta la edad de cosecha. De modo que pueda ser valorizado en el mercado mundial del carbono y sujeto a venta, en el marco del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) del Protocolo de Kyoto.

Para este tipo de estudios, es imprescindible la reconstrucción del crecimiento de los árboles y la estimación de la densidad del leño en cada anillo de crecimiento. Para este tipo de estudios, la dendrocronología se muestra como una herramienta fundamental. El análisis de los anillos de crecimiento, brinda información del crecimiento secundario para inúmeras aplicaciones (Worbes 1995; Tomazello-Filho, Roig y Zevallos-Pollito 2009). Investigaciones previas en teca, han mostrado que la especie forma anillos de crecimiento anuales bien diferenciados (Dié et al. 2015; Hlaing, Teplyakov y Thant 2014; Venegas-González 2013), permitiendo determinar el incremento medio anual e incremento corriente anual. Complementariamente, la densitometría de rayos X es un moderno método que permite conocer la variación radial de la densidad de la madera del fuste en alta resolución, por tanto, la densidad en cada anillo de crecimiento es calculada con alta precisión. Estudios previos destacan que el uso de la dendrocronología y densitometría de rayos X son herramientas alternativas altamente precisas para la estimación de la biomasa formada en cada año de crecimiento (Ortega Rodriguez et al. 2018).

El presente estudio, por tanto, proporcionará valiosa información para cuantificación del carbono almacenado por las plantaciones de teca, como base para la valorización en bonos de carbono.

SUMARIO

RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V
INTRODUCCIÓN	VI
CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	13
1.1. Descripción del problema.....	13
1.2. Formulación del problema.....	14
1.3. Objetivos	15
1.4. Variables	15
1.5. Operacionalización de variables.....	17
1.6. Hipótesis:	18
1.7. Justificación.....	19
1.8. Consideraciones éticas.....	19
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	21
2.1. Antecedentes de estudios	21
2.2. Marco teórico.....	27
2.2.1. Descripción de la especie	27
2.2.2. Dendrocronología	30
2.2.3. Densitometría de rayos x para medición de la densidad de la madera ...	31
2.2.4. Estimación de los Stocks de Carbono	33
2.3. Definición de términos.....	34
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	35
3.1. Tipo de estudio.....	35
3.2. Diseño del estudio	35
3.3. Población y Muestra.....	35
3.3.1. Población	35
3.3.2. Muestra.....	35
3.4. Métodos y técnicas.....	36
3.4.1. Lugar de estudio	36
3.4.2. Procedimiento de colecta de baguetas radiales del tronco.....	39
3.4.3. Preparación de las baguetas radiales para demarcación de los anillos de crecimiento.....	41
3.4.4. Medición de los anillos de crecimiento.....	43
3.4.5. Reconstrucción del crecimiento secundario mediante la medición de los anillos de crecimiento.	45
3.4.6. Determinación de la biomasa y stock de carbono del fuste de las plantaciones para cada año de crecimiento.	46
3.5. Tratamiento de los datos	49
CAPÍTULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	50

4.1. Extracción de información de crecimiento secundario a partir de los anillos de crecimiento.....	50
4.1.1. Características de los anillos de crecimiento	50
4.1.2. Densidad aparente y básica del leño de los anillos de crecimiento...	54
4.1.3. Incremento en diámetro, área basal y volumen.....	57
4.2. Biomasa y carbono almacenado del fuste en la plantación forestal.....	66
4.3. Modelo de predicción del almacenamiento de carbono	70
CONCLUSIONES.....	77
SUGERENCIAS	78
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
ANEXOS.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diámetro promedio a la altura del pecho (superior), e incremento medio anual en volumen del rodal. Fuente: Jerez-Rico y Coutinho (2017).	22
Figura 2. Crecimiento volumétrico de una plantación de clon (a) de Isla Salomon (Clon SI) frente a plantación de semillas en Tangará da Serra, Mato Grosso, Brasil; b) crecimiento del diámetro observado y c) volumen por árbol de plantaciones clonales vs. semillas en Floresteca, MT. Fuente: Jerez-Rico y Coutinho (2017).....	24
Figura 3. Mapa de ubicación del lugar de estudio.	37
Figura 4: Mapa de localización de los árboles muestreados	38
Figura 5. (A) Plantacion de <i>Tectona grandis</i> . (B) Limpieza y Medicion de circunferencia del árbol. (C) Posicion para la extracción de bagueta radial con el barreno de Pressler. (D) El barreno se inserta en el árbol a la altura del dap, girando para penetrar hasta la médula. (E) Se extrae la muestra radial. (F) La muestra radial se coloca en una cañita plastica para su conservación. Fuente: Elaboracion propia.	40
Figura 6. (A) Selección y agrupación de muestras. (B) Fijación de muestras en soportes. (C) Proceso de lijado. (D) Limpieza de muestras. (E) Demarcación del límite de los anillos de crecimiento. (F) Materiales utilizados. (G) Escaneo de muestras. Fuente: Elaboracion propia.....	42
Figura 7: Demarcación y medicion del límite de los anillos de crecimiento de <i>Tectona grandis</i> con el programa Image-Pro Plus.....	44
Figura 8. Fijación en soportes (A) y corte de muestras para análisis por Densitometría de Rayos X (B).	47
Figura 9. Fotografía del equipo Densitómetro de Rayos X de la ESALQ-USP, en Piracicaba-Brasil	47
Figura 10. Delimitación de los anillos de crecimiento mediante la variación radial de la densidad del leño. La distancia entre los límites de los anillos define el ancho del anillo de crecimiento.	48
Figura 11. Detalle del límite de los anillos de crecimiento (indicado por las flechas negras) de <i>Tectona grandis</i> "teca" en plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.....	50
Figura 12. Detalle de un anillo de crecimiento falso y uno verdadero, en árboles de <i>Tectona grandis</i> "teca" en plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.	52
Figura 13. Resultado del análisis de control de calidad de la datación cruzada, realizado con el programa COFECHA.	53
Figura 14. Series de crecimiento y serie maestra, mostrando los patrones de crecimiento radial de los árboles a traves del tiempo.	53
Figura 15. Sección transversal de una muestra radial del leño extraído de un árbol de <i>Tectona grandis</i> "teca", de plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios. Debajo de la imagen del leño, se muestra el perfil de densidad del leño en el sentido médula-corteza.....	54

Figura 16. Perfil radial de densidad aparente de un árbol de <i>Tectona grandis</i> "teca", de plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.....	55
Figura 17. Distribución de la variación de la densidad básica de leño anual de árboles de <i>Tectona grandis</i> "teca", en plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.....	56
Figura 18. Distribución del incremento corriente anual del diámetro a la altura del pecho (ICA-dap).....	57
Figura 19. Curva del incremento corriente anual del dap (ICA-dap) y curva del incremento medio anual del dap (IMA-dap), de los árboles de <i>Tectona grandis</i> "teca" de plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.	58
Figura 20. Rendimiento del dap en árboles de <i>Tectona grandis</i> "teca" de plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.....	59
Figura 21. Distribución del incremento corriente anual del área basal (ICA-g), en árboles de <i>Tectona grandis</i> "teca" de plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.	60
Figura 22. Curvas de incremento corriente anual del área basal (ICA-g) e incremento medio anual del área basal (IMA-g) de árboles de <i>Tectona grandis</i> "teca" en plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.	61
Figura 23. Rendimiento en área basal, en árboles de <i>Tectona grandis</i> "teca" en plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.....	62
Figura 24. Distribución del incremento corriente anual del volumen (ICA-V) de plantaciones de <i>Tectona grandis</i> "teca", en Tahuamanu, Madre de Dios.....	63
Figura 25. Incremento corriente anual del volumen (ICA-V) e incremento medio anual del volumen (IMA-V) de plantaciones de <i>Tectona grandis</i> "teca", en Tahuamanu, Madre de Dios.	64
Figura 26. Rendimiento de volumen por hectárea, de plantaciones de <i>Tectona grandis</i> "teca", en Tahuamanu, Madre de Dios.....	65
Figura 27. Distribución del incremento corriente anual de la biomasa del fuste por hectárea (ICA-B) (A), e incremento corriente anual del carbono almacenado del fuste por hectárea (ICA-C) (B), en plantaciones forestales de <i>Tectona grandis</i> "teca", Tahuamanu, Madre de Dios.....	67
Figura 28. Curvas de incremento corriente anual (ICA-B) e incremento medio anual (IMA-B) de la biomasa del fuste por hectárea (A); e incremento corriente anual (ICA-C) e incremento medio anual (IMA-C) del carbono acumulado en el fuste por hectárea (B), en plantaciones forestales de <i>Tectona grandis</i> "teca", Tahuamanu, Madre de Dios.....	69
Figura 29. Rendimiento de Biomasa, y rendimiento de carbono almacenado en el fuste por hectárea, en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> "teca", en Tahuamanu, Madre de Dios.....	70
Figura 30. Modelo Gompertz, ajustado a las observaciones de rendimiento de carbono de 34 árboles muestreados en una plantación forestal de <i>Tectona grandis</i> "teca", en Tahuamanu, Madre de Dios.....	72

Figura 31. Curva de rendimiento de carbono simulada mediante el modelo de Gompertz hasta los 20 años de edad de la plantación de <i>Tectona grandis</i> "teca", en Tahuamanu, Madre de Dios.	73
---	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de las variables.....	17
Tabla 2: Circunferencia y coordenadas de los árboles muestreados.....	91
Tabla 3. Base de datos	92

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema

Actualmente, a nivel de Latinoamérica, Costa Rica destaca como el país con mayor experiencia en plantaciones de teca, donde se han producido diversas investigaciones relacionadas a su manejo silvicultural, crecimiento, calidad de la madera, y servicios ambientales; además de ser uno de los países americanos con mayor extensión de áreas plantadas de teca (De Camino, Alfaro y Sage 2002; Moya, Bond y Quesada 2014; Ugalde Arias 2013). Sin embargo, otros países de la cuenca amazónica también son considerados aptos para el cultivo de la teca, debido a las características de sus suelos y clima tropical (Bebarta 1999; Jerez-Rico y Coutinho 2017). Concretamente la Amazonía peruana tiene alta potencialidad para el desarrollo de la silvicultura de la teca.

En los últimos años, los inversionistas privados, a través de los servicios de RAMSA, establecieron varias plantaciones de teca en la provincia de Tahuamanu, Departamento de Madre de Dios, para la producción de madera. Estas plantaciones han sido instaladas en suelos degradados por ganadería y agricultura. Actualmente estas plantaciones tienen una edad de entre 1 a 10 años, y se espera que, dentro de 5 a 10 años, cuando los árboles tengan entre 15 a 20 años con un dap mínimo de 40 cm, se realicen las primeras cosechas de madera.

Se conoce que estas plantaciones son valorizadas sólo por la madera que producen, dejándose de lado otros importantes servicios ambientales como el secuestro de carbono y conservación de la biodiversidad (Pérez y Kanninen 2003). Esto mismo ocurre en prácticamente la mayoría de las plantaciones forestales instaladas en el territorio peruano, debido a muchos factores, tales como la falta de estudios precisos de estimación anual del carbono almacenado y su valorización, así como el desconocimiento de los procedimientos para comercialización de los bonos de carbono, entre otros. Las tasas de

almacenamiento de carbono esperado y el rendimiento esperado son piezas críticas de información que los interesados necesitan para utilizar el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) (Kraenzel et al. 2003a). La generación de esta información parte de conocer el incremento corriente anual de biomasa producida por las plantaciones en cada año. Los estudios clásicos de estimación de carbono, generan información puntual del carbono almacenado hasta una cierta edad de la plantación. Si bien esta información es importante, no permite conocer con precisión la variación del almacenamiento de carbono en cada año de crecimiento de los árboles, haciendo más complicado las proyecciones de la tasa de almacenamiento y rendimiento de carbono en un horizonte de tiempo determinado. Así, estudios para estimación del carbono almacenado anualmente son necesarios. Sin embargo, medir el carbono almacenado anualmente requeriría de muchos años de monitoreo del crecimiento y de la densidad de la madera formada, tornándose muy complejo y altamente costoso. Ante esa dificultad, el uso de técnicas de reconstrucción del crecimiento y determinación de la variación radial de la densidad de la madera, son imprescindibles para la estimación del incremento corriente anual de la biomasa de las plantaciones. Propiciamente, técnicas como la dendrocronología y densitometría de rayos X han demostrado alta precisión para este tipo de estudios (Ortega et al. 2018).

1.2. Formulación del problema

En el contexto del problema planteado, nos formulamos las siguientes preguntas de investigación:

¿Cómo varía anualmente el almacenamiento de carbono en el fuste, en las plantaciones forestales de *Tectona grandis*, en Tahuamanu, Madre de Dios?

¿Cuánto es la capacidad de almacenamiento de carbono en el fuste, en las plantaciones forestales de *Tectona grandis*, durante un periodo de rotación de 15 y 20 años?

1.3. Objetivos

Objetivo General

Estimar el almacenamiento de carbono en plantaciones forestales de *Tectona grandis* L. f. de Tahuamanu, Madre de Dios.

Objetivos Específicos

OE1: Determinar la capacidad de producción de biomasa del fuste anualmente en plantaciones forestales de *Tectona grandis* L. f.

OE2: Determinar la capacidad de almacenamiento de carbono del fuste en plantaciones forestales de *Tectona grandis* L. f.

OE3: Construir un modelo de predicción del almacenamiento de carbono, con buena calidad de ajuste, para proyectar la capacidad de almacenamiento de carbono a un periodo de rotación de 15 y 20 años.

1.4. Variables

Variables dependientes:

- **Incremento corriente anual de biomasa (ICA-B):** Es el incremento de biomasa del fuste por hectárea, producido a un determinado año, calculado a partir del ICA-V, la densidad básica del leño del anillo de crecimiento, y densidad del rodal, medido en kilogramos por hectárea (kg ha^{-1}).
- **Incremento corriente anual de carbono (ICA-C):** Es la masa de carbono almacenado por hectárea en el fuste de los árboles de la plantación, en un determinado año, calculado a partir del ICA-B, medido en kilogramos por hectárea (kg ha^{-1}).
- **Incremento medio anual de biomasa (IMA-B):** Es el ICA-B dividido por la edad de plantación, expresa la biomasa promedio por año de la plantación hasta una edad terminada ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$).
- **Incremento medio anual de carbono (IMA-C):** Es el ICA-C dividido por la edad de plantación, expresa el carbono almacenado en promedio por año en la plantación hasta una edad terminada ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$).

- **Rendimiento de biomasa:** Es la biomasa acumulada hasta cierta edad (kg ha^{-1}), calculado mediante una sumatoria de los ICA-B. Para fines prácticos se entiende como la biomasa total producida hasta una edad determinada.
- **Rendimiento de carbono:** Es el carbono acumulado hasta cierta edad (kg ha^{-1}), calculado mediante una sumatoria de los ICA-C. Para fines prácticos se entiende como la capacidad total de almacenamiento de carbono hasta una edad determinada.

Variables independientes:

- **Edad:** Edad de la plantación, medida a través del conteo de los anillos de crecimiento.
- **Densidad aparente (DA):** Es la densidad del leño del anillo (g cm^{-3}), medido a un contenido de humedad del 12%, mediante densitometría de rayos X.
- **Densidad básica del anillo de crecimiento (DB):** Es la masa fresca por unidad de volumen seco (g cm^{-3}), del leño comprendido dentro del anillo de crecimiento. Es calculado a partir de la densidad aparente (DA) medido por densitometría de rayos X.
- **Densidad básica (DB):** Es la densidad del leño del anillo (g cm^{-3}), cuya masa es medida en estado anhidro, y cuyo volumen es medido en estado saturado. En el presente estudio esta variable fue calculada a partir de los valores de densidad aparente, mediante una ecuación de regresión.
- **Diámetro a la altura del pecho (dap):** Es el diámetro del fuste medido a la altura de 1,3 m desde la superficie del suelo.
- **Incremento corriente anual del área basal (ICA-g):** Es el incremento en área basal producido en un determinado año, medido a la altura de 1,3 m desde la superficie del suelo. Se calcula a partir de la medición del área del anillo, en m^2 .
- **Ancho de los anillos de crecimiento:** Expresa el incremento radial del tronco en mm.

- **Rendimiento en área basal:** Es la sumatoria de los incrementos en área basal, o el área basal del árbol a una determinada edad.
- **Incremento corriente anual del volumen (ICA-V):** Es el incremento del volumen producido a un determinado año, calculado a partir del ICAG, la altura comercial y el factor de forma.

1.5. Operacionalización de variables

En la Tabla 1, se detalla la operacionalización de las variables.

Tabla 1. Operacionalización de las variables

Objetivos	Variables	Unidad de medida
Determinar la capacidad de producción de biomasa del fuste anualmente en plantaciones forestales de <i>Tectona grandis</i> L. f.	Incremento corriente anual de biomasa del fuste (ICA-B)	kg ha ⁻¹
	Incremento medio anual de la biomasa del fuste (IMA-B)	kg ha ⁻¹ año ⁻¹
	Rendimiento de biomasa	kg ha ⁻¹
	Incremento corriente anual del área basal (ICA-G)	m ²
	Incremento corriente anual del volumen (ICA-V)	m ³
	Densidad aparente del anillo (DA)	g cm ⁻³
	Densidad básica del anillo (DB)	g cm ⁻³
	Densidad del rodal	árbo. ha ⁻¹
	Incremento corriente anual de carbono del fuste (ICA-C)	kg ha ⁻¹
	Incremento medio anual de carbono del fuste (IMA-C)	kg ha ⁻¹ año ⁻¹
Determinar la capacidad de almacenamiento de carbono del fuste en plantaciones forestales de <i>Tectona grandis</i> L. f.	Rendimiento de carbono	kg ha ⁻¹
	Incremento corriente anual del área basal (ICA-G)	m ²
	Incremento corriente anual del volumen (ICA-V)	m ³
	Densidad aparente del anillo (DA)	g cm ⁻³
	Densidad básica del anillo (DB)	g cm ⁻³
	Densidad del rodal	árbo. ha ⁻¹

Construir un modelo de predicción del almacenamiento de carbono, con buena calidad de ajuste, para proyectar la capacidad de almacenamiento de carbono a un periodo de rotación de 15 y 20 años	Variables dependientes	Rendimiento de carbono	kg ha ⁻¹
	Variables independientes	Edad	años

1.6. Hipótesis:

H1: La capacidad de producción de biomasa del fuste, en las plantaciones forestales de *Tectona grandis*, incrementa con la edad de la plantación, es decir los árboles producen anualmente mayor biomasa a mayor edad.

H2: La capacidad de acumulación de carbono del fuste, en las plantaciones forestales de *Tectona grandis*, incrementa con la edad de la plantación, es decir los árboles secuestran anualmente mayor cantidad de carbono a mayor edad.

H3: El modelo de predicción del almacenamiento de carbono se ajusta bien a las observaciones, y permite estimar con precisión el almacenamiento de carbono del fuste en plantaciones de 15 y 20 años de edad.

1.7. Justificación

Esta investigación se justifica porque proporcionará información sobre la capacidad de acumulación anual de carbono de las plantaciones forestales de teca. Información disponible de este tipo en Perú es inexistente. Durante los últimos 10 años la superficie plantada con teca ha venido incrementándose, hasta alcanzar entre 800 y 1000 ha plantadas en Tahuamanu, Madre de Dios. Las perspectivas futuras, apuntan que las plantaciones de teca se expandan aún más, en los suelos degradados por agricultura y ganadería. Las extensas áreas plantadas con teca, proveen servicios ambientales como el almacenamiento de carbono, que no han sido valorizados. El potencial de almacenamiento de carbono de la teca se vuelve relevante a este respecto. Se conoce que las plantaciones jóvenes pueden capturar cantidades relativamente mayores de carbono, mientras que una plantación madura puede actuar como un depósito. Especies de rotación larga como la teca tienen un largo período de secuestro de carbono en comparación con las especies de corta duración como el Eucalipto y Pino, y tienen la ventaja adicional de que la mayor parte de la madera de teca se usa en interiores ampliando aún más el período de secuestro de carbono. En este contexto, el presente estudio es muy importante, como herramienta para la estimación y proyección del potencial del stock de carbono de las plantaciones instaladas en Tahuamanu, de manera que se promueva su inclusión en los bonos de carbono mediante el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), en beneficio de los pequeños, medianos y grandes inversionistas forestales del Tahuamanu, Madre de Dios.

1.8. Consideraciones éticas

En el aspecto ambiental, tratándose de plantaciones forestales, no se generarán impactos negativos durante la ejecución de las actividades de campo, pues los trabajos de muestreo se realizarán en algunos rodales de las plantaciones, que fueron establecidos en áreas degradadas, sin conexión con los bosques primarios, ni cursos de agua.

Por otro lado, en el aspecto social, para los muestreos de los árboles se contará con la autorización escrita de la Empresa RAMSA.

La ejecución del presente trabajo de investigación, se ceñirá al método científico para la obtención de resultados confiables, y a metodologías ya estandarizadas para este tipo de estudios, descritas por Brien y Zuidema (2003); Locosselli et al. (2017); Worbes (1995); Ortega et al. (2018).

Finalmente, la redacción se realizará teniendo en cuenta las disposiciones del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, citando y referenciando adecuadamente los enunciados correspondientes con las normas de citación ISO, así como respetando los derechos de autoría.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudios

2.1.1. Productividad de *Tectona grandis*

Según Jerez-Rico y Coutinho (2017), *Tectona grandis* “teca” es considerado un árbol de crecimiento medio a rápido que puede alcanzar grandes dimensiones; aunque se han reportado árboles de más de 2 m de diámetro y una altura de 60 m, estos son casos excepcionales. En las plantaciones de semillas, los árboles dominantes pueden alcanzar un promedio de 70 cm de diámetro y 40 m de altura en 50-80 años, pero a los 40 años, los árboles más grandes rara vez superan los 35 m de altura y 60 cm de diámetro. En buenos sitios y con prácticas apropiadas de establecimiento y manejo, en las etapas jóvenes el crecimiento en altura es rápido (3 a 6 m año⁻¹), disminuyendo después de los 15 años. El incremento del diámetro alcanza un máximo de 3-5 cm a los 3 a 6 años de edad. El volumen de los árboles aumenta exponencialmente durante varios años, pero el volumen máximo de vástagos de la madera en rollo raramente sobrepasa los 2,5 m³ por árbol (50 cm de dap y 20 m de tronco limpio).

A nivel de rodal, las restricciones de tamaño-densidad imponen límites al tamaño máximo y al número de árboles que un sitio puede admitir (por ejemplo, el área basal del soporte puede alcanzar un máximo de alrededor de 55 m² ha⁻¹).

La productividad del rodal de teca generalmente se evalúa estimando el rendimiento total en volumen (m³ ha⁻¹) o los incrementos anuales medios en volumen (es decir, el volumen total del rodal dividido por la edad de plantación [IMA-V en m³ ha⁻¹ año⁻¹]). Para la teca, el IMA-V de 15-20 m³ ha⁻¹ año⁻¹ se considera excelente; mientras que, el IMA-V por debajo de 6 m³ ha⁻¹ año⁻¹ se encuentra en el límite inferior para las plantaciones rentables (Kollert y

Cherubini 2012). Sin embargo, en las plantaciones de teca, el IMA-V debe interpretarse con precaución e ir acompañado de información adicional, al menos del dap promedio del árbol y la edad, ya que los rendimientos de volumen se ven afectados por la densidad del rodal. El alto IMA-V puede asociarse con pequeños diámetros de árbol promedio, es decir, grandes incrementos de volumen por hectárea son fáciles de obtener en plantaciones sin desbastar (Figura 1).

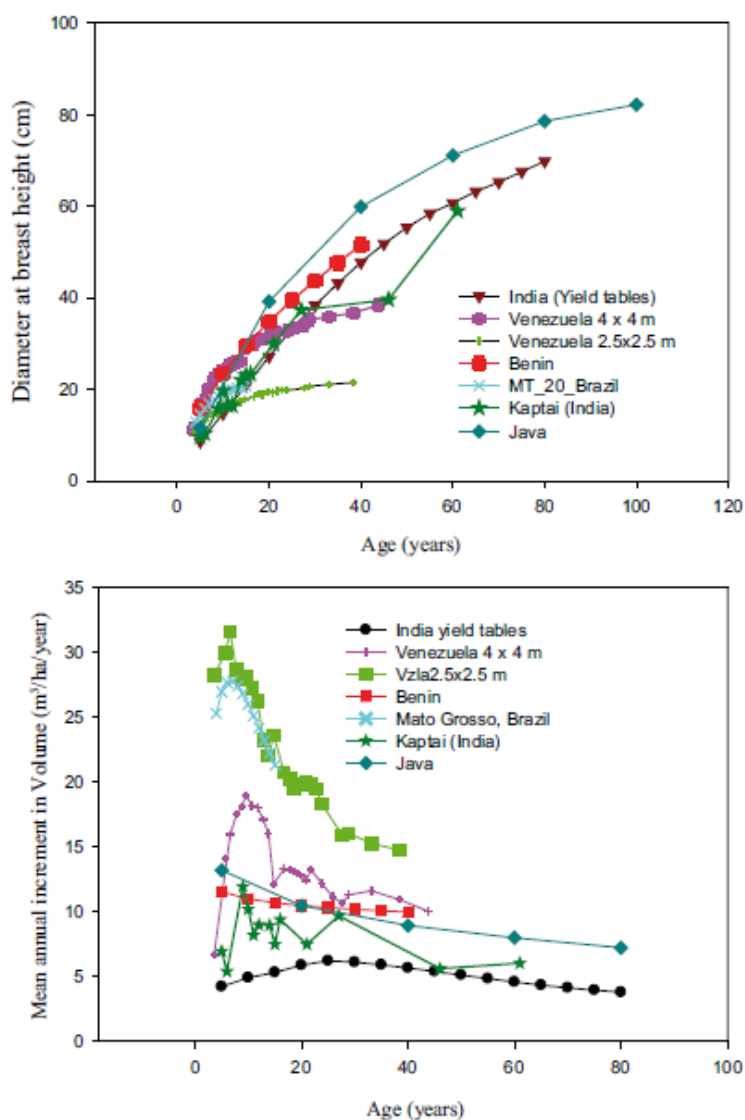


Figura 1. Diámetro promedio a la altura del pecho (superior), e incremento medio anual en volumen del rodal. Fuente: Jerez-Rico y Coutinho (2017).

