



**MODELAJE DE PARÁMETROS DE ALBURA Y DURAMEN EN ÁRBOLES DE  
*Tectona grandis* L.f. EN PLANTACIONES FORESTALES DE DISTINTAS EDADES  
EN COSTA RICA**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE MAGISTER  
EN CIENCIAS FORESTALES CON EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRÍA**

**Lic. JOSE DAVID FERNÁNDEZ SOLÍS**

**CARTAGO, COSTA RICA**

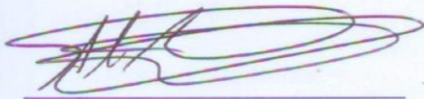
**2018**

## Acreditación

Trabajo final de graduación sometido al Tribunal Evaluador del Área Académica de Postgrado en Ciencias Forestales del Instituto Tecnológico de Costa Rica y aprobada como requisito parcial para optar por el grado de Magister.

**“Modelaje de parámetros de albura y duramen en árboles de *Tectona grandis* L.f. en plantaciones forestales de distintas edades en Costa Rica.”**

### Miembros del Tribunal Evaluador



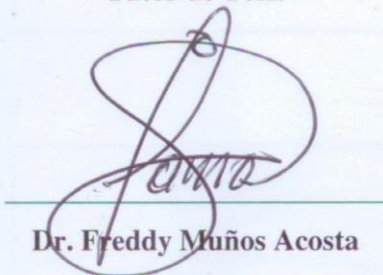
**Dr. Alexander Berrocal Jiménez**

**Tutor de Tesis**



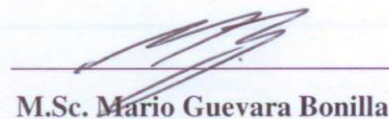
**Dr. Roger Moya Roque**

**Coordinador de Maestría**



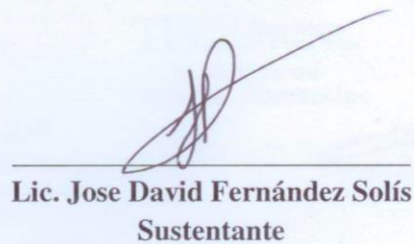
**Dr. Freddy Muñoz Acosta**

**Lector**



**M.Sc. Mario Guevara Bonilla**

**Lector**



**Lic. Jose David Fernández Solís**

**Sustentante**

## **Modelaje de parámetros de albura y duramen en árboles de *Tectona grandis* L.f. en plantaciones forestales de distintas edades en Costa Rica.**

Fernández-Solís, David

### **Resumen**

La especie forestal *Tectona grandis* L.f (teca) de zonas tropicales, es reconocida porque al madurar produce madera de duramen con alto valor en mercados internacionales. La madera de duramen de teca resalta por características de durabilidad, resistencia, color y mayor proporción con respecto a la relación duramen-albura en plantaciones de rápido crecimiento, de ahí la importancia de caracterizar las plantaciones de esta especie y sus propiedades. Por otra parte, el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) es una propiedad ideal para caracterizar la calidad de madera, relacionado con su rigidez. El objeto de este trabajo es caracterizar y modelar la variación de propiedades de albura y duramen, y el módulo de elasticidad dinámico a distintas edades y alturas en el árbol de la especie *T. grandis* en Costa Rica. Para llevar a cabo esta investigación, se muestrearon 54 plantaciones con edades entre 2 y 24 años, para un total de 162 árboles (3 muestras x 54 sitios), en distintas regiones de Costa Rica. El espesor de albura (Ea), espesor de corteza, radio de duramen (Rd), proporción de duramen (Dp) y MOEd en el plano transversal y a distintas alturas del fuste, además de la altura máxima de duramen (Hd) y el volumen de duramen (V), fueron determinados. El espesor de corteza decreció con la altura de los árboles. El diámetro de duramen (Dd) y Dp aumentaron con la edad de plantación y el dap (cm), y disminuyeron con el aumento en altura del árbol. El Ea presentó dos patrones de distribución según la edad de plantación (el Ea es mayor entre 2 a 10 años que los árboles de 11 a 24 años) y varió entre 0,5 y 6,5 cm. La edad de formación de duramen fue entre los 2 y 3 años a la altura de la base de los árboles, y la formación de duramen a la altura del dap fue a los 4 años. La Hd en los arboles varió entre 0,1 a 22,8 m. El MOEd no presentó variación marcada a lo largo del fuste, varió de 480,8 a 4779,4 MPa. Finalmente, en este estudio fueron modelados los parámetros de edad de plantación (Ea), radio e duramen (Rd), altura máxima de duramen (Hd), proporción de duramen (Dp) y volumen de duramen (V), con las variables dasométricas de los árboles, y se determinaron los coeficientes de determinación respectivos: 19% para Ea, 84% para (Rd), 86% para Hd, 68% para DP y finalmente 81% para V.