En Costa Rica, las estimaciones de productividad de las plantaciones de teca son estimada en 11,3 a 24,9 m³ ha⁻¹ año⁻¹ al final de una rotación de 30 años, acumulando un volumen total de 268–524 m³ ha⁻¹ (Pérez y Kanninen 2005).

Además, la estimación del volumen y la predicción del volumen de madera en pie (m³) depende de la medición, el muestreo y los problemas estadísticos. Se recomienda precaución para llegar a conclusiones en ausencia de una evaluación de expertos. Por ejemplo, los comerciantes usan escalas de volumen (Hoppus ton, sistema Beretton) para troncos cortados con dimensiones específicas y estándares de calidad de la madera, e incluyen descuentos por volumen para la calidad de la madera, tamaño de la corteza, proporciones de defectos y forma del fuste. Dichas especificaciones de productos rara vez se consideran cuando se informan los rendimientos de la madera en pie (Midgley et al. 2015).

Mayores cifras de productividad son más esperadas en las plantaciones clonales que en las plantaciones de semillas (Figura 2). Los resultados del crecimiento de clones en todo el mundo han sido revisados por Ugalde Arias (2013), que informó un IMA-V de 32 m³ ha⁻¹ año⁻¹ para plantaciones clonales de México y Brasil. En Mato Grosso, Brasil, las plantaciones clonales de 10 años de edad muestran incrementos de diámetro anual de más de 3 cm / año. Además, estos clones muestran un crecimiento de altura excepcional y grandes volúmenes estacionarios debido a una mayor homogeneidad del rodal.

Smit y Oestreich (2014) compararon el crecimiento en volumen de plantaciones clonales y de plántulas de hasta 9 años de edad y de una plantación clonal manejada de 17 años en Tangará da Serra-Mato Grosso, Brasil (Figura 2). Encontraron que el diámetro promedio de la plantación clon, el volumen por árbol y el índice de área foliar fueron superiores a los de la semilla en un 64%, 146% y 10%., Respectivamente. Además, los árboles de clon fueron más resistentes a la roya de la teca (*Olivea tectonae*) que el material de plántulas normal, mostraron una tendencia a la autopoda y un sistema de raíces superficiales más denso. En plantaciones comerciales de 12 años en Brasil (Floresteca 2016) los clones mostraron un crecimiento de

diámetro superior (14%) y volumen por árbol (40%) que las plantaciones de semillas en condiciones de sitio similares (Figura 2). Los resultados de las plantaciones clonales de teca son muy prometedores; sin embargo, se requiere un plan de monitoreo global para evaluar el desempeño clonal bajo condiciones operacionales desde un punto de vista biológico y financiero, y para determinar bajo qué condiciones las plantaciones clonales deberían preferirse a las plantaciones de semillas tradicionalmente mejoradas.

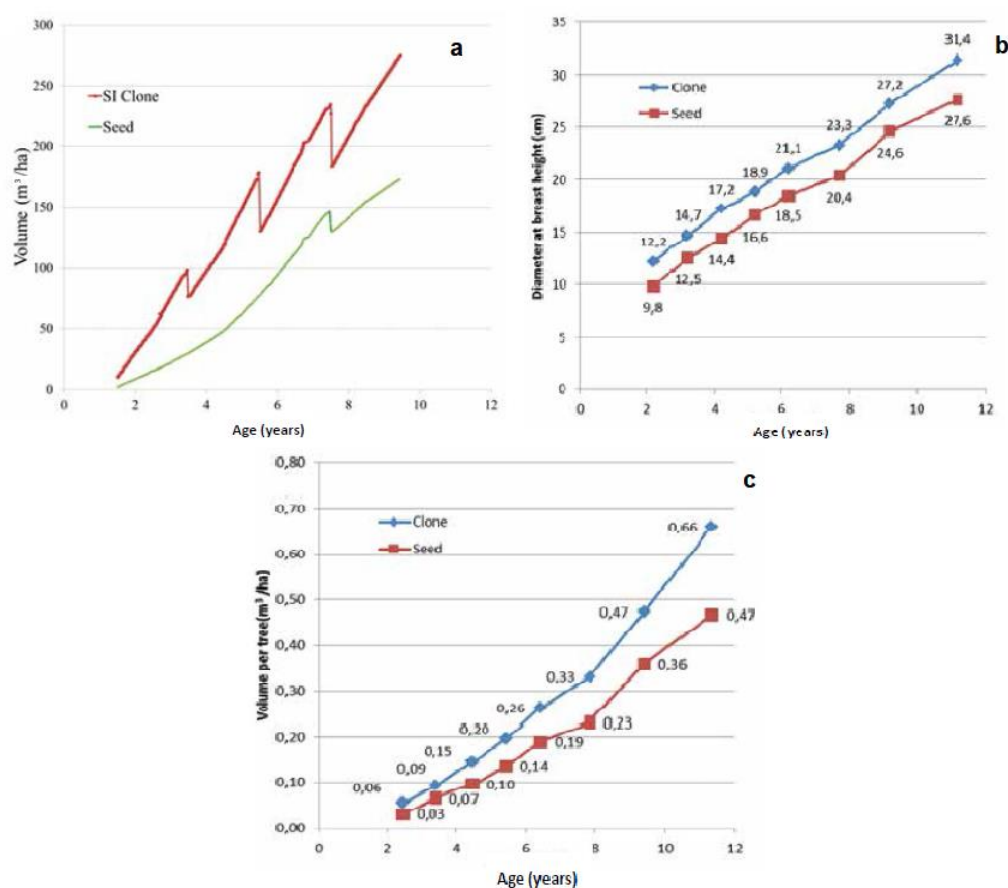


Figura 2. Crecimiento volumétrico de una plantación de clon (a) de Isla Salomon (Clon SI) frente a plantación de semillas en Tangará da Serra, Mato Grosso, Brasil; b) crecimiento del diámetro observado y c) volumen por árbol de plantaciones clonales vs. semillas en Floresteca, MT. Fuente: Jerez-Rico y Coutinho (2017).

2.1.2. Crecimiento en diámetro de *Tectona grandis*, mediante anillos de crecimiento

Investigaciones en el continente asiático, muestran que los árboles de *Tectona grandis* de plantaciones, de entre 15 a 25 años de edad, logran incrementos de diámetro de 12,4 mm año⁻¹, mientras que, en árboles más

jóvenes de 9 a 12 años de edad el incremento es de 7,6 mm año⁻¹ (Hlaing, Teplyakov y Thant 2014). En árboles viejos de 155 años el incremento en dap se reduce hasta alcanzar 4,4 mm año⁻¹ (Tint 1980); asimismo, otro estudio en árboles de entre 82 a 119 años de edad, revela un incremento medio del dap de 2,4 a 4,8 mm año⁻¹ (Kyaw 2003).

En África, *Tectona grandis* registra mayor crecimiento en dap durante los primeros 5 años de edad, con 18,4 y 40,4 mm (Dié et al. 2015).

En Sudamérica, este tipo de estudios es escaso. En Brasil, teca creciendo en bosques de Mata Atlántica, tiene una tasa de crecimiento de 10 mm año⁻¹ a los 35 años de edad (Venegas-González 2013).

2.1.3. Stock de carbono en plantaciones forestales de *Tectona grandis*

Estudios de biomasa y stock de carbono en plantaciones forestales de teca son escasos. En México, en plantaciones de 15 años de edad pueden almacenar anualmente 27,3 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Lopez 2017). Valores muy inferiores fueron registrados en otro estudio desarrollado en México, donde se encontró una capacidad de almacenamiento de carbono en torno a 3,5 Mg ha⁻¹ año⁻¹, en plantaciones de 8 años (Gallegos et al. 2009).

Por otro lado, en Guatemala, el carbono almacenado en plantaciones de teca con edades de 15 y 15 años, fue de 108,36 Mg ha⁻¹ y 151,37 Mg ha⁻¹ respectivamente (Gerardo, Estuardo y Alvarado 2018).

En Panamá, en plantaciones de 20 años, en la edad de cosecha, la capacidad de almacenamiento de carbono en la parte aérea asciende a 17,6 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Kraenzel et al. 2003a). En contraste, plantaciones muy jóvenes de 1 y 10 años de edad, pueden acumular 2,9 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y 4,07 Mg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente; mediante una ecuación de regresión se proyecta que éstas plantaciones a la edad de 20 años podría almacenar 9,6 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Derwisch et al. 2009).

En el continente asiático, específicamente en la India, lugar de procedencia de la teca, se han realizado innumerables investigaciones respecto a la estimación del stock de carbono secuestrado por las plantaciones de teca. Un reciente estudio revela que la teca almacena aproximadamente 2 Mg ha⁻¹

anualmente (Kaul, Mohren y Dadhwal 2010). El mismo autor realiza una comparación con la capacidad de almacenamiento de otras especies, siendo que la teca almacena menor carbono comparado con *Populus* ($8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) o *Eucalyptus* ($6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Kaul, Mohren y Dadhwal (2010) muestra también que, al incrementar el tiempo de rotación, el stock de carbono por año disminuye considerablemente, por ejm, con una rotación de 60 años el stock de carbono es de $3,7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, disminuyendo hasta $1,7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en una rotación de 150 años. En otro estudio en la India, se encontró que plantaciones de teca de 50 años secuestran aproximadamente $3,62 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Sreejesh KK et al. 2013). En la región del Himalaya, en plantaciones jóvenes de 1, 5, 11, 18 24 y 30 años, el stock de carbono varía entre $0,94 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $5,99 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Jha 2005)

2.2. Marco teórico

2.2.1. Descripción de la especie

a) Contexto general de *Tectona grandis*

Tectona grandis L.f “teca”, es a nivel mundial la especie de latifoliada tropical más apreciada, siendo hoy en día cultivada en más de 60 países de clima tropical/subtropical. Cuando es adulta, la calidad de su madera es comparable a las maderas más finas como *Swietenia macrophylla* y *Cedrela odorata*, con la ventaja de que el crecimiento de *Tectona grandis* es mucho más rápido (Pandey y Brown 2000). Su expansión ha venido de la mano de sustanciales mejoras en el establecimiento y manejo de plantaciones puras, abarcando el mejoramiento del material vegetativo, selección de sitio, preparación del suelo, instalación, densidad, operaciones de cosecha y utilización de la madera (Kollert y Kleine 2017).

La teca (*Tectona grandis* L.f.) es reconocida por sus cualidades físicas y estéticas como una de las maderas duras más importantes y valiosas del mundo (Keogh 2009). Aunque solo ocupa una posición marginal en el volumen de producción y comercio mundial de madera, la teca junto con la caoba (*Swietenia macrophylla*), el cedro rojo (*Cedrela odorata*) y el palo rosa indio (*Dalbergia sissoo*) son las maderas duras tropicales más demandadas para el mercado de lujo y para aplicaciones de servicio pesado.

La teca se utiliza para la construcción de barcos y muebles de yates, construcción y ferrocarriles para trabajos pesados, muebles de clase alta, componentes decorativos para la construcción, carillas, pisos y postes de electricidad para líneas de transmisión (Kollert y Cherubini 2012). En 1896 Brandis atribuyó el alto valor de mercado de la teca a su excelente durabilidad en climas tropicales y su resistencia al ataque de termitas y hongos, y alabó a la teca ya que es fácil de trabajar, no se dobla ni se parte, toma un hermoso brillo y puede flotar en el agua en contraste con muchas otras maderas duras pesadas de calidad comparable (Brandis 1986). Para muchos países tropicales, la teca representa la mejor oportunidad para producir madera de calidad y, por lo tanto, es de gran importancia para sus economías forestales

(Keogh 2009). En los últimos años, el establecimiento y la gestión de los bosques de teca plantados han atraído grandes inversiones del sector empresarial en América Latina, África y Asia (Kollert y Cherubini 2012).

Los bosques naturales de teca se encuentran en solo cuatro países del mundo: India, Laos, Myanmar y Tailandia. Los sitios adecuados para el crecimiento vigoroso de la teca se limitan a las zonas tropicales alrededor del ecuador por debajo de 1000 metros de altitud, con una precipitación anual superior a 1 500 mm, y suelos fértiles, profundos y bien drenados (Kollert y Cherubini 2012). Los antiguos reyes de Myanmar y Tailandia consideraban que la teca era un árbol real y la colocaban bajo una rigurosa proclamación y protección reales. Según Kollert y Cherubini (2012) en el siglo XIX, India era el principal productor mundial de teca. Bajo el gobierno colonial británico, se exportaron grandes cantidades de teca a Europa, principalmente para la construcción naval y muebles de lujo. Después de la independencia de la India en 1947, los recursos forestales se volvieron cada vez más amenazados, hasta que el gobierno central de la India decidió prohibir la tala de teca desde 1980. La producción de madera de la India cayó así bruscamente y fue reemplazada por importaciones masivas. En la actualidad, la industria india de la teca depende en gran medida de las importaciones procedentes de Myanmar, África occidental y América Latina.

Desde la década de 1980, los suministros de madera de teca de los bosques naturales han comenzado a disminuir y la teca se ha cultivado cada vez más en los bosques plantados en Asia tropical, África, América Latina y Oceanía. Habiendo sido introducidos en Java, Indonesia, probablemente entre cuatrocientos y seiscientos años atrás, los desafíos para crecer y sustentar los bosques de teca se comprenden mejor allí que en la mayoría de otras maderas duras tropicales (Pandey y Brown 2000). Indonesia ha establecido extensas plantaciones de teca gestionadas por la empresa forestal estatal Perhutani, y muchos países tropicales han seguido el ejemplo bajo propiedad pública, corporativa y privada, incluidos los agricultores de la comunidad agrícola.

b) Anillos de crecimiento de *Tectona grandis*

Los anillos de crecimiento de los árboles de teca presentan características anatómicas asociadas a las variaciones de forma, tamaño y distribución de los vasos, parénquima radial y axial (Venegas-González 2013)

Los vasos son importantes para la caracterización y delimitación de los anillos de crecimiento del leño, distintos a simple vista y agrupados, formando anillos de crecimiento semi-porosos (Tomazello-Filho y Botosso 2001).

En la sección transversal del leño, los anillos de crecimiento se caracterizan por los vasos de mayor diámetro, formados al inicio del período vegetativo (leño inicial) siguiendo los vasos de menor diámetro / menor frecuencia, formados al final del período vegetativo (leño tardío) (Venegas-González 2013). Los anillos de crecimiento son demarcados por el parénquima marginal asociado a los vasos de mayor diámetro, observándose tilosis y sustancia blanca (fosfato de calcio) en el lumen de los vasos (Pumijumnong, Eckstein y Sass 1995). Castro (2011), caracterizando los anillos de crecimiento de los árboles de teca, confirmó la formación del leño inicial (vasos de mayor diámetro y frecuencia) y tardío (menor diámetro y frecuencia), además de banda terminal de parénquima axial con coloración más clara en relación a las fibras.

En la estación favorable al crecimiento, con mayor disponibilidad de luz y agua, se forman los anillos de crecimiento más anchos, además de la formación de anillos de crecimiento falsos por la variación anormal del clima (Priya y Bhat 1998).

En Brasil, los árboles de teca presentan mayor crecimiento en diciembre a febrero (mayor pluviosidad), con mayor actividad cambial, y menor crecimiento en septiembre a noviembre (menor pluviosidad) con menor actividad cambial (Cardoso 1991).

El leño de los árboles de *Tectona grandis* no muestra uniformidad radial (medula-cáscara) con el leño inicial de los primeros años de menor densidad básica, menor longitud de fibra y mayor ángulo microfibrilar; los anillos de crecimiento del leño adulto tienen mayor masa específica y estructura

anatómica característica (Moya et al. 2009). Castro (2011) dividió el leño de los árboles de *Tectona grandis* en posiciones: posición 1 (anillos de crecimiento iniciales, posición 2 (anillos de crecimiento al 50% del radio) y posición 3 (anillos de crecimiento finales del leño), en la posición 1 los anillos de crecimiento son más anchos, con leño temprano de mayor anchura que el tardío, en la posición 2 los anillos de crecimiento son más estrechos, leño temprano-tardío de anchura similar, en la posición 3 los anillos de crecimiento tienen anchura constante, leño temprano más estrecho en relación al tardío.

2.2.2. Dendrocronología

La dendrocronología es la ciencia encargada de la datación y el estudio de los anillos de crecimiento anuales de los árboles y arbustos leñosos. Cuando el crecimiento radial de los árboles se ve afectado por un factor limitante común, las variaciones de los anillos de los árboles se replican en los rodales forestales y la datación cruzada o la coincidencia de patrones de estas series pueden proporcionar un registro preciso de las tendencias de crecimiento anual. Estos datos pueden usarse para fechar eventos o describir variaciones en las condiciones ambientales. Debido a la resolución anual y la amplitud espacial de los registros de anillos de árboles, los análisis dendrocronológicos proporcionan archivos confiables para fechar eventos pasados y reconstrucción paleoambiental (Coulthard y Smith 2013).

La datación por anillos de árboles es posible debido al comportamiento fisiológico de los árboles que crecen en climas estacionales. En estos entornos, el crecimiento radial de los árboles se produce en incrementos anuales, o "anillos de crecimiento", cuyas estructuras anatómicas varían en respuesta a las variables ambientales fluctuantes. Aunque existen diferencias entre las estructuras anatómicas de las angiospermas y las gimnospermas, ambos árboles se utilizan comúnmente en dendrocronología (Coulthard y Smith 2013).

Según Coulthard y Smith (2013), "el crecimiento radial del árbol ocurre cuando las células del cambium vascular se dividen. Durante los meses de invierno, el cambium está inactivo y la producción de células cesa hasta que las condiciones primaverales más cálidas y / o más húmedas reactivan la

actividad del cambium (Fritts 1976). Las células del xilema, formadas al comienzo de la temporada, conocidas como "madera temprana", tienden a ser grandes y de paredes delgadas. Con el inicio de las condiciones de verano más calurosas y / o más secas, la actividad cambial se ralentiza y se producen células de xilema más pequeñas y de paredes gruesas ("madera tardía"). Es la marcada diferencia entre las células de la madera temprana y la tardía lo que hace posible discernir los incrementos de crecimiento anual".

"Aunque los anillos de los árboles generalmente se forman en cada temporada de crecimiento, un árbol puede no desarrollar un anillo anual o el anillo puede ser discontinuo alrededor de la circunferencia del tallo del árbol (es decir, falta un anillo; Speer, 2010). A veces se producen bandas de crecimiento intra-anual, o anillos falsos, si las condiciones de crecimiento estacionales se deterioran temporalmente (Hoffer y Tardif 2009). Los anillos falsos suelen ser fácilmente detectables, ya que la transición de un tipo de célula a otro es gradual. Por el contrario, la reanudación de la producción de células de madera temprana después de la latencia invernal produce un límite definido. Los anillos faltantes se identifican mejor mediante la comparación de fechas cruzadas con series establecidas de anillos de crecimiento".

2.2.3. Densitometría de rayos x para medición de la densidad de la madera

La densitometría de rayos X permite la obtención de radiografías de sección transversal delgada de la madera. La muestra de madera expuesta a la fuente de rayos X registra su estructura anatómica en una película radiográfica por las diferencias en la absorción de rayos X en los tejidos de la madera (Amaral 1994).

En una revisión sobre la densitometría de rayos X de Parker & Kennedy (1993) se menciona que la técnica de rayos X fue desarrollado por Polge en 1963, en el Centro Nacional de Investigaciones Forestales, Champenoux, Francia, radiografiando muestras cilíndricas de madera (5 mm de espesor) y analizando la imagen radiográfica en un microdensitómetro obtuvo el perfil radial de la densidad aparente de la madera. Sardinha (1976) indicó que las muestras cilíndricas de madera tenían problemas para mantener la posición para el

paso de los rayos X, además de variar el espesor de la madera, con posibilidad de error en el cálculo de la densidad. Posteriormente, otros laboratorios, tales como el Instituto de Investigación Forestal de Suiza, utilizaron la sección transversal de muestras de madera con un espesor uniforme de 1,25 mm para las radiografías (Lenz, Schär y Schweingruber 1976).

Después de los trabajos de Polge, institutos de investigación y universidades de varios países (Suiza, Alemania, Australia, Nueva Zelanda, Inglaterra, Canadá, Japón, Estados Unidos, Brasil, etc.) iniciaron la aplicación de la atenuación de los rayos X en el análisis de la madera, paneles, etc., para la determinación de su densidad aparente.

Las numerosas aplicaciones de la densitometría de rayos X fueron descritos por Polge (1966) como la evaluación de la calidad de la madera, la madera de reacción, el estudio de retracción, colapso y reacondicionamiento de la madera, además de la comparación de perfiles densitométricos de la madera de procedencias de una misma especie. En un primer momento, la información de las publicaciones se referían a la técnica de densitometría de rayos X en maderas, con la descripción de los equipos, innovaciones de los laboratorios y en la actualidad su aplicación extensiva (Amaral 1994).

Por lo tanto, la densitometría de rayos X es una herramienta importante para el estudio del clima, la hidrología, la ecología y la geomorfología. Por ejemplo, Polge (1966) estableció que los perfiles densitométricos son característicos del año de formación de anillos de crecimiento - la densidad máxima y mínima anual, la densidad límite de los anillos de crecimiento, etc. - permitiendo distinguir el año y las posiciones del leño en el interior del tronco del árbol; también encontró una relación directa entre los anillos de crecimiento con los factores climáticos, con las curvas de variación de densidad aplicadas a la dendrocronología. Amaral (1994) indicó que el efecto de las prácticas silviculturales (fertilización, raleo, irrigación, poda, etc.) puede ser medida por densitometría de rayos X, mostrando la variación de densidad entre y dentro de los anillos de crecimiento.

Parker & Kennedy (1993) mostraron una serie de estudios que utilizan la técnica de densitometría de rayos X proporcionando numerosas aplicaciones

para la evaluación de la estructura y propiedades de la madera, el efecto de las prácticas silviculturales y la biología del crecimiento de los árboles.

En los estudios de Tomazello et al (2008) se mostró que la determinación de la densidad aparente por densitometría de rayos X permite evaluar el efecto de deterioro de la madera de árboles de eucalipto por los hongos de pudrición blanca, detectar el límite del duramen-albura, el efecto del manejo forestal en las propiedades de la madera y determinar la producción anual de biomasa de madera y la relación con su estructura anatómica. Oliveira (1997) indicó que la técnica permite medir la variación de la densidad de la madera en distancias cortas, imposible por el método gravimétrico convencional, obteniéndose gráficos del patrón de variación radial de la densidad y proporcionando la evaluación del desarrollo de los árboles y la selección de la madera de densidad más uniforme o mas elevada.

2.2.4. Estimación de los Stocks de Carbono

El secuestro de carbono es la entrada de CO₂ atmosférico durante la fotosíntesis y la transferencia de CO₂ en la vegetación, los residuos y el suelo (Mohan Kumar y Nair 2011).

Toda la biomasa de la vegetación sobre el suelo es posible estimar por relaciones alométricas de fórmulas (Hamburg 2000).

Para los árboles, el DAP (conocido como el diámetro a la altura del pecho) permite predecir la biomasa del árbol con un alto grado de precisión. Las ecuaciones alométricas se pueden desarrollar a nivel local por muestreo destructivo o a través de la información obtenida de la literatura (Hairiah et al. 2001). Una vez que las ecuaciones de las especies se han establecido o seleccionado, solo es necesario medir el DAP del árbol y posiblemente otros parámetros utilizados en la ecuación, como la altura, la densidad de la madera, área basal.

El peso en seco de los árboles se convierte en peso de carbono multiplicando el peso total con la fracción de carbono en peso de materia seca. Esto se logra mediante la medición directa o usar factor por defecto 0,5 propuesto por el IPCC (2013). El carbono total almacenado en los árboles es la suma del

carbono estimada a partir de todos los árboles que se encuentran dentro de un área dada.

2.3. Definición de términos

Incremento corriente anual (ICA): Corresponde al incremento producido en un año de intervalo. Se calcula haciendo la diferencia entre el valor al final del año menos el valor al inicio del año (Prodan et al. 1997)

Incremento medio anual (IMA): Corresponde al promedio de incremento determinado hasta el momento actual. Se calcula dividiendo el valor actual entre el tiempo transcurrido o edad (Prodan et al. 1997).

Edad de rotación o turno silvicultural: Es la edad en la cual el árbol o el rodal alcanza el máximo IMA, que coincide con la intersección con la curva de incremento corriente anual (Prodan et al. 1997).

El carbono: Es uno de los elementos químicos más abundantes del planeta Tierra y está presente en todos los seres vivos. Walker (2011), aduce que el carbono se encuentra en grandes cantidades en las hojas, ramas, tallos y raíces de los árboles. Además de estar compuesta de hasta 50% de agua, la biomasa de un árbol vivo contiene aproximadamente 25% de carbono, por consiguiente, el carbono constituye aproximadamente la $\frac{1}{2}$ del total de la Biomasa Seca –BSS- de un árbol. Por ejemplo, si un árbol tiene una BSS de 2,4 toneladas métricas entonces el carbono encontrado en este árbol tiene un peso de 1,2 toneladas métricas.

Biomasa: La biomasa de un árbol, según Walker (2011) es el peso o masa del tejido de la planta viva y es generalmente expresado en unidades de toneladas métricas (t) o Megagramos (Mg). La biomasa viva puede ser separada en: sobre el suelo (hojas, ramas y tallo) (aérea) y componentes bajo el suelo (raíces). Lo más común es estimar del árbol la biomasa seca viva sobre el suelo (BSS), lo cual es el peso del tejido vivo de la planta sobre el suelo después de que toda el agua haya sido removida, es decir, después de que las hojas, ramas y tallos se hayan secado por completo, a menudo utilizando un horno especial de laboratorio.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de estudio

La presente investigación es de tipo descriptivo y correlacional, porque aborda la estimación de variables a partir de otras variables independientes, mediante técnicas analíticas descriptivas y relación de variables.

Según su finalidad la investigación es aplicada, porque los resultados podrán ser directamente aplicados en la solución del problema planteado.

Según el carácter de medida es cuantitativa, pues las variables dependientes e independientes son de tipo cuantitativo.

3.2. Diseño del estudio

La investigación se enmarca dentro del diseño de estudios analíticos observacionales no experimentales, sin grupo control del tipo longitudinal.

3.3. Población y Muestra

3.3.1. Población

La población está conformada por los árboles de teca de 7 años de edad, que representan a las plantaciones manejadas más antiguas de teca. Según los reportes de la empresa RAMSA, estas plantaciones cubren un área total de 10 ha y 6000 árboles de teca aproximadamente. La población de árboles es procedente de semillas de alta productividad provenientes de Brasil.

3.3.2. Muestra

El tamaño de muestra fue definido en base a experiencias de otros estudios. Se encontraron resultados satisfactorios y representativos de la población con 13 árboles (Rosero 2009), 15 árboles (Martínez 2015), 47 y 64 árboles (Dünisch, Montóia y Bauch 2003), 50 árboles (Brienen y Zuidema 2005), etc. En general si no hay restricción para la obtención de la muestra se recomienda

para estudios de crecimiento un tamaño de muestra entre 30 a 50 árboles (Brienen y Zuidema, 2003).

En base a estas consideraciones, el tamaño de muestra de la presente investigación fue de 34 árboles de *Tectona grandis* de 7 años de edad, seleccionados aleatoriamente de la población, y proporcional a las clases diámetricas. Se evitaron árboles con defectos tales como fuste torcido, copa dañada, o pudrición del duramen. La localización y otras informaciones acerca de los árboles muestrados se muestran en la Figura 4, y en los Anexos (Tabla 2).

3.4. Métodos y técnicas

3.4.1. Lugar de estudio

El lugar de estudio abarca 10 ha plantadas con teca de 7 años de edad, ubicado en el Fundo RAMSA, en el Km 21, del tramo de la Carretera Interoceánica Iberia – Iñapari, en el distrito de Tahuamanu, Provincia de Tahuamanu. Geográficamente se ubica entre las coordenadas 441100 m y 442100 m Este, y entre 8757250 m y 8757400 m Norte (Figura 3). La zona se ubica por debajo de 250 msnm, presenta un clima cálido-lluvioso-húmedo, con una temperatura media de 27°C, muy variable a lo largo del año, con mínimas entre 10°C a 20°C en los meses más fríos (mayo a agosto) y máximas entre 29°C a 38°C en los meses más calientes (setiembre a noviembre); la precipitación media acumulada anual es de 2 299 mm (SENAMHI 2008).

La plantación evaluada fue instalada aproximadamente a finales de 2011 a una densidad de 1100 árboles por hectárea y espaciamiento de 3 m x 3 m. El manejo fitosanitario aplicado consistió en podas anuales de las ramas, y un raleo a una intensidad del 25%, realizado a los 4 años de edad. Los árboles provienen de semillas de árboles plus (genotipo superior), producidos por la Compañía PROTECA (<http://proteca.com.br/>), Mato Grosso, Brasil.

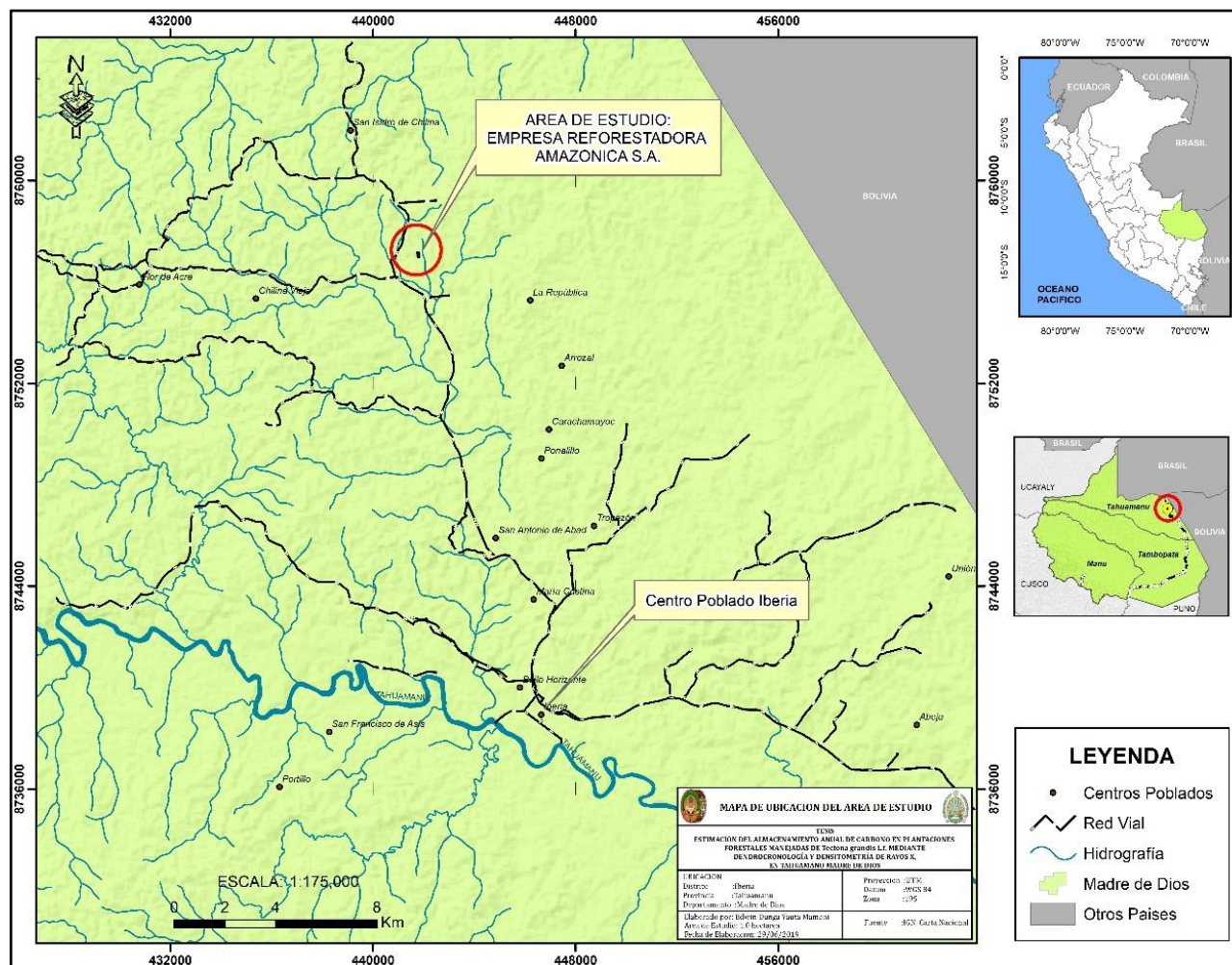


Figura 3. Mapa de ubicación del lugar de estudio.

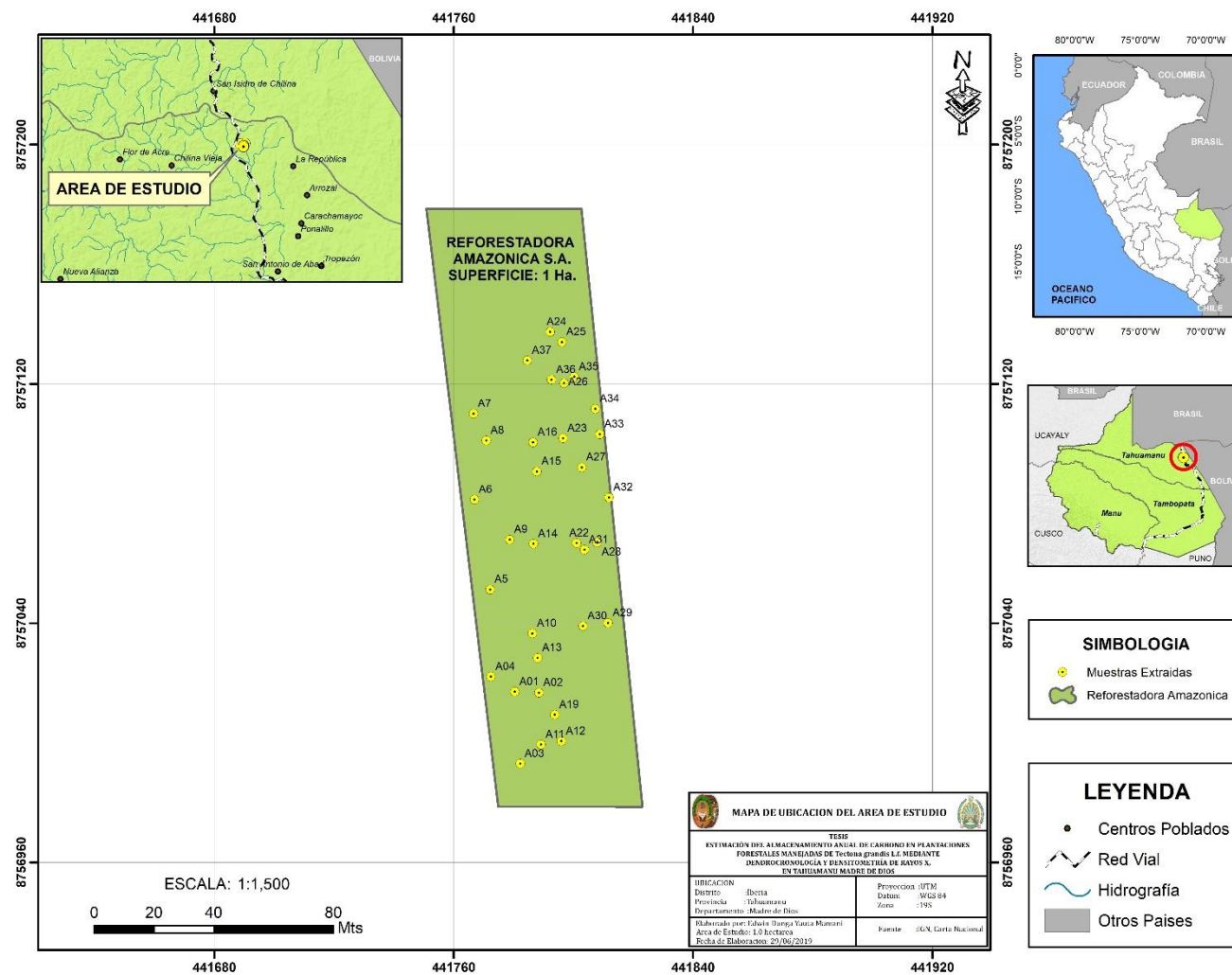


Figura 4: Mapa de localización de los árboles muestreados

3.4.2. Procedimiento de colecta de baguetas radiales del tronco

La extracción de muestras del leño de los árboles, fue realizado a través del método no destructivo, que consiste en extraer muestras radiales o “baguetas” (cilindros de leño, corteza-corteza) utilizando el barreno de Pressler (5,15 mm de diámetro) de la sección transversal del tronco (Figura 5), de tal forma que cada bagueta contenga el leño formado desde un extremo hasta el otro extremo pasando por la médula, a la altura del dap. En total se extrajeron 68 baguetas de 34 árboles (Figura 4), es decir 2 baguetas por árbol, conteniendo 4 radios, en sentido perpendicular entre ellas, con la finalidad de realizar mediciones más precisas del ancho de los anillos de crecimiento, así como facilitar la identificación de anillos falsos o anillos ausentes, debido a que el crecimiento secundario no suele ser uniforme en todas las direcciones del tronco (médula dislocada, leño de reacción, pequeñas aletas, etc). Estas baguetas fueron usadas para realizar la cronología, medición del ancho de los anillos de crecimiento, y determinación de la densidad mediante densitometría de rayos X.



Figura 5. (A) Plantación de *Tectona grandis*. (B) Limpieza y Medición de circunferencia del árbol. (C) Posición para la extracción de bagueta radial con el barreno de Pressler. (D) El barreno se inserta en el árbol a la altura del dap, girando para penetrar hasta la médula. (E) Se extrae la muestra radial. (F) La muestra radial se coloca en una cañita plastica para su conservación. Fuente: Elaboracion propia.

Las baguetas fueron registradas con un código del árbol, colocadas dentro de tubos de plástico (sorbetes gruesos), y rociadas levemente con alcohol para su preservación. Posteriormente fueron transportadas hasta el laboratorio de Anatomía de la Madera de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de

Dios (UNAMAD), para su secado al aire libre bajo sombra y preparación para posterior análisis.

3.4.3. Preparación de las baguetas radiales para demarcación de los anillos de crecimiento

Las baguetas, fueron colocadas en soportes de madera, alineadas en dirección de la fibra, y fijadas con pegamento, para posteriormente ser pulidas usando lijas de agua con granulación de 100 hasta 800 con la finalidad de mejorar la visibilidad de los anillos de crecimiento (Stokes y Smiley 1996). En las baguetas pulidas, se identificaron y demarcaron los anillos de crecimiento en uno de los bordes del soporte con lápiz, a simple vista o con el uso de una lupa de 10X o estereoscopio (Figura 6).

Después, las muestras radiales pulidas fueron escaneadas en escáner profesional, a una resolución de 1200 dpi, donde se procedió a la identificación de los anillos de crecimiento.



Figura 6. (A) Selección y agrupación de muestras. (B) Fijación de muestras en soportes. (C) Proceso de lijado. (D) Limpieza de muestras. (E) Demarcación del límite de los anillos de crecimiento. (F) Materiales utilizados. (G) Escaneo de muestras. Fuente: Elaboración propia.

3.4.4. Medición de los anillos de crecimiento

Las imágenes digitalizadas de las muestras, fueron analizadas en el Software Image Pro Plus, para medición del ancho de los anillos de crecimiento con una precisión de 0,01 mm (Figura 7). Los datos generados fueron almacenados por el software como archivo de extensión .txt para su exportación a Excel. Con estos datos, se construyeron las series cronológicas, graficándose las curvas de incremento en las cuales se realizó la sincronización también llamado datación cruzada o “cross-dating” en inglés, de las 30 series de crecimiento. Previamente se sincronizaron las series de las dos baguetas de cada árbol, y promediaron el ancho de los anillos de crecimiento, obteniéndose una sola serie de crecimiento por cada árbol (Rosero 2009; Campos 2009).

La datación cruzada consistió en la identificación de patrones de incremento que pueden ser sincronizados entre muestras de un mismo árbol y entre árboles, haciendo posible la construcción de una serie cronológica de anillos de crecimiento datados en el año exacto de su formación (Venegas-González 2013), mediante el reconocimiento de patrones únicos de la anchura y estrechez de los anillos. La sincronización exitosa de las curvas de ancho de los anillos da una indicación de un factor desencadenante externo oscilante del ritmo de crecimiento (Jacoby 1989).

Posteriormente, mediante el Programa COFECHA (Holmes, Adams y Fritts 1986) se realizó el control de calidad y verificación de la sincronización “cross-dating”, obteniéndose la serie media, denominada Serie Maestra, con la cual se compararon las series individuales mediante un análisis de correlación para encontrar posibles errores del “crossdating”, descartar series o validarlos.

Los falsos anillos y anillos faltantes fueron identificados para asegurar una mejor estimación de la edad y el crecimiento.

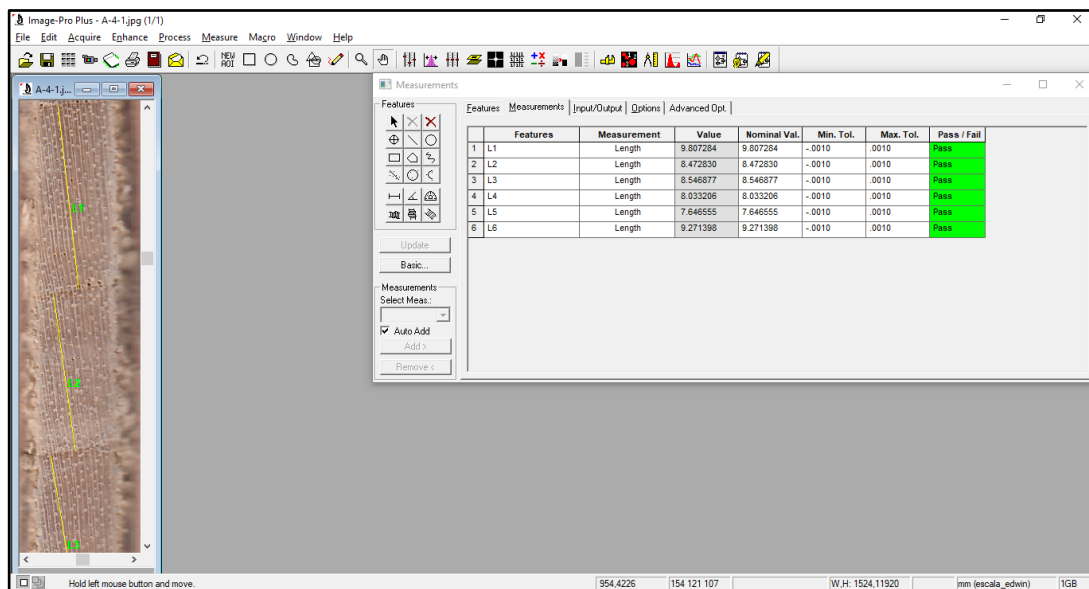


Figura 7: Demarcación y medición del límite de los anillos de crecimiento de *Tectona grandis* con el programa Image-Pro Plus.

3.4.5. Reconstrucción del crecimiento secundario mediante la medición de los anillos de crecimiento.

El incremento corriente anual del dap (ICA-dap) para el ienésimo año t , fue determinado a partir del ancho de los anillos de crecimiento, mediante la expresión (1):

$$ICA \ dap_t = 2 \times ancho \ del \ anillo_t \quad (1)$$

Asimismo, el incremento medio anual del dap (IMA-dap) fue determinado mediante la sumatoria de los ICA-dap dividido por la edad (2):

$$IMA \ dap_t = \frac{\sum ICA \ dap_t}{Edad_t} \quad (2)$$

El crecimiento secundario fue representado por el incremento corriente anual del área basal (ICA-g). El ICA-g para el ienésimo año t , fue calculado a partir de la medición del ancho de los anillos de crecimiento y el área de los anillos, mediante la siguiente expresión (3):

$$ICA \ g_t = \pi \left[\sum_{t=1}^n ancho \ del \ anillo_t \right]^2 - \pi \left[\sum_{t=1}^{n-1} ancho \ del \ anillo_t \right]^2 \quad (3)$$

Asimismo, conocido el ICA-g para un determinado año, el incremento medio anual del área basal (IMA-g) fue calculado mediante la expresión (4):

$$IMA \ g_t = \frac{\sum ICA \ g_t}{Edad_t} \quad (4)$$

El rendimiento del árbol, expresa el tamaño del árbol en área basal, alcanzado a una determinada edad, por tanto, su expresión fue simplificada a (5):

$$Rendimiento_g t = \sum_{t=1}^n ICA \ g_t \quad (5)$$

Posteriormente se calculó el rendimiento de volumen (v) del árbol sin corteza, en cada año de crecimiento, mediante la siguiente ecuación de volumen (6), en función del dap, construida por Cordero y Kanninen (2003):

$$Rendimiento \ v_t = (-0,0084 + 0,0297 \times dap_t)^2 \quad (6)$$

Finalmente, el Incremento corriente anual del Volumen del fuste por hectárea (ICA-V) en el año t , fue estimado mediante la ecuación (7).

$$ICA V_t = (Rendimiento v_t - Rendimiento v_{t-1}) \times D \times \frac{S}{100} \times \frac{(100 - R)}{100} \quad (7)$$

Donde, ICA-V_t = Incremento corriente anual del Volumen del fuste sin corteza por hectárea (m³ ha⁻¹) en el año t ; D = Densidad del rodal (árb. ha⁻¹); S = Supervivencia en el año t , en porcentaje; R = Intensidad de raleo en el año t , en porcentaje.

La densidad del rodal fue de 1110 árboles por hectárea, con una supervivencia del 95% durante los 7 años, se aplicó un raleo del 25% a finales del 4° año de edad.

3.4.6. Determinación de la biomasa y stock de carbono del fuste de las plantaciones para cada año de crecimiento.

Las muestras pulidas, utilizadas para la demarcación y medición de los anillos de crecimiento, fueron fijadas entre dos soportes de madera, con las fibras dispuestas en sentido horizontal para que, posteriormente sean cortadas en el sentido transversal (2 mm de espesor) en un equipo de doble sierra circular de la Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP) (Figura 8), almacenadas en sala de climatización a 20°C, 60% de humedad relativa durante 12 horas, para análisis por densitometría de Rayos X (Tomazello et al. 2008).

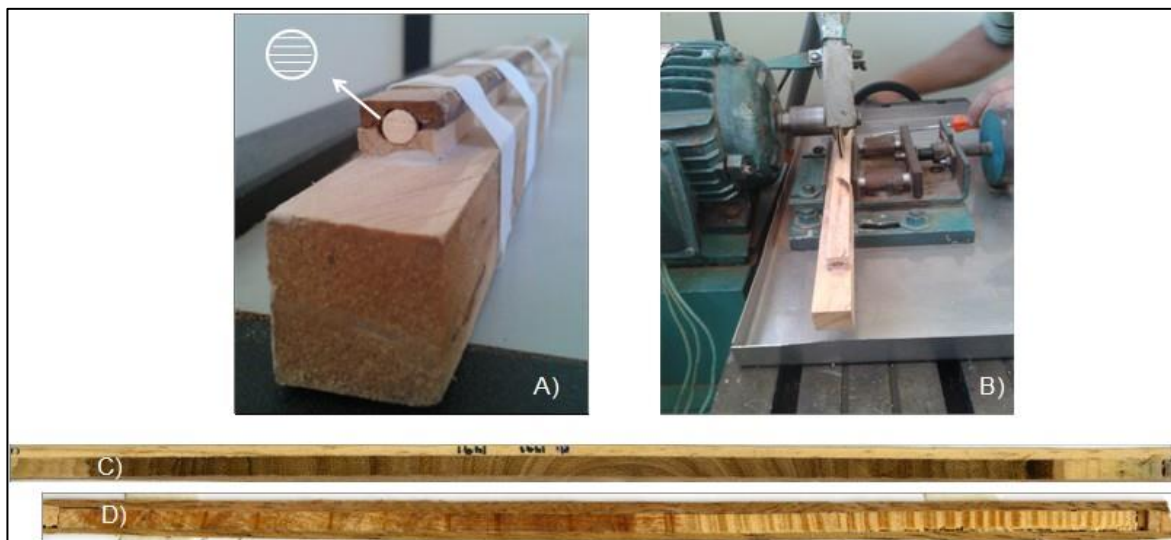


Figura 8. Fijación en soportes (A) y corte de muestras para análisis por Densitometría de Rayos X (B).

Las muestras radiales, fijadas en soportes y seccionadas a un espesor de 2 mm, climatizadas, fueron sometidas a irradiación de rayos X en el equipo Densitómetro de rayos x (QMS, modelo QTRS-X) (Figura 9). Este equipo calcula los valores de densidad aparente a cada 80 μm , permitiendo construir el perfil radial de la densidad de la madera en alta resolución.