**Palabras clave:** *Tectona grandis*, Duramen-Albura, MOEd, Variación vertical, Modelaje.

## **Modeling of sapwood and heartwood parameters in *Tectona grandis* L.f. trees in forest plantations of different ages in Costa Rica.**

Fernández-Solís, David

### **Abstract**

The forest specie *Tectona grandis* L.f (teak) from tropical zones, is recognized because when mature it produces wood of hardwood with high value in the international market. Teak heartwood highlighted by characteristics of durability, strength, color and greater proportion to the ratio heartwood-sapwood in fast growing plantations, therefore the importance of characterizing planting this species and its properties. Moreover, the dynamic modulus of elasticity (MOEd) is an ideal property to characterize the quality of wood, related to its rigidity. The aim of this study is to characterize and model the variation of properties of sapwood and heartwood, and the dynamic modulus of elasticity at different ages and heights in the tree *T. grandis* species in Costa Rica. To carry out this research, 54 plantations with ages between 2 and 24 years were sampled, for a total of 162 trees (3 samples x 54 sites), in different regions of Costa Rica. The sapwood thickness (Ea), bark thickness, heartwood radius (Rd), proportion of heartwood (Dp) and MOEd in the transverse plane and at different height of the stem, in addition to the maximum heartwood height (Hd) and volume of heartwood (V), they were determined. The thickness of the bark decreased with the height of the trees. The diameter of heartwood (Dd) and Dp increased with the age of plantation and the dap (cm), and decreased with the increasing in height of the tree. The Ea presented two patterns of distribution according to the age of plantation (the Ea is greater between 2 to 10 years than the trees from 11 to 24 years old) and varied between 0,5 and 6,5 cm. The age of heartwood formation was between 2 and 3 years at the height of the base of the trees, and the heartwood formation at the height of dap was at 4 years. The Hd in the trees varied between 0,1 to 22,8 m. The MOEd did not show marked variation along the stem, it varied from 480,8 to 4779,4 MPa. Finally, in this study the parameters of age of plantation (Ea), radius and heartwood (Rd), maximum height of heartwood (Hd), proportion of heartwood (Dp) and volume of heartwood (V) were modeled, with the dasometric variables of the trees, and the respective coefficients were determined: 19% for Ea, 84% for (Rd), 86% for Hd, 68% for DP and finally 81% for V.

**Keywords:** *Tectona grandis*, Heartwood-sapwood, MOEd, Vertical variation, Modeling.

## **Agradecimientos**

A mi familia por ser un gran apoyo, Ma y Pa que me enseñaron el esfuerzo en cada momento, a mis hermanos y hermanas, y en especial a Jorge Isaac y mi sobrino Derek, por siempre hacerme feliz cuando los veo.

A Naty y su familia que me acogieron en su hogar y me apoyaron en esta etapa.

A mis amigos León, Víctor, Marce, Lucy, Alonso, Sofi, Jeffrey y Rocío que hacen que la amistad trascienda de lo común.

A mi profesor tutor Dr. Alexander Berrocal Jiménez por su guía, paciencia y apoyo en el transcurrir de esta maestría.