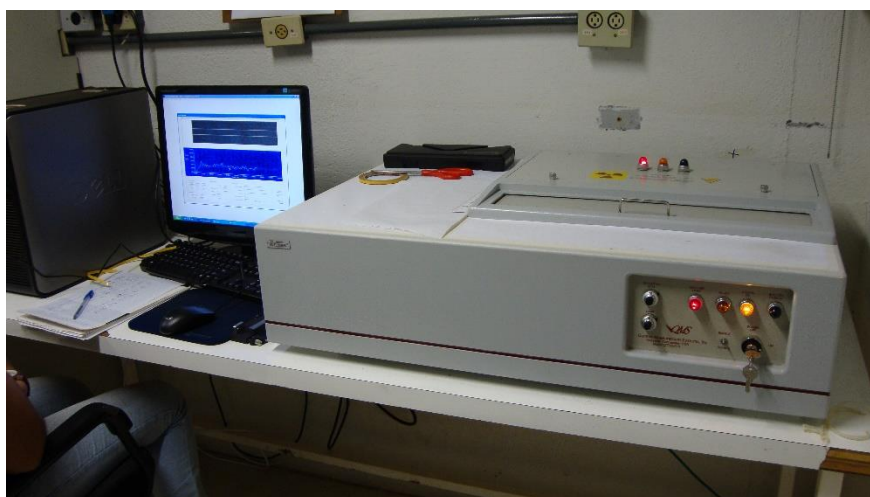


Figura 9. Fotografía del equipo Densitómetro de Rayos X de la ESALQ-USP, en Piracicaba-Brasil

La Figura 10 muestra cómo esta técnica permite identificar, medir, y calcular la densidad aparente para cada anillo de crecimiento, a partir de los patrones de variación radial de la densidad entre el leño temprano y leño tardío.

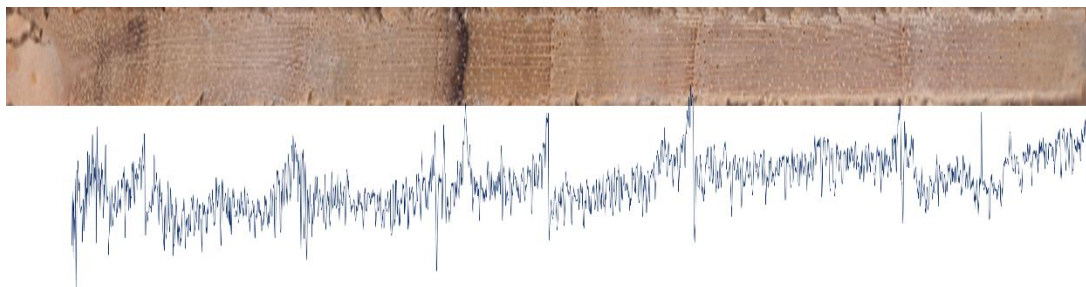


Figura 10. Delimitación de los anillos de crecimiento mediante la variación radial de la densidad del leño. La distancia entre los límites de los anillos define el ancho del anillo de crecimiento.

Con los datos obtenidos se calculó la densidad aparente promedio del leño de cada anillo de crecimiento y estimó la biomasa de la madera del fuste (peso seco) para cada anillo de crecimiento.

Previamente, se estimó la densidad básica de cada anillo y muestra mediante una ecuación de regresión (8) que relaciona la densidad aparente media y la densidad básica, de acuerdo a Hackenberg et al. (2015):

$$DB_t = 0,1237 + 0,528DA_t \quad (8)$$

Donde, DB_t = Densidad básica de la madera (g cm^{-3}) en el año t ; y DA_t = Densidad aparente media de la madera (g cm^{-3}) en el año t .

Conocido la densidad básica de la madera en cada anillo de crecimiento, se estimó el incremento corriente anual de biomasa del fuste por hectárea ($ICA-B_t$) mediante la ecuación (9):

$$ICA B_t = \sum_{i=1}^{N-1} (DB_t \times ICA V_t \times 1000) \quad (9)$$

Donde, $ICA-B_t$ = Incremento corriente anual de la Biomasa del fuste por hectárea (kg ha^{-1}) en el año t ; DB_t = Densidad básica de la madera (g cm^{-3}) en el año t ; $ICA-V_t$ = Incremento corriente anual del Volumen del fuste sin corteza por hectárea ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) en el año t ,

En seguida, el incremento corriente anual de carbono del fuste por hectárea almacenado en el año t ($ICA-C_t$) se estimó multiplicando el $ICA-B_t$ por el factor 0,48 (Brown 1997), tal como se muestra en la ecuación (10):

$$ICA C_t = ICA B_t \times 0,48 \quad (10)$$

Posteriormente el incremento medio anual de carbono por hectárea en el año t ($IMA-C_t$) ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) se determinó mediante la expresión (11):

$$IMA C_t = \frac{\sum ICA C_t}{Edad} \quad (11)$$

Finalmente, se calculó el rendimiento de carbono almacenado el fuste de los árboles por hectárea en el año t (kg ha^{-1}), mediante la expresión (12):

$$Rendimiento C_t = \sum ICA C_t \quad (12)$$

3.5. Tratamiento de los datos

La construcción de las cronologías fue realizado en hojas de cálculo Excel, procediéndose posteriormente al control de calidad con el programa COFECHA (Holmes, Adams y Fritts 1986).

Los cálculos de la densidad, biomasa y stock de carbono del fuste fueron realizados en hojas de cálculo Excel.

Finalmente, se utilizó el Software OriginLab 2018 para la construcción de gráficos descriptivos y de biomasa y almacenamiento de carbono, así como para construcción del modelo Gompertz de predicción del almacenamiento de carbono.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

4.1. Extracción de información de crecimiento secundario a partir de los anillos de crecimiento

4.1.1. Características de los anillos de crecimiento

En las muestras de la sección transversal del leño de los árboles evaluados, se observaron anillos de crecimiento diferenciados, distinguibles a simple vista. El límite de los anillos se caracterizó por una delgada línea de parénquima marginal de color claro. En la mayoría de las muestras, el parénquima marginal estuvo rodeado de vasos, conocido como anillos semiporosos (Figura 11). No se observó un contraste que permita diferenciar el leño temprano del leño tardío dentro de cada anillo, a diferencia de otros estudios que sí reportaron la formación de vasos más estrechos y fibras con mayor espesor de la pared celular (Castro 2011; Venegas-González 2013).

Las características descritas, fueron también observados en otros árboles de teca de plantaciones y bosques naturales en todo el mundo (Venegas-González 2013; Venegas-González et al. 2015; Castro 2011; Pumijumnong, Eckstein y Sass 1995).



Figura 11. Detalle del límite de los anillos de crecimiento (indicado por las flechas negras) de *Tectona grandis* "teca" en plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.

Similar a previos estudios que reportan anillos de crecimiento falsos en árboles de teca (Venegas-González 2013; Castro 2011), en el presente

estudio se observaron estos tipos de anillos sólo en el segundo año de crecimiento de los árboles (Figura 12). El límite del anillo falso fue reconocido por ser de mayor ancho que el límite de los anillos verdaderos (Figura 12), además es conocido que frecuentemente los anillos falsos se forman antes del anillo verdadero, ante la ocurrencia de algún anormal periodo seco. Los anillos falsos, y algunas veces los anillos ausentes, suelen presentarse también en muchas otras especies tropicales, debido a los patrones de variación meteorológica intra-anual. Por ejemplo, en un año donde se presentan más de una estación seca, los árboles pueden formar más de un anillo de crecimiento; asimismo, en un año donde la estación seca no presenta una significativa reducción de la precipitación, los árboles no formarán un anillo de crecimiento anual. Así, en los trópicos los anillos de crecimiento son formados en respuesta a condiciones limitantes del crecimiento (Fritts 1976; Bowyer, Shmulsky y Haygreen 2007). En Brasil, se ha visto que los árboles de teca presentan mayor crecimiento en diciembre a febrero (mayor pluviosidad), con mayor actividad cambial, y menor crecimiento en septiembre a noviembre (menor pluviosidad) con menor actividad cambial (Cardoso 1991).

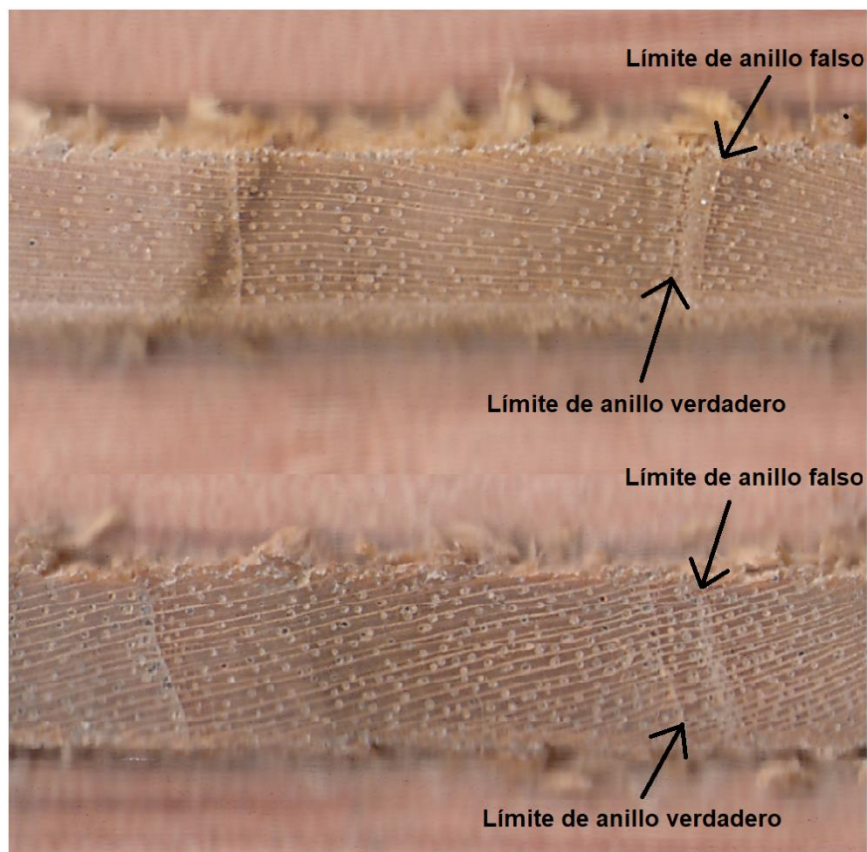


Figura 12. Detalle de un anillo de crecimiento falso y uno verdadero, en árboles de *Tectona grandis* "teca" en plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.

Los incrementos radiales anuales en las series cronológicas mostraron una clara sincronización entre los árboles, y por tanto una baja variabilidad de los incrementos radiales anuales entre los árboles evaluados (Figura 13). En efecto, las intercorrelaciones de las series individuales con la serie maestra (0,41) superaron el valor de intercorrelación crítica (0,34) al 99% de significancia (Figura 13).

Estos resultados indican que los árboles de *Tectona grandis* presentan una señal común de crecimiento, es decir existe una sincronización del crecimiento entre los árboles, debido a efectos externos (Venegas-González 2013). La sincronización del crecimiento entre una muestra representativa de árboles es también una indicación de la formación de anillos de crecimiento anuales (Worbes et al. 2003; Worbes 1999; Brienen y Zuidema 2005).

```

*****
*C* Number of dated series      29 *C*
*O* Master series 2012 2018    7 yrs *O*
*F* Total rings in all series   203 *F*
*E* Total dated rings checked   203 *E*
*C* Series intercorrelation     .405 *C*
*H* Average mean sensitivity    .183 *H*
*A* Segments, possible problems  10 *A*
*** Mean length of series      7.0 ***
*****

```

Figura 13. Resultado del análisis de control de calidad de la datación cruzada, realizado con el programa COFECHA.

Los árboles evaluados, mostrarán un patrón de incremento del ancho de los anillos hacia el segundo año y a partir de allí una disminución (Figura 14). Éste patrón es común en todas las plantas vasculares leñosas, pues debido a al crecimiento secundario, existirá mayor división anticlinal de las células del cambium para poder mantener el ritmo de crecimiento, dando como resultando anillos de mayor circunferencia y menor ancho (Bowyer, Shmulsky y Haygreen 2007).

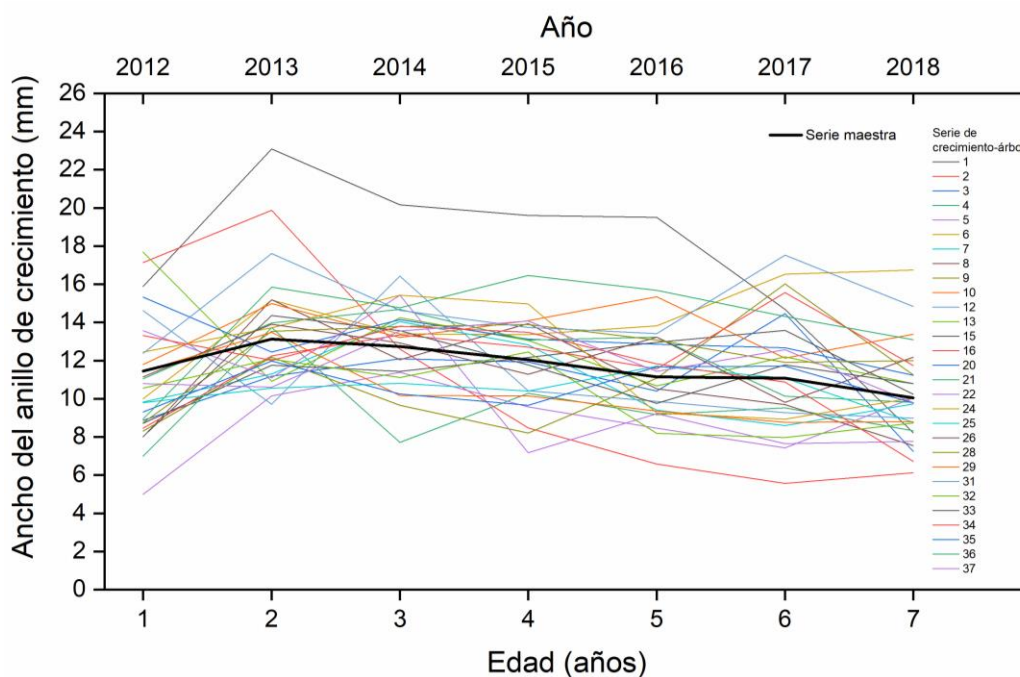


Figura 14. Series de crecimiento y serie maestra, mostrando los patrones de crecimiento radial de los árboles a través del tiempo.

4.1.2. Densidad aparente y básica del leño de los anillos de crecimiento

La densitometría de rayos X mostró ser eficaz para determinar la variabilidad de la densidad del leño a lo largo de la dirección radial del fuste. Dentro de cada anillo de crecimiento, se observó que la densidad es más baja en la sección inicial del anillo de crecimiento, e incrementa gradualmente a medida que se acerca al límite de anillo (Figura 15).

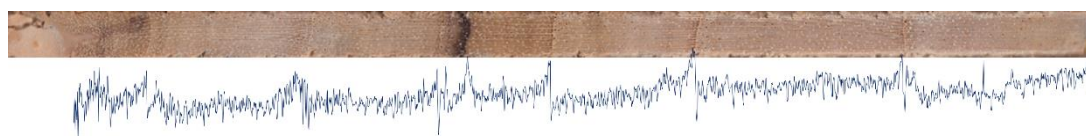


Figura 15. Sección transversal de una muestra radial del leño extraído de un árbol de *Tectona grandis* "teca", de plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios. Debajo de la imagen del leño, se muestra el perfil de densidad del leño en el sentido médula-corteza.

Los límites de los anillos de crecimiento fueron claramente diferenciados por el perfil de densidad del leño (Figura 16), observase que hacia en el límite de los anillos, conformado por parénquima marginal, la densidad alcanza valores muy altos, para despues descender bruscamente. La reducción del valor de densidad en la transición de los anillos de crecimiento anuales, es debido a la presencia de células de pared más delgadas y mayor lumen del parénquima longitudinal (Tomazello et al. 2008; Venegas-González 2013).

Se verifica también un claro contraste de densidad entre el leño temprano (con menor densidad) y leño tardío (con mayor densidad) dentro del anillo de crecimiento. Éste perfil es característico de especies de anillos bien marcados (Tomazello et al. 2008). Esto se explica por diferencias anatómicas entre el leño temprano y leño tardío: en el leño temprano los vasos son mayor diámetro y frecuencia, y las fibras tienen pared celular más delgada, contrario al leño tardío que se caracteriza por vasos pequeños y de menor frecuencia, y mayor espesor de de la pared celular de las fibras (Castro 2011).

En la grande mayoría de los árboles muestreados, el perfil de densidad se caracterizó por menores valores de densidad en la región cercana a la médula, incrementando gradualmente hasta el 5° o 6° año, e incrementando

bruscamente en el 7° año en la región cercana al cambium vascular o corteza interna (Figura 16). En algunos árboles la densidad presentó menor variación a lo largo de la dirección radial.

La densidad aparente varió entre $0,30 \text{ g cm}^{-3}$ y $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ en la mayoría de las muestras, con una media de $0,62 \text{ g cm}^{-3}$. El valor de densidad aparente media es similar al indicado para árboles de la especie en Brasil (Castro 2011; Venegas-González 2013). Moya et al. (2009) encontraron mayor densidad aparente media de $0,55\text{-}0,87 \text{ g cm}^{-3}$ en Costa Rica, además, determinaron que la variabilidad de la densidad aparente dentro del anillo de crecimiento anual fue de 5-21 %. En África se reportan valores de densidad aparente del leño de $0,65\text{-}0,73 \text{ g cm}^{-3}$ en árboles jóvenes y adultos (Kokutse et al. 2004) y en Asia la densidad aparente del leño varió de $0,62\text{-}0,70 \text{ g cm}^{-3}$.

Los resultados muestran que la aplicación de la densitometría de rayos X posibilita la demarcación de los límites de los anillos de crecimiento anuales formados en el leño de los árboles, en función de la variación de la densidad inter e intra-anillo de crecimiento. Así, la metodología de densitometría de rayos X se constituye en una importante herramienta para la definición del límite de los anillos de crecimiento y determinación de la densidad del leño inicial-tardío (Tomazello et al. 2008).

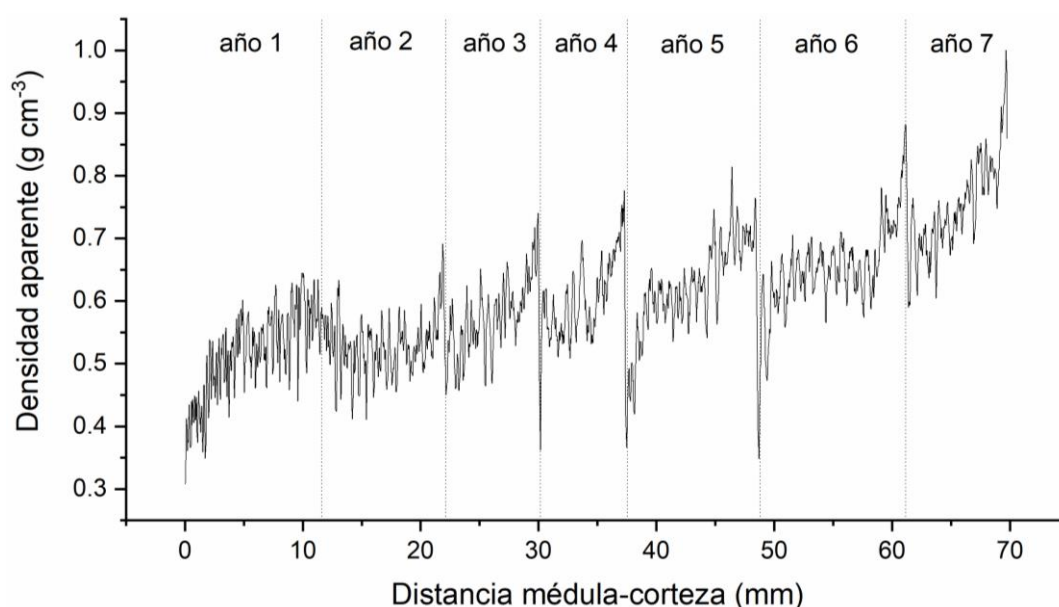


Figura 16. Perfil radial de densidad aparente de un árbol de *Tectona grandis* "teca", de plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.

Se observó una tendencia de aumento de la densidad básica con la edad de los árboles (Figura 17), coincidente con el presentado en la literatura nacional e internacional (Kokutse et al. 2004; Moya et al. 2009; Castro 2011; Venegas-González 2013). La densidad básica de los anillos de crecimiento, fue de 0,42 g cm⁻³, 0,43 g cm⁻³, 0,44 g cm⁻³, 0,45 g cm⁻³, 0,45 g cm⁻³, 0,48 g cm⁻³, y 0,50 g cm⁻³, respectivamente en el 1°, 2°, 3°, 4°, 5°, 6° y 7° año de crecimiento.

La variación de la densidad básica entre los anillos de crecimiento observado, es un patrón común en árboles jóvenes, que poseen alta proporción de leño juvenil, el cual se caracteriza por un continuo incremento de los valores de densidad, hasta alcanzar un punto en que prácticamente la densidad se mantiene constante, en aquel punto, el árbol habrá comenzado a formar leño adulto (Bowyer, Shmulsky y Haygreen 2007).

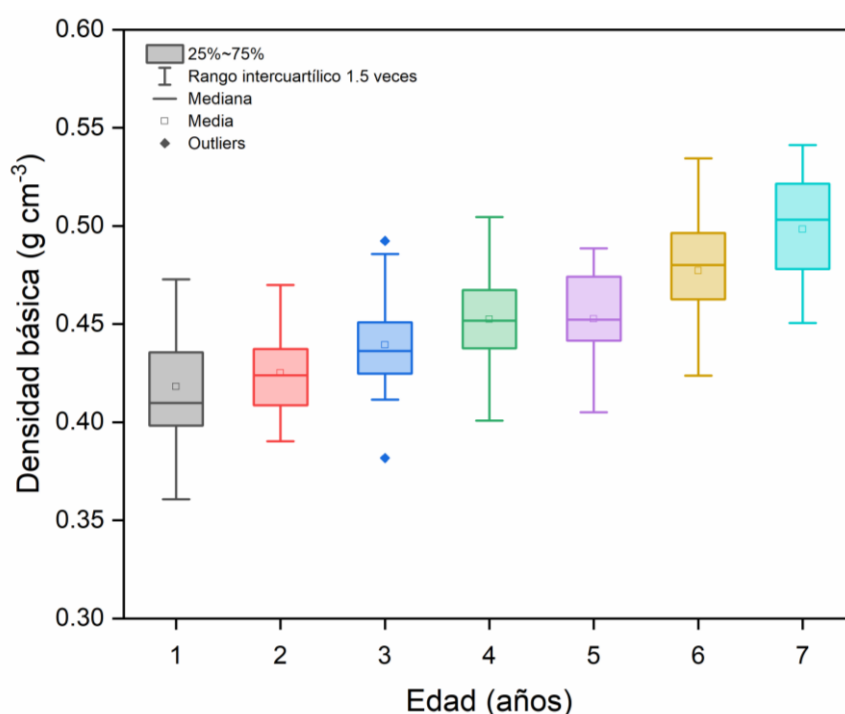


Figura 17. Distribución de la variación de la densidad básica de leño anual de árboles de *Tectona grandis* "teca", en plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.

4.1.3. Incremento en diámetro, área basal y volumen

El mayor ICA-dap se registró en 2° año, con 2,62 cm; y partir del 3° año el ICA-dap disminuye gradualmente hasta alcanzar 2,01 cm (Figura 18). Los diagramas de cajas muestran una distribución casi simétrica, con los promedios y medianas cercano al 50% de las observaciones. Se muestran algunas observaciones atípicas o “outliers” en el 2°, 3°, 4°, 5° y 7° año de crecimiento, las cuales no fueron descartadas, puesto que se considera que son observaciones reales de una muestra aleatoria y representativa de la población. Los diagramas de caja también revelan una alta variación del ICA-dap en el año 1 y año 6, y una baja variación en el año 2 y año 7.

El patrón de disminución progresiva del dap a mayor edad, es una tendencia común en los árboles de plantaciones forestales, observado también en muchas otras especies tales como *Eucalyptus* spp., *Pinus* spp., *Acacia* spp., etc (Sette Jr et al. 2010; Castro 2011; Ortega Rodriguez et al. 2018). Por lo general, la disminución del dap es una consecuencia del incremento del área basal, y por tanto el ICA-dap es tomado como parámetro para medición de la productividad de madera, tal como veremos más adelante.

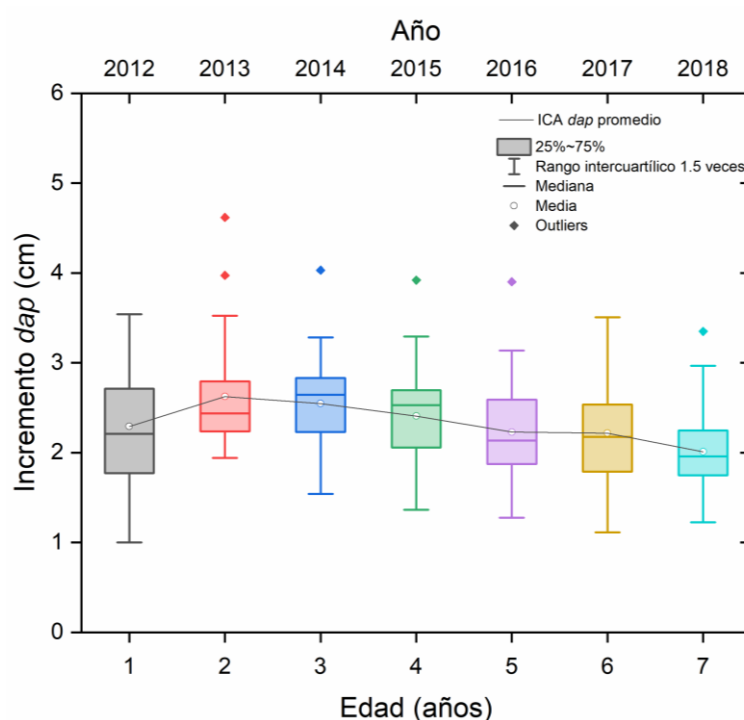


Figura 18. Distribución del incremento corriente anual del diámetro a la altura del pecho (ICA-dap).

Los árboles alcanzarán su mayor IMA-dap, de aproximadamente 2,49 cm año⁻¹, tempranamente en el 3° año, disminuyendo a partir de esa edad hasta alcanzar los 2,33 cm año⁻¹. El menor IMA-dap se presentó en el primero año de crecimiento con 2,29 cm año⁻¹ (Figura 19). Sin embargo, observe que las diferencias son pequeñas, variando entre 0,2 y 0,02 cm año⁻¹, indicando una baja variación inter-anual del crecimiento hasta el 7° año de edad de los árboles de teca. En contraste, árboles de otras especies como *Eucalyptus* spp. y *Pinus* spp, especies de más rápido crecimiento, muestran una alta variación inter-anual del dap, con altos incrementos durante los primeros años (Sette Jr et al. 2010; Castro 2011; Ortega Rodriguez et al. 2018).

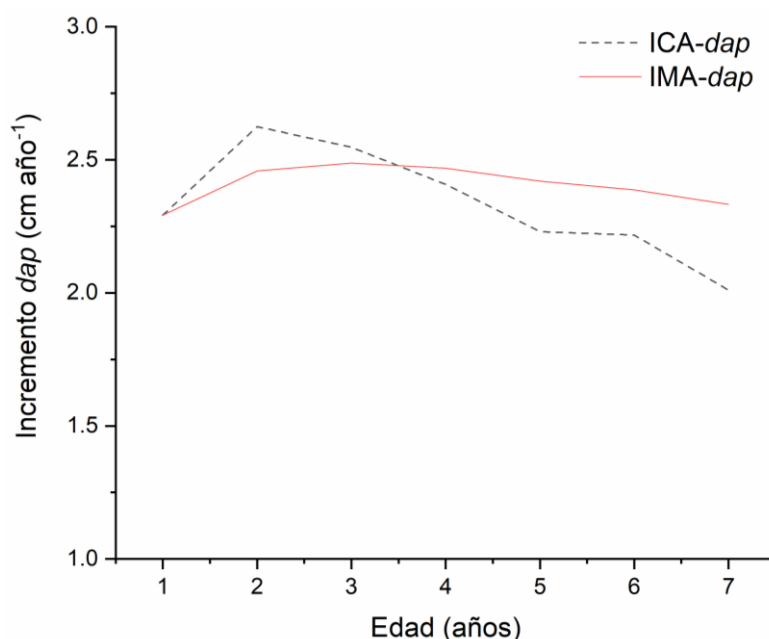


Figura 19. Curva del incremento corriente anual del dap (ICA-dap) y curva del incremento medio anual del dap (IMA-dap), de los árboles de *Tectona grandis* "teca" de plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.

La representación gráfica del incremento acumulado del dap, también llamado "Rendimiento" del dap, muestra un gradual crecimiento de los árboles de teca durante los primeros 7 años de edad. Observase una tendencia casi lineal de los rendimientos del dap, iniciando en 2,29 cm en el 1° año, hasta alcanzar 16,33 cm de dap en el 7° año de crecimiento (Figura 20). En el último año, el dap de los árboles (dap sin corteza) varió desde 12,41 cm hasta 24,23 cm. Estos resultados concuerdan con estudios realizados en plantaciones de teca en Costa Rica con similar densidad de plantación y raleo, donde se registraron

diámetro promedios entre 16 y 17 cm a los 7 años (Perez 2008; Pérez y Kanninen 2005). Sin embargo, en Brasil y Venezuela, con mayor densidad de plantación (distanciamiento de 2 m x 3 m y 2,5 m x 2,5), los árboles alcanzan mayores diámetros, en torno a 18 cm y 20 cm, respectivamente (Jerez-Rico y Coutinho 2017; Drescher 2004). Las diferencias pueden también deberse a otros factores como la intensidad de raleo y el manejo silvicultural aplicado. Además, el dap no es una variable que mide directamente la productividad del árbol o plantación. Más adelante, en la sección del rendimiento de volumen ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) analizaremos otros factores que afectan el crecimiento de la teca, y realizaremos comparaciones más objetivas.

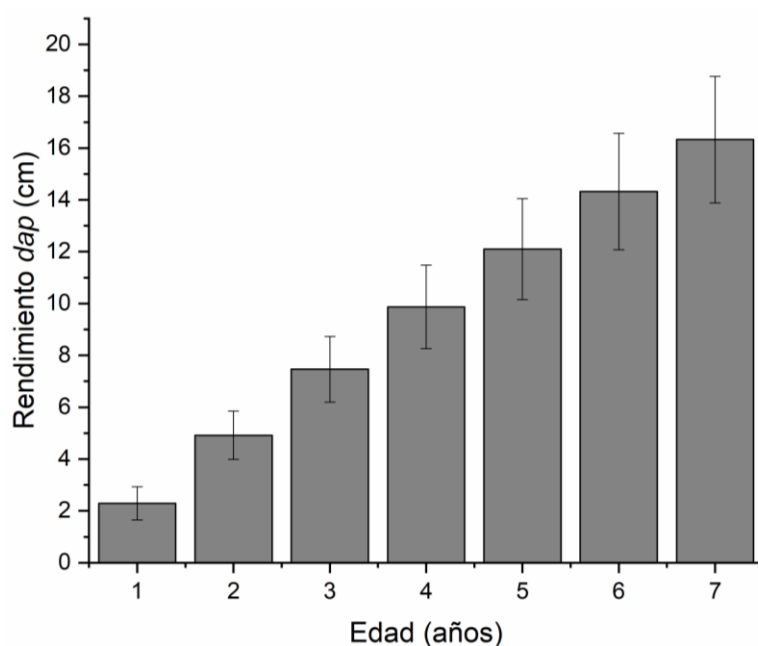


Figura 20. Rendimiento del dap en árboles de *Tectona grandis* "teca" de plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.

A diferencia de lo observado para la variable dap, el incremento corriente anual del área basal (ICA-g) aumentó con la edad de los árboles (Figura 21).

El área basal junto con la altura determina el volumen de los árboles. Los incrementos anuales de área basal son una medida más realista del crecimiento secundario de los árboles, puesto que integra el área de la sección transversal ganada durante un determinado periodo, a diferencia del dap que es una medida lineal. Por tanto, es imprescindible considerar el área basal para los estudios de crecimiento anual.

Los diagramas de caja muestran una distribución casi simétrica del área basal, no obstante, se observa que la variabilidad del área basal entre los árboles aumenta a mayor edad (cajas y bigotes más largos).

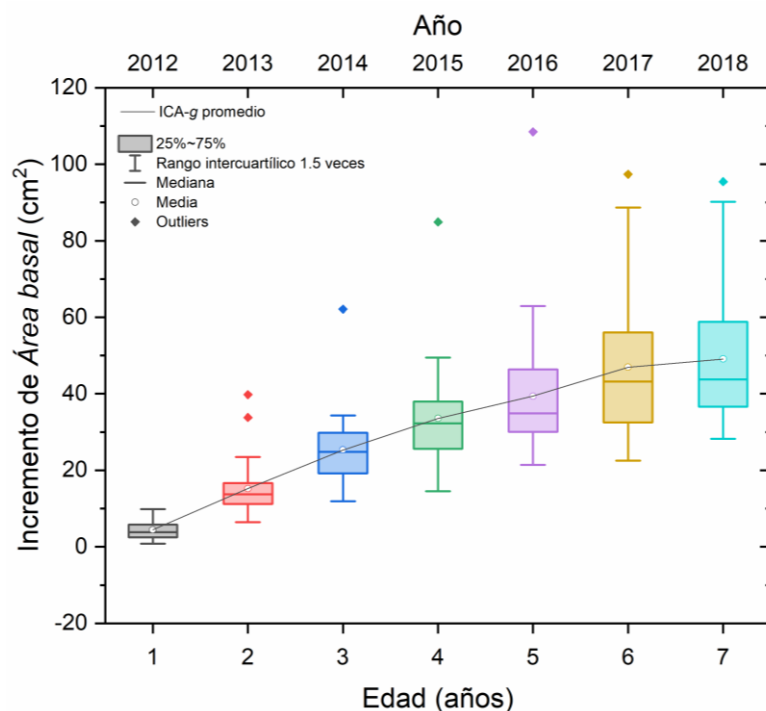


Figura 21. Distribución del incremento corriente anual del área basal (ICA-g), en árboles de *Tectona granids* "teca" de plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.

Los valores de ICA-g fueron de 4,44 cm², 15,21 cm², 25,32 cm², 33,54 cm², 39,38 cm², 46,95 cm² y 49,09 cm² respectivamente desde el 1° al 7° año de crecimiento. Durante los 7 años, el ICA-g siempre incrementó de un año a otro, principalmente durante los 4 primeros años, duplicando el ICA-g a cada año. El menor aumento del ICA-g fue observado en el 7° año (Figura 22).

Asimismo, hasta el 7° año se observó un incremento sostenido del IMA-g (Figura 22). El IMA-g promedio fue de 4,44 cm², 9,28 cm² año⁻¹, 14,98 cm² año⁻¹, 19,63 cm² año⁻¹, 23,58 cm² año⁻¹, 27,47 cm² año⁻¹ y 30,56 cm² año⁻¹ respectivamente desde el 1° al 7° año de crecimiento.

Las tendencias de las curvas indican que los árboles continuarán creciendo a tasas altas durante los siguientes años; los árboles alcanzarían el IMA máximo después de los 10 años de edad.

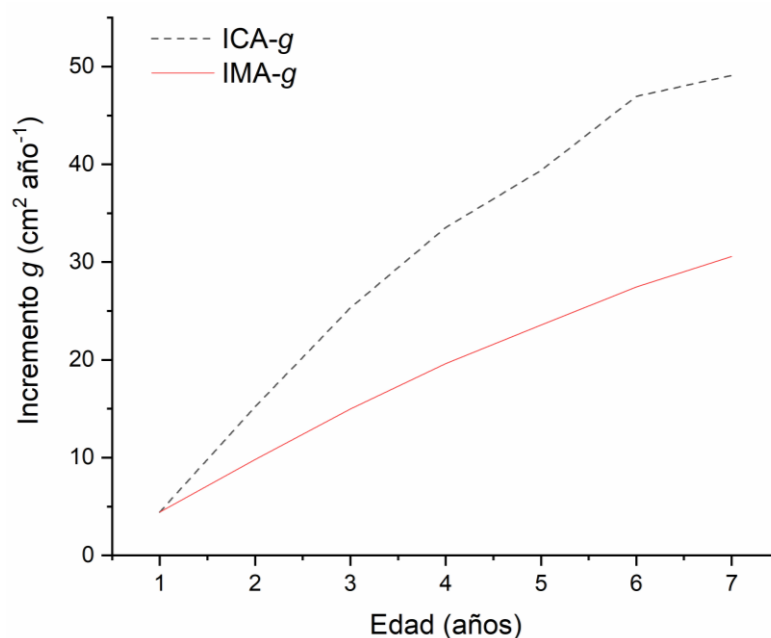


Figura 22. Curvas de incremento corriente anual del área basal (ICA-g) e incremento medio anual del área basal (IMA-g) de árboles de *Tectona grandis* "teca" en plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.

El rendimiento del área basal (Figura 23) revela un patrón sigmoideal típico del crecimiento de los árboles, es decir inicialmente el área basal es pequeño, e incrementa gradualmente, posteriormente ocurre un rápido incremento hasta un punto de inflexión a partir del cual se reduce la tasa de crecimiento (Prodan et al. 1997). En el presente estudio, el punto de inflexión no se presentó durante los primeros 7 años, indicando que los árboles continuaran ganando rápidamente mayor área basal.

La competencia entre árboles generalmente se define como una función del área basal. El monitoreo del rendimiento del área basal proporciona información para definir la intensidad y la edad para el raleo (Pérez y Kanninen 2005). Así, bajos rendimientos de área basal en plantaciones densas, podrían sugerir la necesidad de aplicar un raleo. En la plantación evaluada, el raleo fue aplicado al final del 4° año, lo cual favoreció al incremento del área basal en los siguientes años (Figura 21 y Figura 22)

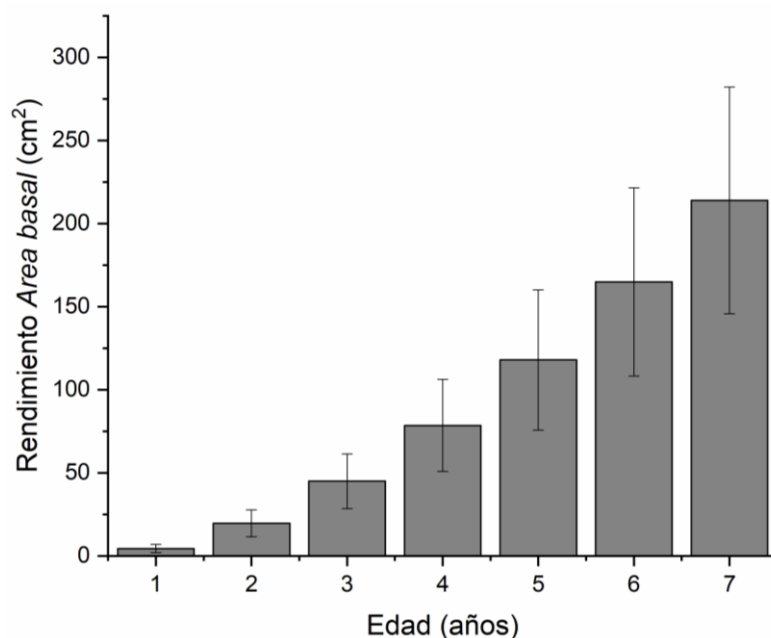


Figura 23. Rendimiento en área basal, en árboles de *Tectona grandis* "teca" en plantaciones forestales de Tahuamanu, Madre de Dios.

La plantación evaluada, presentó un gradual incremento del volumen por unidad de superficie ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) a cada año, excepto en el 5° año, periodo en que se produjo una leve disminución del incremento corriente anual del volumen (ICA-V) debido al raleo a una intensidad del 25% aplicado a finales del 4° año de crecimiento (Figura 24). A pesar de eso, el 6° y 7° año se obtuvieron mejores ICA-V, debido a que la disminución de la competencia a través del raleo genera una aceleración de la tasa de crecimiento, compensando así el volumen perdido por los árboles eliminados. Los valores de ICA-V fueron de $4,01 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, $16,48 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, $28,39 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, $38,11 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, $33,80 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, $40,46 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ y $42,43 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, respectivamente desde el 1° al 7° año de crecimiento.

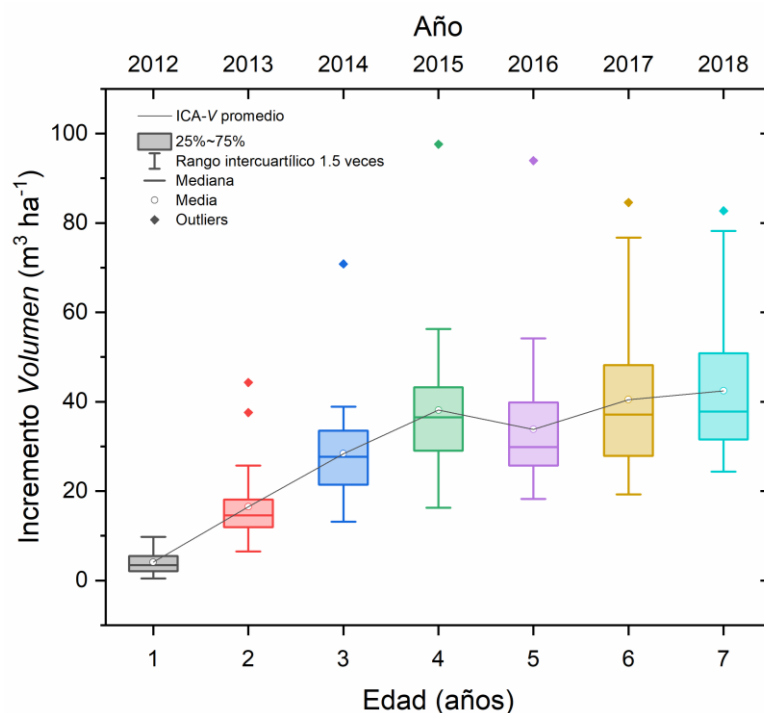


Figura 24. Distribución del incremento corriente anual del volumen (ICA-V) de plantaciones de *Tectona grandis* "teca", en Tahuamanu, Madre de Dios.

La intersección entre la curvas IMA e ICA, que coincide con el máximo IMA, es un parámetro que determina el “turno silvicultural” o “turno de corta biológico” o “edad de rotación” de los individuos (Prodan et al. 1997).

En el presente estudio, las curvas de ICA e IMA del volumen por hectárea, mostraron que, hasta el 7° año, no ocurre la intercepción de la curva de ICA-V con la curva de IMA-V (Figura 25), indicando que el “turno biológico” de la plantación de teca evaluada es superior a los 7 años.

Por tanto, estudios en edades más avanzadas son necesarios para definir el turno biológico de corta en las plantaciones de teca del Tahuamanu.

Hasta el 7° año la plantación alcanzó un IMA-V de $29,11 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con tendencia positiva de seguir incrementando en los siguientes años (Figura 25). Diversos estudios realizados en todo el mundo, revelan productividades similares o menores a lo encontrado en el presente estudio, en la misma edad; por ejemplo, en Venezuela se registran los más altos valores de IMA-V, de aproximadamente $32 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, mientras que, en Mato Grosso, Brasil, las plantaciones alcanzan los $27 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, o incluso $21,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Jerez-Rico y Coutinho 2017). En el continente asiático la productividad es mucho

más bajo, entre 5 y 20 m³ ha⁻¹ año⁻¹ a los 7 años de edad (Jerez-Rico y Coutinho 2017). Por otro lado, plantaciones establecidas con clones altamente productivos, han mostrado alto rendimiento superior a los 34 m³ ha⁻¹ año⁻¹ a los 7 años de edad en Brasil (PROTECA 2019).

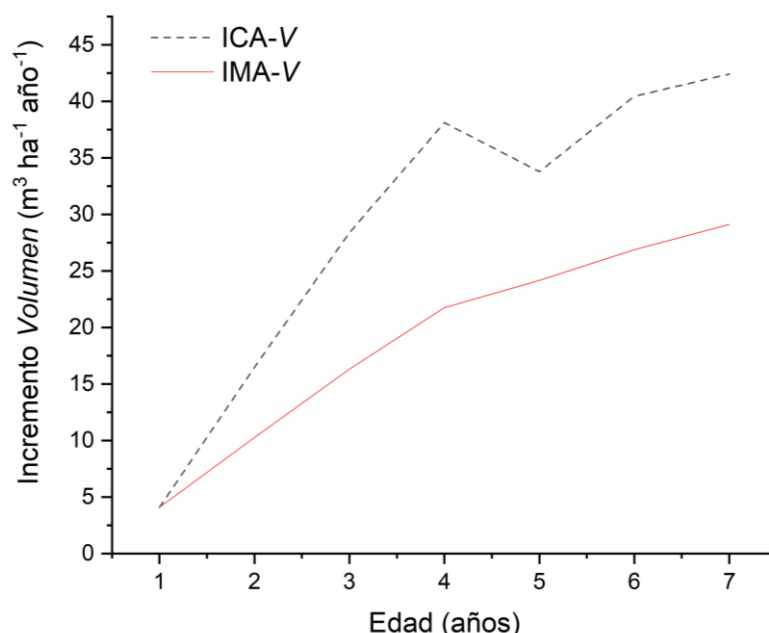


Figura 25. Incremento corriente anual del volumen (ICA-V) e incremento medio anual del volumen (IMA-V) de plantaciones de *Tectona grandis* "teca", en Tahuamanu, Madre de Dios.

Similar a lo observado para el área basal, el rendimiento del volumen de la plantación de teca evaluada, incrementó continuamente desde el 1° al 7° año, presentando una tendencia sigmoideal (Figura 26).

Los rendimientos de volumen, fueron de 4,01 m³ ha⁻¹, 20,57 m³ ha⁻¹, 48,96 m³ ha⁻¹, 87,07 m³ ha⁻¹, 120,87 m³ ha⁻¹, 161,33 m³ ha⁻¹ y 203,75 m³ ha⁻¹, respectivamente desde el 1° al 7° año de crecimiento.

Estos resultados muestran una alta productividad de la plantación de teca evaluado. De hecho, estos resultados son muy superiores a lo encontrado en Brasil, donde en plantaciones establecidas a partir de semillas, la productividad es de 150 m³ ha⁻¹ a 180 m³ ha⁻¹ a los 7 años de edad (PROTECA 2019; Kollert y Kleine 2017). No obstante, estos rendimientos son mucho menores a la de plantaciones establecidas con clones de alta productividad,

que pueden alcanzar fácilmente los 220 a 230 m³ ha⁻¹ después de 7 años de plantadas (PROTECA 2019; Kollert y Kleine 2017).

Sin embargo, en las plantaciones de teca, los rendimientos e IMA del volumen debe interpretarse con precaución e ir acompañado de información adicional, al menos del dap promedio del árbol, ya que los rendimientos de volumen se ven afectados por la densidad del rodal. El alto IMA-V puede asociarse con pequeños diámetros de árbol promedio, es decir, grandes incrementos de volumen por hectárea son fáciles de obtener en plantaciones sin aplicación de raleos (Jerez-Rico y Coutinho 2017). Lo anterior, muestra la importancia de la realización de raleos de las plantaciones. Pérez y Kanninen (2005) recomiendan realizar al menos 4 raleos durante la rotación entera.

En el presente estudio, un primer raleo fue realizado a los 4 años de edad. Así, los altos rendimientos e IMA del volumen estuvieron acompañados de grandes diámetros, indicando, por tanto, no sólo una buena productividad, si no también una buena calidad de producción, puesto que fustes de pequeños diámetros no son comercialmente deseables.

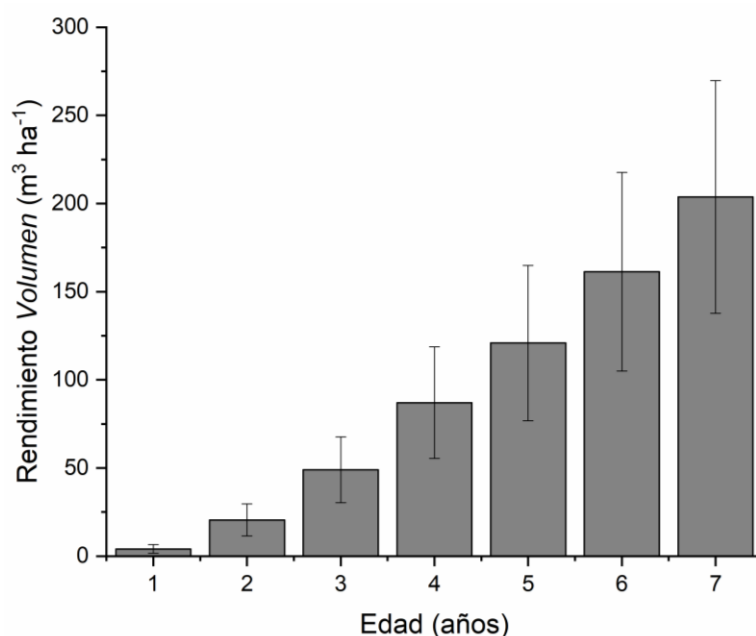


Figura 26. Rendimiento de volumen por hectárea, de plantaciones de *Tectona grandis* "teca", en Tahuamanu, Madre de Dios.

4.2. Biomasa y carbono almacenado del fuste en la plantación forestal.

La determinación de la densidad aparente, y posteriormente la estimación de la densidad básica, en conjunto con la medición del ancho de los anillos de crecimiento, permitieron estimar la biomasa y el carbono almacenado en el fuste de los árboles de teca, a cada año de crecimiento (Figura 27).

Con respecto a la biomasa, se observó que desde el 1° hasta el 4° año, el incremento corriente anual de la biomasa del fuste por hectárea (ICA-B) en la plantación aumentó sostenidamente, con valores de 1699 kg ha⁻¹, 6975 kg ha⁻¹, 12372 kg ha⁻¹, y 17100 kg ha⁻¹, respectivamente. En el 5° año hubo un descenso del ICA-B, debido al raleo a una intensidad del 25% realizado a finales del 4° año de crecimiento; no obstante, al 6° y 7° año el ICA-B nuevamente mostró una tendencia positiva de incremento (Figura 27). En estos periodos el ICA-B fue de 15182 kg ha⁻¹, 19233 kg ha⁻¹, y 21115 kg ha⁻¹ respectivamente.