Al Dr. Roger Moya Roque que desde la dirección de maestría me ayudo, me guio en esta profesional y me corrigió en el camino hasta el término de esta tesis de maestría.

A todo el personal del laboratorio de maderas y demás personal de la Escuela de Ingeniería Forestal.

A todas las personas y empresas que colaboraron e hicieron posible el muestreo de teca que distintas zonas del país: a la Ing. Evelyn Ramírez de la empresa BARCA S.A., a Diego Pérez y Manuel Solís por la ayuda en Zona Norte, a el Ing. Josué Brenes por el apoyo, a la empresa PROTEAK, a Olman Murillo y Yorlenny Badilla, a el Dr. Luis Ugalde, a la Ing. Stephanie Aragón e Ing. Willy Barrantes de la empresa American Reforestation Company por la ayuda en la Zona Sur, a el Ing. Mario Espinoza de la empresa Novelteak, a el Ing. Eladio Lobo de la empresa Puro Verde, a el Ing. Luis Sage, a la empresa Ethical Forest, a el Ing. Martín Barquero, a el Ing. David Reyes, a Don Arturo Campos por la ayuda en Siquirres, a el Ing. José Corrales e Ing. Ricardo Luján de la empresa BARCA S.A. en la zona de Parrita, a el Ing. Jorge Mario Jiménez Bolaños por la ayuda con plantaciones de Parrita, a Don Fernando Gamboa, a Don Domingo Sánchez, al Ing. Ernesto Prado de la empresa RCR, a Don Andrey Berrocal por brindarnos la ayuda en Jicaral y a Don Marcos Monge en Turrubares.

## Índice general

Acreditación.....	i
Resumen.....	ii
Abstract.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Índice general .....	v
Índice de figuras .....	vii
Índice de tablas.....	ix
1. Introducción.....	1
2. Objetivo general .....	4
2.1. Objetivos específicos.....	4
3. Revisión literaria .....	5
3.1. Desarrollo de plantaciones forestales de rápido crecimiento en el trópico .....	5
3.2. Plantaciones forestales de rápido crecimiento en Costa Rica.....	5
3.3. Plantaciones de <i>T. grandis</i> en Costa Rica .....	6
3.4. Proporción del duramen y MOEd de la madera en plantaciones forestales como propiedades importantes para determinar la calidad de la madera .....	6
3.5. Proporción del duramen y MOEd de la madera en plantaciones de <i>T. grandis</i> .....	7
3.6. Efecto de características ambientales sobre las propiedades de la madera .....	7
3.7. Modelos de predicción de propiedades de la madera.....	8
3.8. Estudios específicos en plantaciones de <i>T. grandis</i> .....	8
4. Metodología .....	10
4.1. Área de estudio .....	10
4.2. Muestreo.....	12
4.3. Variables de medición en el árbol .....	13
4.4. Módulo de elasticidad dinámico.....	16
4.5. Análisis estadístico.....	17
4.6. Modelos estadísticos .....	18
5. Resultados .....	20
5.1. Variación de corteza y duramen en las plantaciones .....	20
5.2. Variación de la albura a lo largo del fuste .....	22
5.3. Edad de formación y altura máxima de duramen.....	24

5.4. Relación de altura máxima de duramen con variables dasométricas del árbol .....	26
5.5. Volumen de duramen.....	29
5.6. Variación del MOEd en altura y edad del árbol.....	30
5.7. Modelos de predicción del duramen .....	32
6. Discusión .....	38
6.1. Variación de corteza y duramen en las plantaciones .....	38
6.2. Variación de albura a lo largo del fuste.....	39
6.3. Edad de formación y altura máxima de duramen.....	40
6.4. Relación de altura máxima de duramen con variables dasométricas del árbol .....	42
6.5. Volumen de duramen.....	44
6.6. Variación del MOEd en altura y edad del árbol.....	44
6.7. Modelos de predicción del duramen .....	45
7. Conclusiones .....	47
8. Bibliografía .....	48