De la misma manera, el incremento corriente anual del carbono almacenado en el fuste por hectárea (ICA-C) mostró similar tendencia que el ICA-B.

El ICA-C fue de 815 kg ha⁻¹, 3348 kg ha⁻¹, 5939 kg ha⁻¹, 8208 kg ha⁻¹, 7287 kg ha⁻¹, 9232 kg ha⁻¹, y 10135 kg ha⁻¹, respectivamente del 1° al 7° año de edad de la plantación.

Estas tendencias, indican que después del año 7, el ICA-B e ICA-C continuarán aumentando a cada año de crecimiento.

La variación inter-anual del ICA-B e ICA-C guardaron relación con los valores de ICA-V y densidad del leño de los anillos de crecimiento (Figura 17 y Figura 25), por tanto, anillos de crecimiento de mayor área, y de mayor densidad son indicadores de alta producción de biomasa y carbono almacenado en el fuste de los árboles. No obstante, previos estudios encontraron que la biomasa y la capacidad de acumulación de carbono en el fuste de los árboles, es más influenciada por la densidad del leño de los anillos, que por el ancho de los anillos de crecimiento (Venegas-González 2013). Así en árboles o en periodos con alta tasa de crecimiento no necesariamente se acumulará mayor biomasa

y carbono, si el leño producido es de baja densidad; en contraste, en árboles o en periodos en el que el leño es de alta densidad, manteniendo moderada tasa de crecimiento, se podrá acumular mayor biomasa y carbono durante aquel periodo y árbol. En el presente estudio, en general, las altas tasas de crecimiento, es decir mayor área de los anillos, estuvieron acompañados de altas densidades del leño, dando como resultado un incremento sostenido del ICA-B e ICA-C a lo largo de los 7 años de edad.

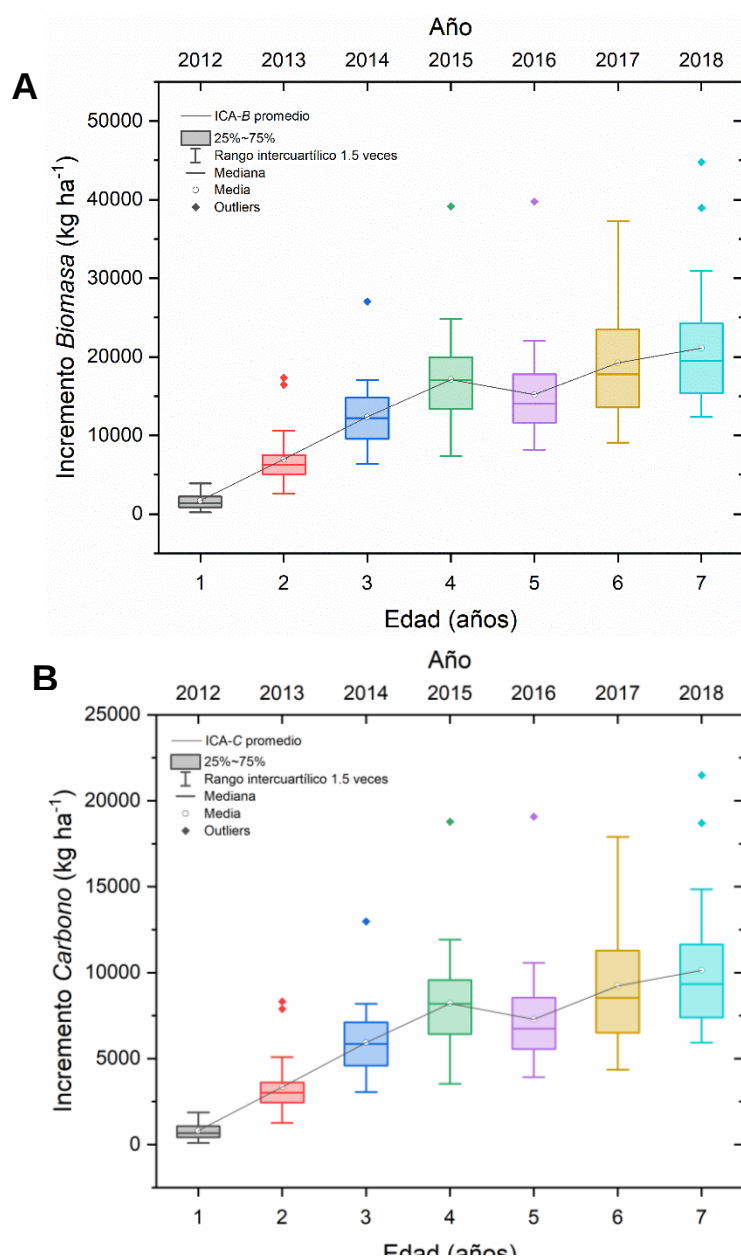


Figura 27. Distribución del incremento corriente anual de la biomasa del fuste por hectarea (ICA-B) (A), e incremento corriente anual del carbono almacenado del fuste por hectárea (ICA-C) (B), en plantaciones forestales de *Tectona grandis* "teca", Tahuamanu, Madre de Dios.

Las curvas de incremento medio anual de biomasa del fuste por hectárea (IMA-B) e incremento medio anual de carbono acumulado en el fuste por hectárea (IMA-C), tuvieron una tendencia positiva de aumento a mayor edad (Figura 28). El punto de inflexión que se produjo en el 4° año, fue debido al raleo aplicado en la plantación, no obstante, el IMA continuó incrementándose hasta el último año de evaluación. Las tendencias muestran que el IMA-B e IMA-C mantendrán un constante incremento en los siguientes años.

El IMA-B fue de 1699 kg ha⁻¹ año⁻¹, 4337 kg ha⁻¹ año⁻¹, 7015 kg ha⁻¹ año⁻¹, 9537 kg ha⁻¹ año⁻¹, 10666 kg ha⁻¹ año⁻¹, 12094 kg ha⁻¹ año⁻¹, y 13382 kg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente en el 1°, 2°, 3°, 4°, 5°, 6° y 7° año de edad de la plantación. Mientras que el IMA-C fue de 815 kg ha⁻¹ año⁻¹, 2082 kg ha⁻¹ año⁻¹, 3367 kg ha⁻¹ año⁻¹, 4578 kg ha⁻¹ año⁻¹, 5119 kg ha⁻¹ año⁻¹, 5805 kg ha⁻¹ año⁻¹, y 6424 kg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente.

Por otro lado, se observa que hasta el 7° año no ocurre la intersección entre las curvas ICA en IMA tanto para la biomasa como para el carbono (Figura 28), indicando que el turno óptimo de producción de biomasa y almacenamiento de carbono es superior a los 7 años, es decir la plantación tiene aún alta capacidad de almacenamiento de carbono. Estudios a mayor edad son necesarios para estimar el turno óptimo.

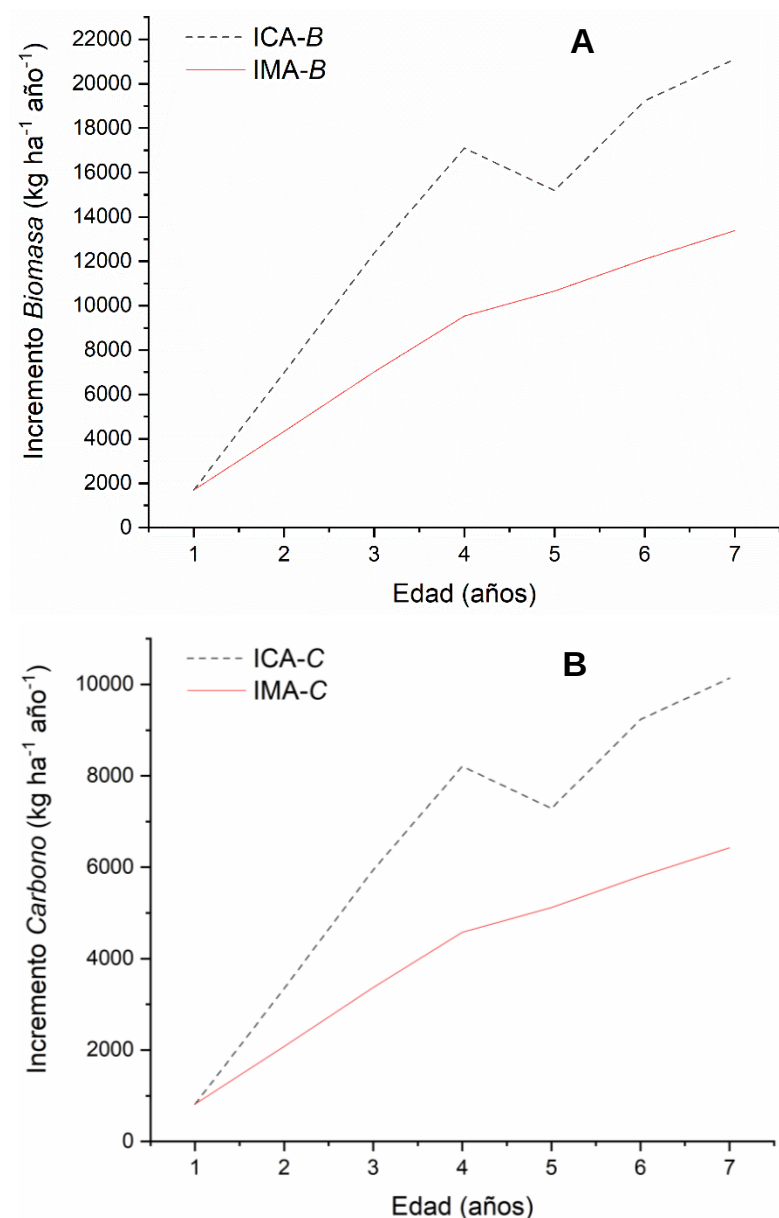


Figura 28. Curvas de incremento corriente anual (ICA-B) e incremento medio anual (IMA-B) de la biomasa del fuste por hectarea (A); e incremento corriente anual (ICA-C) e incremento medio anual (IMA-C) del carbono acumulado en el fuste por hectarea (B), en plantaciones forestales de *Tectona grandis* "teca", Tahuamanu, Madre de Dios

Similar a lo observado para el rendimiento de volumen, los rendimientos de biomasa y carbono de la plantación de teca evaluada, incrementó continuamente desde el 1° al 7° año, presentando una tendencia sigmoideal (Figura 29).

El rendimiento de biomasa fue de 1699 kg ha⁻¹, 8647 kg ha⁻¹, 21046 kg ha⁻¹, 38146 kg ha⁻¹, 53328 kg ha⁻¹, 72561 kg ha⁻¹ y 93676 kg ha⁻¹, respectivamente

desde el 1° al 7° año de crecimiento. A su vez, el rendimiento de carbono fue de 816 kg ha⁻¹, 4164 kg ha⁻¹, 10102 kg ha⁻¹, 18310 kg ha⁻¹, 25597 kg ha⁻¹, 34829 kg ha⁻¹, y 44965 kg ha⁻¹, respectivamente.

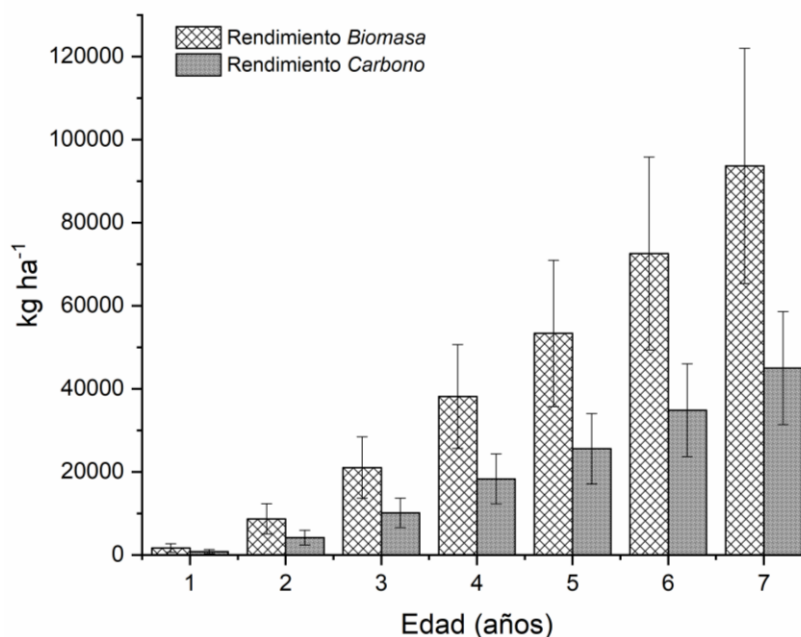


Figura 29. Rendimiento de Biomasa, y rendimiento de carbono almacenado en el fuste por hectárea, en plantaciones de *Tectona grandis* "teca", en Tahuamanu, Madre de Dios.

4.3. Modelo de predicción del almacenamiento de carbono

Los resultados mostrados líneas arriba se restringen a un horizonte de 7 años de crecimiento. El presente estudio tuvo esta limitación debido a la escasez de plantaciones manejadas de teca de mayor edad.

No obstante, es posible inferir los incrementos de biomasa y carbono a mayores edades mediante el uso de modelos de crecimiento sigmoidales. De hecho, estos modelos han mostrado alta eficiencia para predecir acuradamente variables dasométricas como área basal, volumen y biomasa en plantaciones forestales de diversas especies (Martínez 2015; Prodan et al. 1997), e inclusive para la teca (Bellote 2006).

El modelo sigmoidal Gompertz es uno de los más usados en las ciencias forestales, ajustándose bien a las observaciones de variables de crecimiento en poblaciones de árboles (Prodan et al. 1997; Rondeux y Díaz de Barrionuevo 2010).

Bajo estos antecedentes, las observaciones del rendimiento de carbono fueron utilizados para ajustar el modelo Gompertz, para posteriormente predecir los rendimientos de carbono hasta una edad de 20 años, turno de corta manejado comúnmente en plantaciones de teca.

El modelo Gompertz mostró un aceptable ajuste a las observaciones del rendimiento de carbono, con un coeficiente de determinación ajustado (R^2 adj) de 0,79; error cuadrático medio (RMSE) de 7817 kg ha⁻¹; y altamente significativo ($p < 0,001$) (Figura 30).

La ecuación del modelo de Gompertz resultante, fue expresada como:

$$y = ae^{-e^{(-k(x-xc))}}$$

Siendo sus 3 parámetros:

$a = 83185,9687$; es la amplitud de la curva, o longitud de la asíntota.

$k = 0,30709$; es el coeficiente de la tasa de crecimiento del área basal.

$xc = 5,47433$; es el punto (edad) de inflexión en el eje X, o centro de la curva

Y sus variables:

y = Rendimiento de carbono en kg ha⁻¹, como variable dependiente

x = tiempo en años, como variable independiente

Reemplazando los valores en la ecuación anterior, el modelo de Gompertz para la estimación del área basal fue:

$$Rend. \text{carbono} = 83185,9687e^{-e^{(-0,30709(tiempo-5,47433))}}$$

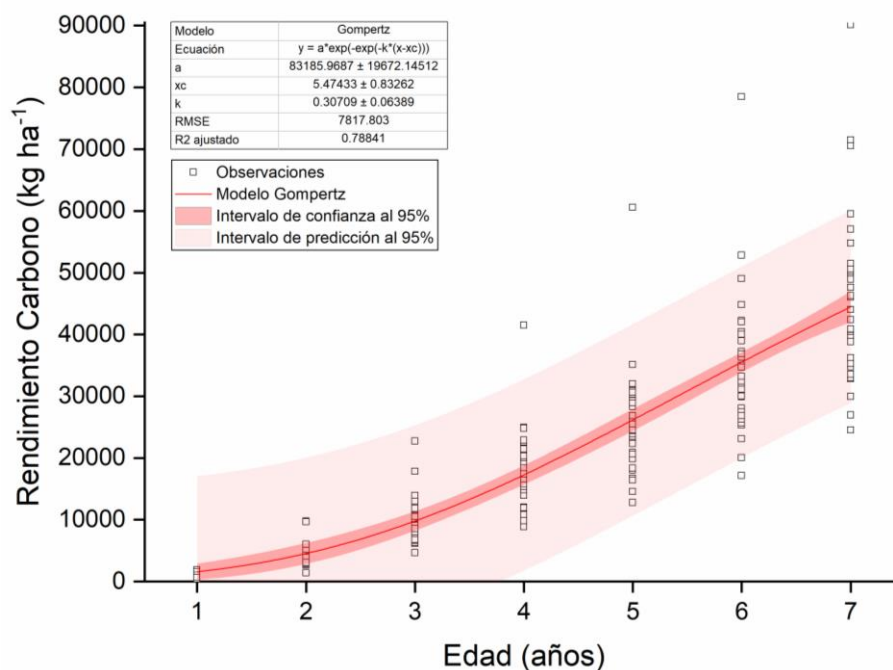


Figura 30. Modelo Gompertz, ajustado a las observaciones de rendimiento de carbono de 34 árboles muestreados en una plantación forestal de *Tectona grandis* “teca”, en Tahuamanu, Madre de Dios.

Una simulación utilizando el modelo resultante, para un periodo de tiempo de 20 años, permite obtener predicciones aceptables del rendimiento de carbono esperado (Figura 31).

Se observa que, a los 20 años el rendimiento de carbono del fuste en la plantación de teca sería de aproximadamente 82230 kg ha^{-1} , equivalente a un IMA-C de $4112 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Si el tiempo de rotación fuera menor, por ejemplo, de 18 años, el carbono almacenado en los fustes de los árboles sería de 81428 kg ha^{-1} con un IMA-C de $4523 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; asimismo a los 15 años el rendimiento de carbono sería de 78840 kg ha^{-1} con un IMA-C de $5256 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

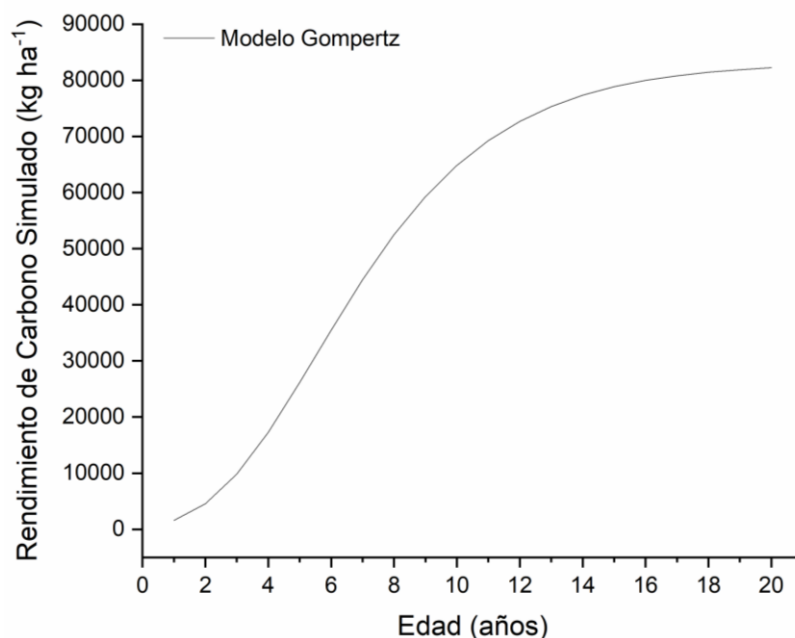


Figura 31. Curva de rendimiento de carbono simulada mediante el modelo de Gompertz hasta los 20 años de edad de la plantación de *Tectona grandis* "teca", en Tahuamanu, Madre de Dios.

Nuestros resultados de almacenamiento de carbono hasta el 7° año (IMA-C = 6424 kg ha⁻¹ año⁻¹ y rendimiento de carbono = 44965 kg ha⁻¹) son muy superiores a otros estudios en México, donde se encontró una capacidad de almacenamiento de carbono en torno a 3500 kg ha⁻¹ año⁻¹, en plantaciones de 8 años (Gallegos et al. 2009). No obstante es semejante a otros estudios en Panamá, en los que plantaciones de 10 años de edad, pueden acumular 4000 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Derwisch et al. 2009).

En general las estimaciones del carbono almacenada en las plantaciones de teca son muy variables, con IMA-C desde 2900 a 17000 kg ha⁻¹ año⁻¹ dependiendo de la edad de la plantación (Lopez Guzman 2017; Gallegos et al. 2009; Gerardo López, Estuardo Vaides y Alvarado 2018; Kraenzel et al. 2003b; Derwisch et al. 2009; Kaul, Mohren y Dadhwal 2010). Sin embargo, la mayoría de estos estudios han evaluado todo el componente aéreo de las plantaciones; en el presente estudio los resultados se restringen sólo al fuste, por tanto, comparaciones directas con resultados reportados en los estudios citados no son adecuados. No obstante, un estudio revela que el fuste puede contener aproximadamente el 58% del carbono almacenado en el

componente aéreo (HIRATSUKA et al. 2005). A partir de esto, puede realizarse ponderaciones para comparaciones más precisas.

La mayoría de los estudios han estimado el carbono almacenado en plantaciones con edades superiores a los 15 años. En el presente estudio, las proyecciones a través del modelo Gompertz muestran que a los 15 años el rendimiento de carbono sería de 78840 kg ha^{-1} con un IMA-C de $5256 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Esto proyectado al componente aéreo podría representar un rendimiento de casi $112000 \text{ kg ha}^{-1}$ o un IMA de $7463 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Estos valores proyectados, son bajos comparado con plantaciones de 15 años de edad en México que pueden almacenar anualmente $27300 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Lopez 2017).

No obstante, los resultados del presente estudio concuerdan con lo reportado en Guatemala, donde el rendimiento de carbono almacenado en plantaciones de teca con edades de 15 años, fue de $108000 \text{ kg ha}^{-1}$ (Gerardo, Estuardo y Alvarado 2018).

A la edad de 20 años, el modelo utilizado en el presente estudio revela un rendimiento de carbono de aproximadamente 82230 kg ha^{-1} , equivalente a un IMA-C de $4112 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, proyectado a todo el componente aéreo, equivaldría a $117000 \text{ kg ha}^{-1}$ de rendimiento o $5800 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de IMA. Estas cantidades son menores a proyecciones a 20 años realizadas en plantaciones de Panamá, capaces de almacenar $9600 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Derwisch et al. 2009).

En el continente asiático, específicamente en la India, lugar de procedencia de la teca, se han realizado innumerables investigaciones respecto a la estimación del stock de carbono secuestrado por las plantaciones de teca. Un reciente estudio revela que la teca almacena aproximadamente 2000 kg ha^{-1} anualmente (Kaul, Mohren y Dadhwal 2010). El mismo autor realiza una comparación con la capacidad de almacenamiento de otras especies, siendo que la teca almacena menor carbono comparado con *Populus* ($8000 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) o *Eucalyptus* ($6000 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Kaul, Mohren y Dadhwal (2010) muestra también que, al incrementar el tiempo de rotación, el stock de carbono por año disminuye considerablemente, por ejm, con una rotación de 60 años el stock

de carbono es de $3700 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, disminuyendo hasta $1700 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en una rotación de 150 años. En otro estudio en la India, se encontró que plantaciones de teca de 50 años secuestran aproximadamente $3620 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Sreejesh KK et al. 2013). En la región del Himalaya, en plantaciones jóvenes de 1, 5, 11, 18 24 y 30 años, el stock de carbono varía entre $940 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $6000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Jha 2005)

Los resultados obtenidos revelan que las plantaciones de teca instaladas en Tahuamanu, Madre de Dios, son un importante depósito de carbono. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los valores medios de almacenamiento de carbono para las plantaciones solo son válidos mientras que las plantaciones existen y se reemplazan después de cada cosecha. En contraste, los bosques almacenan carbono durante escalas de tiempo mucho más largas sin necesidad de intervención humana. No obstante, las plantaciones de árboles también almacenan carbono en productos hechos de madera cosechada, y esto constituye una parte importante de su potencial de almacenamiento de carbono.

El presente estudio, es un primer reporte de estimación de la capacidad de almacenamiento de carbono del fuste por las plantaciones forestales de teca, y brinda información básica para posteriores estudios visando implementar mecanismos de venta de bonos de carbono o valorización de los servicios ambientales que proporcionan los emprendimientos forestales de teca. En Perú otros estudios de este tipo no han sido realizados o no están disponibles, resaltando aún mas la importancia de éste primer reporte.

Posteriores estudios, en plantaciones de mayor edad son necesarios para monitorear acuradamente los incrementos y rendimientos de carbono en las plantaciones. Así mismo el desarrollo de ecuaciones alométricas propias para las plantaciones de teca de Madre de Dios son un tema importante a ser abordado en los futuros estudios, pues permitirían estimaciones aún más precisas. Estudios del carbono de ramas, follaje, raíces y carbono almacenado en el suelo de las plantaciones forestales de teca son también imprescindibles.

Los resultados del presente estudio, revelan que el uso de la de densitometría de rayos X en conjunto con técnicas dendrocronológicas se constituyen en una importante herramienta para la determinación indirecta, y de manera sencilla, de la biomasa y carbono almacenado en los fustes de los árboles de *Tectona grandis* “teca” de plantaciones forestales.

CONCLUSIONES

- La plantación de *Tectona grandis* “teca” hasta el 7° año produce aproximadamente 93676 kg ha⁻¹, o 13382 kg ha⁻¹ año⁻¹, de biomasa en el fuste de los árboles. Anualmente, la biomasa del fuste en la plantación es de 1699 kg ha⁻¹, 6975 kg ha⁻¹, 12372 kg ha⁻¹, y 17100 kg ha⁻¹, 15182 kg ha⁻¹, 19233 kg ha⁻¹, y 21115 kg ha⁻¹, respectivamente en el 1°, 2°, 3°, 4°, 5°, 6° y 7° año de edad, habiéndose realizado un raleo a una intensidad del 25% a finales del 4° año.

Por tanto, se acepta la hipótesis planteada de que la producción de biomasa del fuste aumenta significativamente a cada año.

- Los resultados del presente estudio y los antecedentes, indican que la plantación de *Tectona grandis* “teca” evaluada tiene una alta capacidad de almacenamiento de carbono en el fuste, de aproximadamente 44965 kg ha⁻¹, o 6424 kg ha⁻¹ año⁻¹ hasta el 7° año. Así mismo, anualmente la plantación incrementa de manera constante su capacidad de almacenamiento de carbono.

Por tanto, se acepta la hipótesis planteada, donde la acumulación de carbono en el fuste aumenta significativamente a cada año.

- Según el modelo de Gompertz construido (con buena calidad de ajuste) las plantaciones forestales de *Tectona grandis* “teca” podrían almacenar aproximadamente 78840 kg ha⁻¹ y 82230 kg ha⁻¹ de carbono en el fuste de los árboles, hasta la edad de 15 y 20 años respectivamente.

Se acepta la hipótesis planteada, el modelo de Gompertz tuvo un buen ajuste a las observaciones y permitieron estimar con precisión el almacenamiento de carbono del fuste a los 15 y 20 años de edad.

SUGERENCIAS

- Se recomienda realizar estudios de este tipo, en los próximos años, cuando las plantaciones alcancen edades superiores a 10 años, con lo cual podrían realizarse proyecciones más precisas de la capacidad de almacenamiento de carbono.
- Para mejorar las estimaciones, se sugiere construir ecuaciones de volumen, o ecuaciones alométricas para las plantaciones de teca instaladas en Tahuamanu, Madre de Dios. En el presente estudio debido a la complejidad del estudio se optó por usar ecuaciones desarrolladas en plantaciones de Costa Rica con similar crecimiento que la plantación evaluada, no obstante ecuaciones de volumen o alométricas propias, podrían mejorar las estimaciones de productividad, biomasa y stock de carbono.
- El presente estudio se limita al carbono almacenado en el fuste de los árboles, por tanto, para una estimación del carbono total almacenado en las plantaciones de teca, son necesarios otros estudios complementarios de carbono de ramas, follaje raíces y carbono almacenado en el suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, A.C., 1994. *Implantação da metodologia de densitometria de raios X em madeira*. S.I.: Universidade de São Paulo.
- BEBARTA, K.C. (Kailash C., 1999. *Teak : ecology, silviculture, management, and profitability* [en línea]. S.I.: International Book Distributors. [Consulta: 6 enero 2018]. ISBN 8170892627. Disponible en: https://books.google.com.pe/books/about/Teak.html?id=GyTbAAAAMAAJ&redir_esc=y.
- BELLOTE, A.F.J., 2006. Acúmulo de carbono no Pinus taeda estimado pela densitometria de raios X e análise de tronco. *Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo* [en línea], vol. 53, pp. 137-154. [Consulta: 20 marzo 2019]. Disponible en: http://oasisbr.ibict.br/vufind/Record/EMBR_f42df1e03b1ff7d2590afc1db648b236.
- BOWYER, J.L., SHMULSKY, R. y HAYGREEN, J.G., 2007. *Forest Products and Wood Science: An Introduction* [en línea]. S.I.: Wiley. ISBN 9780813820361. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?id=bmNLXwtkpD8C>.
- BRANDIS, D., 1986. *The Burma Teak Forests*. Special ed. Kuala Lumpur: Reprint from Garden and Forest, , Vol. IX.
- BRIENEN, R. y ZUIDEMA, P.A., 2003. Anillos de crecimiento de árboles maderables en Bolivia: su potencial para el manejo de bosques y una guía metodológica. *Promab*. Riberalta, Bolivia:
- BRIENEN, R.J.W. y ZUIDEMA, Æ.P.A., 2005. Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests: a test for six species using tree ring analysis. *Oecologia*, vol. 146, pp. 1-12. DOI 10.1007/s00442-005-0160-y.
- BROWN, S., 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. *FAO Forestry Paper* [en línea], vol. 134, no. August, pp. 55. [Consulta: 5 enero 2018]. ISSN 02586150. DOI ISBN 92-5-103955-0. Disponible en: <https://www.winrock.org/document/estimating->

biomass-and-biomass-change-of-tropical-forests-a-primer/.

CAMPOS, L.E.Z., 2009. *Dendrocronología en árboles de Tornillo, Cedrelinga cateniformis Ducke (Fabaceae), del Centro de Investigaciones Jenaro Herrera en el noreste de la Amazonia, Región Loreto – Perú* [en línea]. S.l.: Universidad Nacional Agraria La Molina. Disponible en: http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1388503&info=resumen&idioma=ENG%5Cnhttp://copernic.udg.es/arqueometria/PARTS/28_Proyecto28.pdf.

CARDOSO, N.S., 1991. *Caracterização anatômica da madeira, fenologia e relações com a atividade cambial de árvores de Teca (Tectona grandis L.f.)*. S.l.: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

CASTRO, V.R. de, 2011. *Aplicação de métodos não destrutivos na avaliação das propriedades físicas do lenho de árvores de Pinus caribaea var . hondurensis Barr . et Golf . e Tectona grandis (L . f .)*. S.l.: s.n.

CAVATASSI, R., 2004. Valuation methods for environmental benefits in forestry and watershed investment projects. [en línea]. S.l.: 04-01. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/007/ae056e/ae056e00.pdf>.

CORDERO, L D Pérez y KANNINEN, M., 2003. ABOVEGROUND BIOMASS OF TECTONA GRANDIS PLANTATIONS IN COSTA RICA. *Journal of Tropical Forest Science* [en línea], vol. 15, no. 1, pp. 199-213. [Consulta: 29 agosto 2018]. ISSN 01281283. Disponible en: <http://sci-hub.tw/https://www.jstor.org/stable/23616336>.

CORDERO, Luis Diego Pérez y KANNINEN, M., 2003. Provisional equations for estimating total and merchantable volume of tectona grandis trees in costa rica. *Forests Trees and Livelihoods* [en línea], vol. 13, no. 4, pp. 345-359. [Consulta: 14 marzo 2019]. ISSN 14728028. DOI 10.1080/14728028.2003.9752470. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14728028.2003.9752470>.

COULTHARD, B.L. y SMITH, D.J., 2013. DENDROCHRONOLOGY. *Encyclopedia of Quaternary Science: Second Edition*, pp. 453-458. DOI

10.1016/B978-0-444-53643-3.00355-1.

DE CAMINO, R. V., ALFARO, M.M. y SAGE, L.F.M., 2002. Teak (*Tectona Grandis*) in Central America. [en línea]. Rome: [Consulta: 6 enero 2018]. Forest Plantations, 19. Disponible en:
<http://www.fao.org/docrep/005/y7205e/y7205e00.htm>.

DERWISCH, S., SCHWENDENMANN, L., OLSCHESKI, R. y HÖLSCHER, D., 2009. Estimation and economic evaluation of aboveground carbon storage of *Tectona grandis* plantations in Western Panama. *New Forests* [en línea], vol. 37, no. 3, pp. 227-240. [Consulta: 29 agosto 2018]. ISSN 0169-4286. DOI 10.1007/s11056-008-9119-2. Disponible en:
<http://link.springer.com/10.1007/s11056-008-9119-2>.

DIÉ, A., DE RIDDER, M., CHERUBINI, P., KOUAMÉ, F.N., VERHEYDEN, A., KITIN, P., TOIRAMBE, B.B., VAN DEN BULCKE, J., VAN ACKER, J. y BEECKMAN, H., 2015. Tree rings show a different climatic response in a managed and a non-managed plantation of teak (*Tectona grandis*) in West Africa. *IAWA Journal*, vol. 36, no. 4, pp. 409-427. ISSN 22941932. DOI 10.1163/22941932-20150111.

DRESCHER, R., 2004. *Crescimento e produção de Tectona Grandis Linn F., em povoamentos jovens de duas regiões do estado de Mato Grosso - Brasil* [en línea]. S.l.: Universidade Federal de Santa Maria. [Consulta: 18 marzo 2019]. Disponible en:
<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/3722>.

DÜNISCH, O., MONTÓIA, V.R. y BAUCH, J., 2003. Dendroecological investigations on *Swietenia macrophylla* King and *Cedrela odorata* L. (Meliaceae) in the central Amazon. *Trees* [en línea], vol. 17, no. 3, pp. 244-250. ISSN 1432-2285. DOI 10.1007/s00468-002-0230-2. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s00468-002-0230-2>.

FLORESTECA, 2016. *Company files*. 2016. S.l.: s.n.

FRITTS, H.C., 1976. *Tree rings and climate* [en línea]. S.l.: Academic Press. [Consulta: 8 abril 2017]. ISBN 9780122684500. Disponible en:
<http://www.sciencedirect.com/science/book/9780122684500>.

- GALLEGOS, A., GARCÍA, A., PARADA, B., BENAVIDES, J. de D.,
HERNÁNDEZ, E. y GÓMEZ AQUILAR, J., 2009. Cuantificación de agua y carbono en plantaciones de Teca en Bahía de Bandera, Nayarit, Mexico. *Ciencia en Investigación - Instituto Forestal / Chile*, vol. 15, no. 1, pp. 81-90.
- GERARDO LÓPEZ, H., ESTUARDO VAIDES, E. y ALVARADO, A., 2018. Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía Costarricense* [en línea], vol. 42, no. 1. [Consulta: 30 agosto 2018]. ISSN 2215-2202. DOI 10.15517/rac.v42i1.32201. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/32201>.
- HACKENBERG, J., WASSENBERG, M., SPIECKER, H. y SUN, D., 2015. Non destructive method for biomass prediction combining TLS derived tree volume and wood density. *Forests* [en línea], vol. 6, no. 4, pp. 1274-1300. [Consulta: 29 agosto 2018]. ISSN 19994907. DOI 10.3390/f6041274. Disponible en: <http://www.mdpi.com/1999-4907/6/4/1274>.
- HAMBURG, S.P., 2000. Simple rules for measuring changes in ecosystem carbon in forestry-offset projects. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* [en línea], vol. 5, no. 1, pp. 25-37. [Consulta: 5 enero 2018]. ISSN 13812386. DOI 10.1023/A:1009692114618. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1023/A:1009692114618>.
- HIRATSUKA, M., CHINGCHAI, V., KANTINAN, P., SIRIRAT, J., SATO, A., NAKAYAMA, Y., MATSUNAMI, C., OSUMI, Y. y MORIKAWA, Y., 2005. Tree biomass and soil carbon in 17- and 22-year-old stands of teak (*Tectona grandis* L.f.) in northern Thailand. *Tropics* [en línea], vol. 14, no. 4, pp. 377-382. [Consulta: 14 marzo 2019]. ISSN 0917-415X. DOI 10.3759/tropics.14.377. Disponible en: <http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.JSTAGE/tropics/14.377?from=CrossRef>.
- HLAING, Z.C., TEPLYAKOV, V.K. y THANT, N.M.L., 2014. Influence of climate factors on tree-ring growth in teak (*Tectona grandis* L. f.) plantations in the Bago Yoma Range, Myanmar. *Forest Science and*

- Technology* [en línea], vol. 10, no. 1, pp. 40-45. ISSN 2158-0103. DOI 10.1080/21580103.2013.834275. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/21580103.2013.834275>.
- HOFFER, M. y TARDIF, J.C., 2009. False rings in jack pine and black spruce trees from eastern Manitoba as indicators of dry summers. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 39, no. 9, pp. 1722-1736. DOI 10.1139/X09-088.
- HOLMES, R.L., ADAMS, R.K. y FRITTS, H.C., 1986. Quality control of crossdating and measuring: a user's manual for program COFECHA. *Tree-ring chronologies of Western North America: California, Eastern Oregon and northern Great Basin*. Tucson: Arizona University, pp. 15-35.
- HOUGHTON, R.A., 2005. Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. *Global Change Biology* [en línea], vol. 11, no. 6, pp. 945-958. [Consulta: 29 agosto 2018]. ISSN 1354-1013. DOI 10.1111/j.1365-2486.2005.00955.x. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2486.2005.00955.x>.
- IPCC, 2013. Climate change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. . Geneva, Switzerland:
- JACOBY, G.C., 1989. Overview of tree-ring analysis in tropical regions. *Iawa Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 99-108.
- JEREZ-RICO, M. y COUTINHO, S. de A., 2017. Establishment and Management of Planted Teak Forests. En: W. KOLLERT y M. KLEINE (eds.), *The Global Teak Study: Analysis, Evaluation and Future Potential of Teak Resources*. Vienna: International Union of Forest Research Organizations (IUFRO), pp. 108.
- JHA, K.K., 2005. Storage and Flux of Organic Carbon in Young *Tectona grandis* Plantations in Moist Deciduous Forest. *Indian Forester* [en línea], vol. 131, no. 5, pp. 647-659. [Consulta: 30 agosto 2018]. ISSN 2321-094X. Disponible en: <http://www.indianforester.co.in/index.php/indianforester/article/view/1746>

- KAUL, M., MOHREN, G.M.J. y DADHWAL, V.K., 2010. Carbon storage and sequestration potential of selected tree species in India. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* [en línea], vol. 15, no. 5, pp. 489-510. [Consulta: 30 agosto 2018]. ISSN 1381-2386. DOI 10.1007/s11027-010-9230-5. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s11027-010-9230-5>.
- KEOGH, R.M., 2009. The future of teak and the high-grade tropical hardwood sector. *Planted Forests and Trees Working Paper Series*. Roma, Italy: Planted Forests and Trees Working Paper Series, FP/44E.
- KOKUTSE, A.D., BAILLÈRES, H., STOKES, A. y KOKOU, K., 2004. Proportion and quality of heartwood in Togolese teak (*Tectona grandis* L.f.). *Forest Ecology and Management* [en línea], vol. 189, no. 1-3, pp. 37-48. [Consulta: 20 marzo 2019]. ISSN 0378-1127. DOI 10.1016/J.FORECO.2003.07.041. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037811270300433X>.
- KOLLERT, W. y CHERUBINI, L., 2012. Teak resources and market assessment 2010. *Planted Forests and Trees Working Paper Series*. Roma, Italy: FP/47/E.
- KOLLERT, W. y KLEINE, M., 2017. *The Global Teak Study: Analysis, Evaluation and Future Potential of Teak Resources*. IUFRO Worl. Vienna: International Union of Forest Research Organizations (IUFRO). ISBN 9783902762771.
- KRAENZEL, M., CASTILLO, A., MOORE, T. y POTVIN, C., 2003a. Carbon storage of harvest-age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panama. *Forest Ecology and Management* [en línea], vol. 173, no. 1-3, pp. 213-225. [Consulta: 30 agosto 2018]. ISSN 0378-1127. DOI 10.1016/S0378-1127(02)00002-6. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112702000026>.
- KRAENZEL, M., CASTILLO, A., MOORE, T. y POTVIN, C., 2003b. Carbon storage of harvest-age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panama.

Forest Ecology and Management [en línea], vol. 173, no. 1-3, pp. 213-225. [Consulta: 14 marzo 2019]. ISSN 0378-1127. DOI 10.1016/S0378-1127(02)00002-6. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112702000026>.

KYAW, N.N., 2003. *Site influence on growth and phenotype of teak (Tectona grandis Linn. f.) in natural forests of Myanmar*. S.I.: Cuvillier. ISBN 3898737780.

LENZ, O., SCHÄR, E. y SCHWEINGRUBER, F., 1976. Methodische Probleme bei der radiographisch-densitometrischen Bestimmung der Dichte und der Jahrringbreiten von Holz. *Holzforschung*, vol. 30, pp. 114-123.

LOCOSSELLI, G.M., KROTTENTHALER, S., PITSCH, P., ANHUF, D. y CECCANTINI, G., 2017. Age and growth rate of congeneric tree species (*Hymenaea* spp. - Leguminosae) inhabiting different tropical biomes. *Erdkunde*, vol. 71, no. 1. ISSN 00140015. DOI 10.3112/erdkunde.2017.01.03.

LOPEZ GUZMAN, H.G., 2017. *Estimación de carbono aéreo en plantaciones de Teca (Tectona grandis L. f) de catorce y quince años de edad; Chahal, Alta Verapaz*. S.I.: Universidad Rafael Landívar.

MARTÍNEZ, A.P., 2015. *Interpretación dendroecológica y desarrollo de modelos de crecimiento en dos especies tropicales: Swietenia macrophylla y Cedrela odorata en la Reserva de Biosfera Maya, Petén, Guatemala*. S.I.: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

MIDGLEY, S., SOMAIYA, R.T., STEVENS, P.R., BROWN, A., KIEN, N.D. y LAITY, R., 2015. *Planted teak: global production and markets, with reference to Solomon Islands*. . Canberra, Australia:

MOHAN KUMAR, B. y NAIR, P.K.R., 2011. *Carbon sequestration potential of agroforestry systems : opportunities and challenges*. S.I.: Springer. ISBN 9789400716308.

MOYA, R., BERROCAL, A., SERRANO, J.R. y TOMAZELLO FO, M., 2009.

Radial variation of anatomical features, wood density and decay resistance in teak (*Tectona grandis*) from two qualities of growing sites and two climatic regions of Costa Rica. *Forest Systems* [en línea], vol. 18, no. 2, pp. 119. [Consulta: 14 abril 2018]. ISSN 2171-9845. DOI 10.5424/fs/2009182-01055. Disponible en: <http://revistas.inia.es/index.php/fs/article/view/1055>.

MOYA, R., BOND, B. y QUESADA, H., 2014. A review of heartwood properties of *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations. *Wood Science and Technology*, vol. 48, no. 2, pp. 411-433. ISSN 00437719. DOI 10.1007/s00226-014-0618-3.

OLIVEIRA, J.T., 1997. *Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil*. S.l.: Universidade de São Paulo.

ORTEGA RODRIGUEZ, D.R., ANDRADE, G. de C., BELLOTE, A.F.J. y TOMAZELLO-FILHO, M., 2018. Effect of pulp and paper mill sludge on the development of 17-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) trees in Southern Brazil. *Forest Ecology and Management* [en línea], vol. 422, pp. 179-189. [Consulta: 30 agosto 2018]. ISSN 03781127. DOI 10.1016/j.foreco.2018.04.016. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112718300951>.

PANDEY, D. y BROWN, C., 2000. Teak: A global overview. *Unasylva*, vol. 51, no. 201, pp. 3-13. ISSN 00416436.

PARKER, M. y KENNEDY, W.W., 1993. The status of radiation densitometry for measurement of Wood specific gravity. *Non-destructive evaluation of wood by near infrared reflectance spectroscopy*. Kolding: Biotechnological Institute, pp. 57.

PEREZ, D., 2008. GROWTH AND VOLUME EQUATIONS DEVELOPED FROM STEM ANALYSIS FOR *TECTONA GRANDIS* IN COSTA RICA. *Journal of Tropical Forest Science* [en línea], vol. 20, no. 1, pp. 66-75. ISSN 01281283. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/23616489>.

PÉREZ, D. y KANNINEN, M., 2005. Stand growth scenarios for *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management* [en

- línea], vol. 210, no. 1-3, pp. 425-441. [Consulta: 6 enero 2018]. ISSN 0378-1127. DOI 10.1016/J.FORECO.2005.02.037. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112705001222>.
- POLGE, H., 1966. Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants. Application dans les domaines technologique et physiologique. *Annual Science Forestry*, vol. 23, no. 1, pp. 1-206.
- PRETZSCH, H., 2009. From Primary Production to Growth and Harvestable Yield and Vice Versa. *Forest Dynamics, Growth and Yield* [en línea]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 41-99. [Consulta: 11 abril 2017]. Disponible en: http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-88307-4_2.
- PRIYA, P. y BHAT, K., 1998. False ring formation in teak (*Tectona grandis* L.f.) and the influence of environmental factors. *Forest Ecology and Management*, vol. 108, pp. 215-222. ISSN 03781127. DOI 10.1016/S0378-1127(98)00227-8.
- PRODAN, M., PETERS, R., COX, F. y REAL, P., 1997. *Mensura Forestal*. San Jose, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. ISBN 9290393041.
- PROTECA, 2019. Teca clonal – La genética en favor de su bosque |. [en línea]. [Consulta: 19 marzo 2019]. Disponible en: <http://proteca.com.br/teca-clonal/?lang=es>.
- PUMIJUMNONG, N., ECKSTEIN, D. y SASS, U., 1995. Tree-Ring Research on *Tectona Grandis* in Northern Thailand. *IAWA Journal*, vol. 16, no. 4, pp. 385-392. ISSN 09281541. DOI 10.1163/22941932-90001428.
- RONDEUX, J. y DÍAZ DE BARRIONUEVO, A., 2010. *Medición de árboles y masas forestales*. S.l.: Mundi Prensa. ISBN 9788484763864.
- ROSERO, J.A., 2009. *Dendrocronología de árboles de mogno, Swietenia macrophylla King., Meliaceae, ocorrentes na floresta tropical Amazônica do Departamento de Madre de Dios, Peru* [en línea]. Piracicaba:

Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo. [Consulta: 12 abril 2017]. Disponible en:
<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-18052009-165913/>.

SENAMHI, 2008. Tourist Climate Guide. . Lima, Perú:

SETTE JR, C.R., FILHO, M.T., TADEU, C. y PAUL, J., 2010. Crescimento em diametro do tronco das árvores de *E. grandis* e relação com as variáveis climáticas e fertilização mineral. *Revista Árvore*, vol. 34, no. 6, pp. 979-990. ISSN 01006762. DOI 10.1590/S0100-67622010000600003.

SMIT, L. y OESTREICH FILHO, E., 2014. Key factors for optimizing teak growth, a case study in Tangara da Serra, Brazil. *Tectona Agroflorestal* [en línea]. S.l.: s.n., Disponible en:
[http://www.teaknet.org/%0Adownload/teaknet2014/Session IV/conf_2.pdf](http://www.teaknet.org/%0Adownload/teaknet2014/Session%20IV/conf_2.pdf).

SREEJESH KK, THOMAS TP, RUGMINI P, PRASANTH KM y KRIPA PK, 2013. Carbon Sequestration Potential of Teak (*Tectona grandis*) Plantations in Kerala. *Research Journal of Recent Sciences* [en línea], vol. 2, pp. 167-170. [Consulta: 30 agosto 2018]. Disponible en:
www.isca.in.

TINT, K., 1980. *Dynamic growth and yield models for Burma teak* [en línea]. Hamburg: Kommissionsverlag Buchh. M. Wiedebusch. [Consulta: 12 abril 2018]. Disponible en: <http://www.worldcat.org/title/dynamic-growth-and-yield-models-for-burma-teak/oclc/20817082>.

TOMAZELLO FILHO, M. y BOTOSSO, P.C., 2001. análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais: dendrocronología e dendroclimatología. En: N.B. MAIA, H.L. MARTOS y W. BARRELA (eds.), *Indicadores ambientais: conceitos e aplicações*. S.l.: EDUC/COMPED/INEP, pp. 117-143.

TOMAZELLO FILHO, M., ROIG, F.A. y ZEVALLOS POLLITO, P.A., 2009. Dendrocronología y dendroecología tropical: Marco histórico y

experiencias exitosas en los países de América Latina. *Ecología en Bolivia*, vol. 44, no. 2, pp. 73-82. ISSN 1605-2528.

TOMAZELLO, M., BRAZOLIN, S., CHAGAS, M.P., OLIVEIRA, J.T.S., BALLARIN, a. W. y BENJAMIN, C. a, 2008. Application of X-Ray Technique in Nondestructive Evaluation of Eucalypt Wood. *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 10, no. 2, pp. 139-149. ISSN 0718-221X. DOI 10.4067/S0718-221X2008000200006.

UGALDE ARIAS, L.A., 2013. *Teak: new trends in silviculture, commercialization and wood utilization* [en línea]. S.I.: International Forestry and Agroforestry. [Consulta: 19 marzo 2018]. ISBN 9789968477161. Disponible en: <http://catalogo.infoagro.hn/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=22917>.

VAN LAAR, A. y AKÇA, A., 2007. *Forest mensuration*. S.I.: Springer. ISBN 9781402059919.

VENEGAS-GONZÁLEZ, A., 2013. *Dendrocronologia de árvores de Tectona grandis L. e Pinus caribaea var. hondurensis Barr. et Golf de plantações da Mata da Pedreira, Campus da ESALQ-USP, Piracicaba, SP*. S.I.: Universidade de São Paulo.

VENEGAS-GONZÁLEZ, A., VON ARX, G., CHAGAS, M.P. y FILHO, M.T., 2015. Plasticity in xylem anatomical traits of two tropical species in response to intra-seasonal climate variability. *Trees* [en línea], vol. 29, no. 2, pp. 423-435. ISSN 1432-2285. DOI 10.1007/s00468-014-1121-z. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s00468-014-1121-z>.