## Índice de figuras

<b>Figura 1. Ubicación de plantaciones de <i>Tectona grandis</i> muestreadas en Costa Rica en la determinación de las propiedades de la madera.....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 2. Patrones de corte en cada disco de muestra a distintas alturas, para el análisis de propiedades de la madera en plantaciones de <i>Tectona grandis</i>.....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 3. Variación del espesor de corteza con respecto a la altura en metros (a) y a la altura relativa (b) en árboles de <i>Tectona grandis</i> en plantaciones de rápido crecimiento a diferentes edades en Costa Rica. ....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 4. Variación de diámetro de duramen con respecto a la altura en metros (a) y a la altura relativa (b) en árboles de <i>Tectona grandis</i> en plantaciones de rápido crecimiento a diferentes edades en Costa Rica.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 5. Variación de porcentaje de duramen con respecto a la altura en metros (a) y a la altura relativa (b) en árboles de <i>Tectona grandis</i> en plantaciones de rápido crecimiento a diferentes edades en Costa Rica.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 6. Variación de espesor de albura con respecto a la altura en metros (a) y a la altura relativa (b) en árboles de <i>Tectona grandis</i> en plantaciones de rápido crecimiento a diferentes edades en Costa Rica. ....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 7. Variación de espesor de albura en relación con respecto a la altura en metros (a) y a la altura relativa (b) en árboles de <i>Tectona grandis</i> en plantaciones de rápido crecimiento en dos categorías de edades en Costa Rica.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 8. Relación de la altura máxima de duramen, altura total (a) y altura máxima relativa de duramen (b) con la edad de la plantación de árboles de <i>Tectona grandis</i> en plantaciones de rápido crecimiento de diferentes edades en Costa Rica.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 9. Relación de la altura máxima de duramen según la altura en metros (a) y la altura relativa (b), con la edad de la plantación de árboles de <i>Tectona grandis</i> en plantaciones de rápido crecimiento de diferentes edades en Costa Rica.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 10. Relación de la altura máxima de duramen con la altura de la copa (a), diámetro a la altura del pecho (b) y altura total (c) de árboles de <i>Tectona grandis</i> en plantaciones de rápido crecimiento de diferentes edades en Costa Rica.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 11. Relación de altura máxima de duramen y altura máxima de duramen en rama (a) y la relación de ambas variables con la edad (b) de árboles de <i>Tectona grandis</i> en plantaciones de rápido crecimiento de diferentes edades en Costa Rica. ....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 12. Relación de la altura máxima de duramen en rama con la altura total (a) y de la altura máxima de duramen en rama con el dap (b) de árboles de <i>Tectona grandis</i> en plantaciones de rápido crecimiento de diferentes edades en Costa Rica.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 13. Distribución promedio del radio de duramen y radio sin corteza a lo largo del fuste, a diferentes edades en árboles de <i>Tectona grandis</i> en plantaciones de rápido crecimiento de diferentes edades en Costa Rica. ....</b>	<b>29</b>