WALKER, W., 2011. *Guía de campo para la estimación de biomasa y carbono forestal*. . Massachusetts:

WORBES, M., 1995. How to measure growth dynamics in tropical trees a review. *IAWA journal*, vol. 16, no. 4, pp. 337-351.

WORBES, M., 1999. Annual growth rings, rainfall-dependent growth and long-term growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. *Journal of Ecology*, vol. 87, no. 3, pp. 391-403. ISSN 00220477. DOI 10.1046/j.1365-2745.1999.00361.x.

WORBES, M., STASCHEL, R., ROLOFF, A. y JUNK, W.J., 2003. Tree ring analysis reveals age structure , dynamics and wood production of a natural forest stand in Cameroon. , vol. 173, pp. 105-123.

ANEXOS

Tabla 2: Circunferencia y coordenadas de los árboles muestreados.

Árbol N°	CAP (cm)	Coordenadas UTM	
		Este	Note
01	75.5	441780	8757017
02	50.8	441788	8757017
03	57.5	441782	8756993
04	45	441772	8757022
05	50	441772	8757051
06	67	441767	8757081
07	60	441767	8757110
08	52.4	441771	8757101
09	61	441779	8757068
10	69	441786	8757037
11	55.5	441789	8756999
12	60.5	441796	8757001
13	57.5	441788	8757028
14	48	441787	8757067
15	57	441788	8757091
16	60.5	441787	8757100
17	56	441794	8757009
18	48	441803	8757023
19	56.5	441801	8757067
20	64.5	441797	8757102
21	61.5	441792	8757137
22	53.5	441796	8757134
23	73	441797	8757120
24	64	441803	8757092
25	54	441808	8757067
26	62.5	441812	8757040
27	51.5	441803	8757039
28	58.8	441804	8757065
29	52	441812	8757082
30	50	441809	8757103
31	66	441807	8757112
32	56.5	441800	8757122
33	60	441793	8757121
34	71.5	441785	8757128

Tabla 3. Base de datos

Edad	Año	Árbol	Densidad aparente (g cm ⁻³)	Densidad básica (g cm ⁻³)	Ancho del anillo (cm)	ICA dap (cm)	ICA-g (cm)	Rendimiento V (m ³)	ICA-V (m ³ ha ⁻¹)	ICA-B (kg ha ⁻¹)	ICA-C (kg ha ⁻¹)
1	2012	1	0,51	0,39	1,59	3,18	7,92	0,01	7,71	3020	1449
2	2013	1	0,51	0,39	2,31	4,62	39,79	0,05	44,29	17320	8314
3	2014	1	0,49	0,38	2,02	4,03	62,12	0,12	70,80	27031	12975
4	2015	1	0,52	0,40	1,96	3,92	84,90	0,21	97,60	39123	18779
5	2016	1	0,57	0,42	1,95	3,90	108,46	0,33	93,94	39736	19073
6	2017	1	0,60	0,44	1,47	2,94	97,37	0,44	84,56	37277	17893
7	2018	1	0,64	0,46	0,82	1,64	60,42	0,51	52,54	24262	11646
1	2012	2	0,53	0,40	1,71	3,43	9,22	0,01	9,11	3670	1761
2	2013	2	0,59	0,44	1,99	3,97	33,79	0,04	37,59	16439	7891
3	2014	2	0,60	0,44	1,26	2,52	34,27	0,08	38,91	17048	8183
4	2015	2	0,62	0,45	0,85	1,70	28,70	0,11	32,80	14733	7072
5	2016	2	0,66	0,47	0,66	1,32	25,36	0,14	21,81	10298	4943
6	2017	2	0,74	0,52	0,56	1,11	23,57	0,17	20,32	10473	5027
7	2018	2	0,73	0,51	0,61	1,23	28,24	0,20	24,37	12355	5931
1	2012	3	0,61	0,45	0,89	1,77	2,47	0,00	2,05	916	440
2	2013	3	0,64	0,46	1,12	2,24	10,16	0,01	10,76	4969	2385
3	2014	3	0,64	0,46	1,21	2,42	19,83	0,03	22,01	10119	4857
4	2015	3	0,62	0,45	1,19	2,39	28,57	0,06	32,29	14602	7009
5	2016	3	0,62	0,45	1,04	2,08	32,24	0,10	27,56	12467	5984
6	2017	3	0,69	0,49	1,45	2,89	56,06	0,16	48,22	23504	11282
7	2018	3	0,71	0,50	0,72	1,45	33,04	0,20	28,52	14254	6842
1	2012	4	0,54	0,41	0,70	1,40	1,54	0,00	1,15	471	226
2	2013	4	0,66	0,47	1,37	2,75	11,95	0,01	12,60	5919	2841
3	2014	4	0,68	0,48	0,77	1,54	11,90	0,03	13,17	6372	3058
4	2015	4	0,70	0,49	1,03	2,06	21,71	0,05	24,41	12028	5774
5	2016	4	0,66	0,47	0,92	1,83	24,94	0,08	21,24	10073	4835
6	2017	4	0,69	0,49	0,95	1,90	31,51	0,11	26,99	13218	6344
7	2018	4	0,75	0,52	0,83	1,67	32,22	0,15	27,71	14336	6881
1	2012	5	0,62	0,45	0,50	1,00	0,79	0,00	0,47	213	102
2	2013	5	0,53	0,41	1,01	2,03	6,42	0,01	6,48	2627	1261
3	2014	5	0,56	0,42	1,14	2,28	14,91	0,02	16,31	6856	3291
4	2015	5	0,55	0,42	0,96	1,91	18,83	0,04	21,10	8774	4212
5	2016	5	0,62	0,45	0,85	1,69	21,44	0,07	18,21	8168	3920
6	2017	5	0,66	0,47	0,74	1,49	22,56	0,09	19,28	9078	4357
7	2018	5	0,70	0,50	1,00	2,01	36,01	0,13	30,91	15316	7352
1	2012	6	0,63	0,45	1,00	2,00	3,14	0,00	2,72	1234	593
2	2013	6	0,63	0,46	1,52	3,04	16,77	0,02	18,10	8284	3976
3	2014	6	0,70	0,49	1,34	2,68	26,84	0,05	30,10	14821	7114
4	2015	6	0,69	0,49	1,34	2,67	38,01	0,09	43,22	21191	10172
5	2016	6	0,68	0,48	1,38	2,76	51,11	0,15	43,91	21116	10136
6	2017	6	0,78	0,53	1,65	3,31	76,87	0,23	66,37	35463	17022
7	2018	6	0,79	0,54	1,68	3,35	95,43	0,34	82,69	44762	21486
1	2012	7	0,52	0,40	0,98	1,97	3,04	0,00	2,61	1040	499
2	2013	7	0,59	0,43	1,13	2,26	10,99	0,01	11,72	5085	2441
3	2014	7	0,60	0,44	1,40	2,81	24,85	0,04	27,70	12206	5859
4	2015	7	0,65	0,47	1,28	2,57	33,52	0,08	38,01	17749	8520
5	2016	7	0,62	0,45	0,94	1,88	31,18	0,11	26,71	12115	5815
6	2017	7	0,69	0,49	0,86	1,72	33,34	0,15	28,68	14020	6729
7	2018	7	0,75	0,52	0,97	1,95	43,32	0,19	37,37	19489	9355
1	2012	8	0,60	0,44	0,80	1,60	2,01	0,00	1,60	704	338
2	2013	8	0,58	0,43	1,52	3,04	14,87	0,02	15,87	6832	3279
3	2014	8	0,62	0,45	1,21	2,41	22,12	0,04	24,70	11137	5346
4	2015	8	0,62	0,45	1,39	2,79	36,96	0,08	41,93	18907	9075
5	2016	8	0,65	0,46	1,05	2,10	35,96	0,12	30,83	14316	6872
6	2017	8	0,64	0,46	0,97	1,94	39,30	0,16	33,84	15654	7514

7	2018	8	0,74	0,52	0,75	1,51	34,65	0,20	29,91	15409	7396
1	2012	9	0,57	0,43	0,83	1,66	2,16	0,00	1,75	745	358
2	2013	9	0,55	0,41	1,22	2,44	11,02	0,01	11,67	4834	2320
3	2014	9	0,61	0,45	0,97	1,93	15,37	0,03	17,04	7629	3662
4	2015	9	0,66	0,47	0,82	1,64	17,64	0,05	19,85	9327	4477
5	2016	9	0,61	0,44	1,11	2,22	30,57	0,08	26,04	11582	5559
6	2017	9	0,68	0,48	1,60	3,20	57,80	0,14	49,63	23978	11509
7	2018	9	0,78	0,53	1,12	2,25	50,22	0,20	43,33	23151	11113
1	2012	10	0,51	0,39	1,18	2,36	4,37	0,00	3,98	1557	748
2	2013	10	0,50	0,39	1,50	3,00	18,15	0,02	19,74	7706	3699
3	2014	10	0,55	0,41	1,32	2,64	27,73	0,05	31,17	12824	6156
4	2015	10	0,58	0,43	1,41	2,82	41,63	0,10	47,40	20287	9738
5	2016	10	0,58	0,43	1,53	3,07	59,51	0,16	51,18	22029	10574
6	2017	10	0,66	0,47	1,21	2,43	57,53	0,23	49,69	23552	11305
7	2018	10	0,68	0,48	1,34	2,68	74,21	0,31	64,27	30926	14844
1	2012	11	0,66	0,47	1,60	3,20	8,02	0,01	7,82	3699	1775
2	2013	11	0,63	0,46	1,21	2,41	16,66	0,02	18,30	8399	4031
3	2014	11	0,69	0,49	1,11	2,23	23,53	0,05	26,46	12852	6169
4	2015	11	0,68	0,48	1,28	2,55	36,52	0,09	41,54	19954	9578
5	2016	11	0,67	0,48	0,96	1,92	34,16	0,13	29,32	14044	6741
6	2017	11	0,74	0,52	0,91	1,82	37,69	0,17	32,46	16734	8032
7	2018	11	0,78	0,54	0,93	1,85	43,75	0,22	37,79	20223	9707
1	2012	12	0,58	0,43	1,46	2,92	6,71	0,01	6,43	2775	1332
2	2013	12	0,54	0,41	0,97	1,94	11,87	0,02	12,92	5279	2534
3	2014	12	0,59	0,44	1,64	3,28	33,57	0,05	37,68	16396	7870
4	2015	12	0,62	0,45	1,04	2,08	30,07	0,09	34,21	15414	7399
5	2016	12	0,61	0,45	0,99	1,97	34,76	0,13	29,83	13333	6400
6	2017	12	0,68	0,49	0,93	1,86	38,28	0,17	32,97	16002	7681
7	2018	12	0,76	0,52	0,90	1,80	42,24	0,21	36,48	19080	9159
1	2012	13	0,52	0,40	1,77	3,54	9,84	0,01	9,77	3902	1873
2	2013	13	0,56	0,42	1,09	2,18	15,86	0,03	17,48	7365	3535
3	2014	13	0,59	0,44	1,42	2,85	31,98	0,06	36,05	15777	7573
4	2015	13	0,61	0,45	1,31	2,61	40,49	0,10	46,16	20610	9893
5	2016	13	0,59	0,43	1,07	2,14	41,09	0,15	35,34	15350	7368
6	2017	13	0,60	0,44	1,22	2,44	55,70	0,21	48,08	21290	10219
7	2018	13	0,64	0,46	1,08	2,16	57,06	0,27	49,38	22885	10985
1	2012	14	0,51	0,40	1,24	2,48	4,84	0,00	4,46	1763	846
2	2013	14	0,53	0,40	1,00	2,00	10,95	0,02	11,81	4780	2294
3	2014	14	0,61	0,44	0,79	1,59	13,18	0,03	14,64	6497	3119
4	2015	14	0,62	0,45	0,68	1,37	14,49	0,05	16,29	7362	3534
5	2016	14	0,57	0,42	1,03	2,06	27,48	0,07	23,38	9928	4765
6	2017	14	0,58	0,43	0,95	1,90	31,17	0,11	26,69	11411	5477
7	2018	14	0,63	0,46	0,95	1,90	36,78	0,15	31,63	14397	6910
1	2012	15	0,61	0,45	0,87	1,74	2,38	0,00	1,96	879	422
2	2013	15	0,59	0,43	1,18	2,35	10,79	0,01	11,44	4969	2385
3	2014	15	0,56	0,42	1,14	2,29	18,84	0,03	20,92	8811	4229
4	2015	15	0,59	0,44	1,22	2,43	29,06	0,06	32,83	14301	6865
5	2016	15	0,54	0,41	1,30	2,59	41,17	0,11	35,22	14330	6879
6	2017	15	0,57	0,42	1,36	2,72	54,48	0,17	46,89	19870	9538
7	2018	15	0,62	0,45	1,02	2,05	48,71	0,22	42,08	18958	9100
1	2012	16	0,50	0,39	0,85	1,69	2,25	0,00	1,83	712	342
2	2013	16	0,54	0,41	1,22	2,45	11,22	0,01	11,89	4857	2331
3	2014	16	0,62	0,45	1,34	2,67	22,97	0,04	25,56	11544	5541
4	2015	16	0,65	0,47	1,27	2,54	32,25	0,07	36,53	17073	8195
5	2016	16	0,67	0,48	1,16	2,31	38,19	0,11	32,71	15552	7465
6	2017	16	0,71	0,50	1,56	3,11	64,62	0,19	55,67	27734	13312
7	2018	16	0,78	0,54	1,17	2,35	58,83	0,25	50,87	27223	13067
1	2012	18	0,59	0,44	1,57	3,13	7,70	0,01	7,48	3256	1563
2	2013	18	0,58	0,43	1,02	2,04	13,31	0,02	14,56	6296	3022
3	2014	18	0,64	0,46	0,91	1,82	17,42	0,04	19,50	9028	4334

4	2015	18	0,72	0,50	0,87	1,74	21,47	0,06	24,29	12255	5882
5	2016	18	0,69	0,49	0,83	1,66	25,00	0,09	21,35	10432	5007
6	2017	18	0,73	0,51	0,74	1,49	26,07	0,12	22,36	11397	5471
7	2018	18	0,76	0,52	0,87	1,74	34,78	0,16	29,94	15671	7522
1	2012	20	0,45	0,36	1,53	3,06	7,37	0,01	7,13	2572	1235
2	2013	20	0,52	0,40	1,25	2,49	16,87	0,02	18,50	7319	3513
3	2014	20	0,55	0,41	1,41	2,83	30,98	0,06	34,89	14370	6898
4	2015	20	0,58	0,43	1,31	2,62	39,97	0,10	45,54	19634	9424
5	2016	20	0,62	0,45	1,29	2,57	49,67	0,16	42,72	19196	9214
6	2017	20	0,68	0,48	1,27	2,53	59,11	0,22	51,04	24506	11763
7	2018	20	0,72	0,50	1,12	2,25	60,83	0,29	52,67	26505	12722
1	2012	21	0,56	0,42	1,10	2,21	3,83	0,00	3,42	1427	685
2	2013	21	0,60	0,44	1,40	2,79	15,82	0,02	17,11	7550	3624
3	2014	21	0,62	0,45	1,47	2,94	29,85	0,05	33,50	15084	7240
4	2015	21	0,63	0,45	1,31	2,61	37,97	0,09	43,20	19622	9419
5	2016	21	0,67	0,47	1,32	2,65	49,37	0,15	42,42	20145	9670
6	2017	21	0,64	0,46	1,01	2,03	45,21	0,20	39,01	17925	8604
7	2018	21	0,68	0,48	0,98	1,96	49,98	0,25	43,23	20796	9982
1	2012	22	0,54	0,41	1,36	2,71	5,78	0,01	5,45	2232	1071
2	2013	22	0,57	0,42	1,11	2,22	13,33	0,02	14,49	6143	2949
3	2014	22	0,64	0,46	1,54	3,09	31,41	0,05	35,25	16210	7781
4	2015	22	0,68	0,48	0,72	1,43	19,69	0,07	22,36	10835	5201
5	2016	22	0,61	0,45	0,92	1,84	30,06	0,11	25,74	11492	5516
6	2017	22	0,64	0,46	0,76	1,53	28,99	0,14	24,92	11542	5540
7	2018	22	0,68	0,49	0,78	1,55	33,18	0,18	28,60	13874	6660
1	2012	24	0,62	0,45	1,24	2,49	4,87	0,00	4,49	2022	971
2	2013	24	0,61	0,45	1,37	2,74	16,64	0,02	18,10	8108	3892
3	2014	24	0,63	0,46	1,54	3,09	32,85	0,06	36,94	16930	8126
4	2015	24	0,66	0,47	1,50	2,99	46,14	0,11	52,60	24825	11916
5	2016	24	0,66	0,47	0,93	1,85	35,58	0,15	30,59	14505	6963
6	2017	24	0,71	0,50	0,89	1,79	39,48	0,19	34,05	16999	8159
7	2018	24	0,72	0,50	1,01	2,01	50,40	0,25	43,58	21939	10531
1	2012	25	0,57	0,42	0,98	1,96	3,02	0,00	2,59	1100	528
2	2013	25	0,58	0,43	1,06	2,11	10,00	0,01	10,64	4578	2197
3	2014	25	0,56	0,42	1,08	2,16	17,49	0,03	19,40	8176	3924
4	2015	25	0,55	0,42	1,04	2,08	23,78	0,06	26,82	11142	5348
5	2016	25	0,57	0,42	1,17	2,34	34,86	0,09	29,77	12618	6057
6	2017	25	0,61	0,45	1,11	2,22	40,97	0,14	35,20	15696	7534
7	2018	25	0,66	0,47	0,88	1,75	37,84	0,18	32,62	15422	7403
1	2012	26	0,52	0,40	1,11	2,23	3,90	0,00	3,49	1389	667
2	2013	26	0,55	0,41	1,39	2,78	15,80	0,02	17,10	7088	3402
3	2014	26	0,59	0,44	1,29	2,58	25,58	0,05	28,67	12503	6001
4	2015	26	0,62	0,45	1,13	2,26	30,90	0,08	35,09	15911	7637
5	2016	26	0,63	0,46	1,32	2,64	46,41	0,13	39,82	18235	8753
6	2017	26	0,71	0,50	0,98	1,96	41,56	0,18	35,81	17774	8532
7	2018	26	0,73	0,51	1,22	2,43	59,93	0,24	51,81	26254	12602
1	2012	28	0,58	0,43	0,87	1,75	2,40	0,00	1,98	846	406
2	2013	28	0,58	0,43	1,35	2,70	13,17	0,02	14,05	6070	2914
3	2014	28	0,59	0,43	1,38	2,76	25,24	0,04	28,18	12256	5883
4	2015	28	0,61	0,45	1,39	2,78	37,51	0,08	42,57	19073	9155
5	2016	28	0,61	0,44	1,31	2,62	46,40	0,13	39,82	17692	8492
6	2017	28	0,65	0,47	1,19	2,38	51,63	0,19	44,51	20771	9970
7	2018	28	0,67	0,48	1,20	2,40	60,99	0,26	52,74	25219	12105
1	2012	29	0,59	0,43	1,14	2,29	4,11	0,00	3,70	1606	771
2	2013	29	0,60	0,44	1,35	2,70	15,41	0,02	16,68	7384	3544
3	2014	29	0,61	0,45	1,02	2,03	19,17	0,04	21,44	9562	4590
4	2015	29	0,64	0,46	1,02	2,03	25,64	0,07	29,03	13379	6422
5	2016	29	0,64	0,46	0,94	1,87	29,38	0,10	25,13	11609	5572
6	2017	29	0,69	0,49	0,88	1,75	32,48	0,14	27,91	13551	6504
7	2018	29	0,73	0,51	0,88	1,76	37,45	0,18	32,27	16352	7849

1	2012	30	0,53	0,40	1,60	3,20	8,06	0,01	7,87	3182	1527
2	2013	30	0,54	0,41	1,21	2,42	16,82	0,03	18,48	7514	3607
3	2014	30	0,58	0,43	1,12	2,25	23,86	0,05	26,83	11551	5544
4	2015	30	0,66	0,47	1,27	2,53	36,34	0,09	41,33	19431	9327
5	2016	30	0,68	0,48	0,64	1,28	22,12	0,11	18,98	9132	4383
6	2017	30	0,72	0,50	0,69	1,38	26,74	0,14	23,00	11610	5573
7	2018	30	0,73	0,51	0,95	1,91	42,02	0,19	36,24	18419	8841
1	2012	31	0,59	0,43	1,24	2,48	4,82	0,00	4,44	1925	924
2	2013	31	0,55	0,41	1,76	3,52	23,46	0,03	25,69	10611	5093
3	2014	31	0,57	0,42	1,46	2,93	34,30	0,07	38,73	16453	7898
4	2015	31	0,61	0,45	1,37	2,75	44,47	0,11	50,76	22666	10880
5	2016	31	0,63	0,46	1,34	2,68	54,82	0,17	47,21	21513	10326
6	2017	31	0,68	0,48	1,75	3,51	88,71	0,27	76,71	36832	17679
7	2018	31	0,71	0,50	1,48	2,97	90,19	0,37	78,23	38945	18694
1	2012	32	0,62	0,45	1,06	2,11	3,50	0,00	3,08	1387	666
2	2013	32	0,56	0,42	1,21	2,42	12,59	0,02	13,52	5705	2738
3	2014	32	0,59	0,44	1,11	2,22	19,70	0,04	21,96	9580	4598
4	2015	32	0,63	0,46	1,25	2,49	31,30	0,07	35,43	16178	7765
5	2016	32	0,63	0,45	0,82	1,64	25,90	0,10	22,16	10077	4837
6	2017	32	0,65	0,47	0,80	1,59	29,24	0,13	25,11	11728	5629
7	2018	32	0,68	0,48	0,87	1,75	36,62	0,17	31,55	15206	7299
1	2012	33	0,52	0,40	0,80	1,60	2,02	0,00	1,61	637	306
2	2013	33	0,57	0,42	1,44	2,87	13,71	0,02	14,59	6186	2969
3	2014	33	0,58	0,43	1,36	2,71	24,85	0,04	27,75	11927	5725
4	2015	33	0,61	0,45	1,18	2,35	30,93	0,08	35,07	15709	7540
5	2016	33	0,59	0,43	0,98	1,95	32,23	0,11	27,61	11978	5749
6	2017	33	0,63	0,46	1,18	2,35	46,85	0,16	40,32	18393	8828
7	2018	33	0,65	0,47	1,08	2,16	50,64	0,22	43,73	20341	9764
1	2012	34	0,54	0,41	1,33	2,66	5,56	0,00	5,22	2127	1021
2	2013	34	0,56	0,42	1,20	2,40	14,57	0,02	15,85	6606	3171
3	2014	34	0,58	0,43	1,38	2,76	27,95	0,05	31,36	13473	6467
4	2015	34	0,63	0,46	1,35	2,69	38,83	0,09	44,16	20123	9659
5	2016	34	0,67	0,48	1,18	2,37	43,48	0,14	37,35	17788	8538
6	2017	34	0,74	0,51	1,09	2,18	47,76	0,19	41,19	21087	10122
7	2018	34	0,77	0,53	0,67	1,34	33,18	0,23	28,68	15264	7327
1	2012	35	0,52	0,40	0,93	1,86	2,72	0,00	2,30	915	439
2	2013	35	0,56	0,42	1,20	2,40	11,51	0,01	12,26	5167	2480
3	2014	35	0,56	0,42	1,03	2,05	17,02	0,03	18,91	7959	3820
4	2015	35	0,59	0,43	0,97	1,93	22,07	0,06	24,90	10820	5194
5	2016	35	0,62	0,45	1,17	2,33	34,48	0,09	29,44	13307	6387
6	2017	35	0,67	0,48	1,17	2,34	43,18	0,14	37,09	17752	8521
7	2018	35	0,77	0,53	0,98	1,96	42,70	0,19	36,82	19471	9346
1	2012	36	0,53	0,40	0,89	1,79	2,51	0,00	2,09	839	403
2	2013	36	0,52	0,40	1,58	3,17	16,79	0,02	18,05	7155	3434
3	2014	36	0,55	0,41	1,48	2,95	29,83	0,05	33,48	13892	6668
4	2015	36	0,53	0,41	1,65	3,29	49,43	0,11	56,30	22807	10947
5	2016	36	0,53	0,40	1,57	3,14	62,94	0,17	54,18	21939	10531
6	2017	36	0,59	0,44	1,43	2,86	70,93	0,25	61,32	26733	12832
7	2018	36	0,65	0,46	1,31	2,62	76,14	0,34	66,00	30647	14711
1	2012	37	0,53	0,40	1,08	2,16	3,66	0,00	3,24	1305	627
2	2013	37	0,60	0,44	1,06	2,12	10,73	0,01	11,48	5039	2419
3	2014	37	0,57	0,43	1,36	2,71	23,99	0,04	26,75	11415	5479
4	2015	37	0,59	0,44	1,41	2,82	37,15	0,08	42,14	18439	8851
5	2016	37	0,60	0,44	1,14	2,29	39,37	0,12	33,76	14907	7155
6	2017	37	0,65	0,47	1,26	2,51	52,73	0,18	45,43	21147	10150
7	2018	37	0,65	0,47	0,98	1,96	47,99	0,23	41,47	19448	9335