<b>Figura 14. Distribución del volumen de duramen con relación a la altura total (a), el dap (b) y la edad de plantación (c) de los árboles muestreados en plantaciones forestales de Tectona grandis en plantaciones de rápido crecimiento de diferentes edades en Costa Rica. ....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 15. Distribución de MOEd según la edad de los árboles muestreados en plantaciones forestales de Tectona grandis en plantaciones de rápido crecimiento de diferentes edades en Costa Rica. ....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 16. Distribución de MOEd por altura de los árboles de Tectona grandis muestreados en plantaciones de rápido crecimiento, en distintas zonas de Costa Rica: PN (a), PC (b), PS (c) y ZN (d). ....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 17. Distribución de MOEd por edad de árboles de Tectona grandis muestreados en plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica. Altura de medición a. 0 m, b. 2,3 y 2,5 m, c. 4,6 y 5 m y d. 6,9 y 7,5 m. ....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 18. Distribución de los errores de los modelos de predicción de espesor de albura a distintas alturas (a), radio de duramen a distintas alturas (b), altura máxima de duramen (c), proporción de área de duramen a distintas alturas (d) y volumen de duramen (e) en árboles de Tectona grandis muestreados en plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica. ....</b>	<b>36</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1. Características dasométicas de plantaciones de rápido crecimiento de <i>Tectona grandis</i> L.f. en distintas zonas de Costa Rica. ....</b>	<b>11</b>
<b>Tabla 2. Datos climatológicos promedios anuales registrados hasta 2016 de las regiones muestreadas con plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Costa Rica. ....</b>	<b>12</b>
<b>Tabla 3. Variabilidad del espesor de albura (cm) a distintas alturas de árboles de <i>Tectona grandis</i> en plantaciones de rápido crecimiento a diferentes edades en Costa Rica. ....</b>	<b>23</b>
<b>Tabla 4. Coeficientes de correlación entre variables de árboles de <i>Tectona grandis</i> muestreados en plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.....</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 5. Variable categórica según rangos de edades de plantaciones de <i>Tectona grandis</i> creciendo en Costa Rica.....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 6. Regresión ajustada para modelos de precisión para albura y duramen en árboles de <i>Tectona grandis</i> muestreados en plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.....</b>	<b>35</b>

## 1. Introducción

La especie *Tectona grandis* L.f. (teca) es originaria del continente asiático, con grandes extensiones de plantación en las zonas tropicales y con alto valor maderable en el mercado internacional (Koskela et al., 2014; Hansen et al., 2015). El sector forestal costarricense maneja esta especie bajo la modalidad de plantaciones de rápido crecimiento con diámetros menores, para la producción de madera de alta calidad para abastecimiento nacional y exportación (FAO, 2002; Pérez y Kaninnen, 2005). Estas plantaciones han sido establecidas como una opción de rentabilidad y rendimiento, por lo que se han evaluado aspectos importantes de la madera, como propiedades físico-mecánicas (Moya y Berrocal, 2010; Serrano et al., 2015) que la distinguen de otras maderas preciosas. La especie *T. grandis* ha sido ampliamente estudiada en cuanto a programas de mejoramiento genético, desarrollo silvicultural y el efecto sobre las propiedades de la madera (Moya, Bond y Quesada, 2014).

La madera de duramen en *T. grandis* es una de las de mayor valor en el mercado, por características propias que le hacen resaltar, como la durabilidad, resistencia, color y trabajabilidad (Moya y Marín, 2011; Lourenço et al., 2015). Por tanto, la proporción de albura y duramen es un rasgo de gran importancia a considerar en los árboles de teca, debido que se convierte en un indicador de la calidad de la madera en troza (Blanco, 2012; Hegde et al., 2014; Kumar y Dhillon, 2015), por lo que a mayor proporción de duramen el valor aumenta. Varios autores (Miranda, Sousa y Pereira, 2011; Moya, Bond y Quesada, 2014; Anish et al., 2015) han centralizado el estudio de esta característica, mostrando que el diámetro de duramen aumenta con la edad y disminuye con el incremento en altura del árbol, hasta que alcanza un punto máximo de crecimiento. Para conocer el desarrollo del duramen se han definido modelos de predicción, como modelos del diámetro o proporción del duramen según la edad, altura del árbol o diámetro a la altura de pecho (dap) del árbol (Climent et al., 2003; Kokutse et al., 2010; Tewari y Mariswamy, 2013).

La variación del diámetro o la proporción de duramen son afectadas por la edad del árbol, el dap, condiciones de manejo, manejo y fertilidad del suelo, entre otras condiciones estudiadas por varios autores (Moya y Calvo, 2012; Torres, del Valle y Restrepo, 2012; Moya, Bond y Quesada, 2014). En primera instancia Hidayati et al. (2013a), observaron que las características de crecimiento, como el dap, altura total del árbol y el volumen del fuste variaron en plantaciones maduras, según la procedencia genética de teca. Por su parte, Kokutse et al. (2010) observaron que la densidad de plantación influye en el crecimiento radial del árbol, esto afecta el desarrollo del diámetro de

duramen, lo que lleva a manejo adecuado de la plantación para aumentar su rendimiento. Por otro lado, Anish et al. (2015) estudiaron las plantaciones de rápido crecimiento de teca en distintos países, con características distintas de clima y suelos, aun así las propiedades tales como el porcentaje de duramen, color de duramen y grosor de corteza no presentaron diferencias significativas entre las locaciones.

En el caso del espesor de albura y corteza en el fuste, varios autores han determinado que no existe variación importante con el cambio en las características de crecimiento, como sí sucede con el duramen. Miranda, Sousa y Pereira (2011) determinaron que el espesor de albura fue más regular que el duramen en circunferencia y longitudinalmente en el fuste de los árboles de teca maduros, con un promedio de 2 cm, que representó un 15,7 %. De igual manera en una plantación madura de teca, Kokutse et al. (2010) observaron que el espesor de albura a la altura del dap, estuvo entre 2 y 2,4 cm, con promedio de proporción de 8,6 %. Mientras que Pérez y Kanninen (2003), en un estudio en altura y plano transversal de árboles de teca de 5 a 47 años, la proporción de albura aumento en altura del fuste, con variación entre 15 y 85 %, por el contrario la proporción de corteza permaneció constante entre 10 y 35 %.

Por otra parte, una propiedad mecánica importante de la madera es el módulo de elasticidad dinámico (MOEd). Esta propiedad determina la rigidez de la madera, que a su vez es un indicador que sirve para caracterizar la calidad de resistencia de la madera de duramen de *T. grandis* (Kuprevicius et al., 2013). La mayor resistencia que pueda presentar la madera de duramen es de vital importancia en una potencial utilización de la madera, ya sea para muebles e infraestructura (Thulasidas y Bhat, 2012). De igual manera esta propiedad puede indicar la edad de plantación en el que la madera (albura-duramen) es adecuada para productos específicos, siendo las plantaciones juveniles las presentan madera de menor resistencia (Djati et al., 2015). Varios autores han datado que el rango de MOEd en la madera de *T. grandis* a distintas edades y manejo silvicultural, se encuentra entre 269,09 a 20573,78 MPa (Wahyudi y Arifien, 2005; Solórzano, 2010; Solórzano, Moya y Murillo, 2012; Wahyudi et al., 2014 a y 2014b). El MOEd cambia con la edad y posición de la pieza en el árbol (Kuprevicius et al., 2013). Además, como lo indica Zheng y Martínez (2013), esta propiedad mecánica está relacionada con características anatómicas de la madera de teca, por lo que las condiciones de crecimiento del árbol afectan la variabilidad de esta propiedad. La variación del MOEd en los árboles, puede ser marcada por condiciones climatológicas y manejo silvicultura, lo que repercute en la calidad (Managave et al., 2011; Nocetti et al., 2011).

En cuanto al volumen de duramen en el fuste de árboles de teca, la proporción es máxima cuanto mayor sea la edad de plantación y dap presente, como lo indican Prasad y Mariswamy (2013) con porcentajes de volumen de duramen entre 37,1 a 56,3 % para plantaciones de 11 a 36 años, además propusieron un modelo de predicción de este parámetro con base en el dap. Anteriormente Pérez y Kanninen (2003 y 2005), habían relacionado el manejo silvicultural de plantaciones de teca con la variación del volumen de duramen, siendo positivo el manejo para el desarrollo máximo de la proporción dap/altura total en los árboles, por tanto alcanzar la máxima proporción de duramen. Estos supuestos no relacionan el modelaje de volumen de duramen con la edad, altura de copa u otras variables que caracterizan plantaciones de distintas regiones o manejo (Moya, Bond y Quesada, 2014).

Como ya se ha mencionado, para el duramen en teca han sido desarrollados modelos de predicción para características como por ejemplo el volumen de duramen, el porcentaje de duramen o la altura máxima de duramen en el fuste. Sin embargo, estos modelos no presentan la incorporación de variables como la edad de la plantación, la altura de copa o zona de crecimiento; variables que están ligadas al desarrollo de duramen en los árboles.

Por tal motivo, este trabajo tiene como objetivo caracterizar y estudiar la variación del espesor de corteza y albura, diámetro y proporción de duramen en relación a la altura en el árbol y su edad de plantación. Además se determinó la altura máxima de duramen y su edad de formación, y variación de la propiedad mecánica de módulo de elasticidad dinámico en altura del árbol y edad de plantación. Por último, se confeccionaron modelos de predicción para el espesor de albura, el radio de duramen, la altura máxima de duramen, proporción de duramen y volumen de duramen con variables medibles en árboles de *Tectona grandis* en Costa Rica.

## **2. Objetivo general**

Caracterizar y modelar la variación del duramen, albura y módulo de elasticidad dinámico a distintas edades y altura del árbol de la especie *Tectona grandis* L.f. en plantaciones forestales de rápido crecimiento en Costa Rica.

### ***2.1. Objetivos específicos***

2.1.1. Establecer la variabilidad entre la proporción duramen, la altura máxima duramen, el espesor albura y el módulo de elasticidad dinámico con las características de las plantaciones forestales de *Tectona grandis*, de distintas edades y regiones.

2.1.2. Elaborar modelos estadísticos para la estimación del espesor de albura, del radio de duramen, de la proporción de duramen, de la altura máxima duramen y del volumen de duramen según edad, altura en el árbol y regiones de plantación de *Tectona grandis*.

### **3. Revisión literaria**

#### ***3.1. Desarrollo de plantaciones forestales de rápido crecimiento en el trópico***

La actividad económica forestal va cada año en aumento, produciendo una gran cantidad de servicios y productos para el abastecimiento de madera (Vihervaara et al., 2012). La mayor parte de plantaciones forestales en el trópico presentan características de rápido crecimiento, un rasgo que es considerado como una de las principales virtudes en la producción de madera comercial (Sandewall et al., 2010; Manson et al., 2013; Pawson et al., 2013). A pesar de las ventajas de las especies de rápido crecimiento, la variación de propiedades de la madera de plantaciones que existe entre especies nativas y exóticas en relación con árboles de bosques tropicales, es sumamente marcada (Chazdon et al., 2016). En un estudio realizado en la zona tropical de Ghana, según Yeboah et al. (2014) para 19 especies de árboles provenientes de plantaciones, algunas propiedades de la madera, como la densidad, se encontraron por debajo de lo reportado en bosques naturales, siendo las plantaciones de rápido crecimiento, las que presentaron valores más bajos. De igual forma, Huang et al. (2015) y Bhat y Priya (2004) presentaron la variación de propiedades de la madera entre plantaciones forestales de *T. grandis* y los bosques nativos. Esta situación de las propiedades de la madera en las plantaciones forestales, toma importancia cuando se evalúa la calidad de la madera en plantación.

#### ***3.2. Plantaciones forestales de rápido crecimiento en Costa Rica***

En Costa Rica, las plantaciones de rápido crecimiento se han establecido como una opción de alta rentabilidad y abastecimiento de madera (Serrano et al., 2015). Se cuenta con especies nativas de crecimiento medio a acelerado, que presentan características en la madera de adecuada consideración, sin embargo en el país se plantan a baja escala (Camacho, Alvarado y Fernández, 2016), inclusive una considerable cantidad se encuentran creciendo bajo el modelo de sistemas agroforestales (Somarriba et al., 2014). Por otro lado, las plantaciones con especies de origen exótico son las de mayor auge en el país, ya que su madera presenta un amplio mercado y una aceptación superior en comparación con las especies nativas de plantación (Piotto et al., 2010). Una especie en el país, que se destaca para la producción maderable es *T. grandis*, por características de desarrollo y las propiedades de la madera que la resaltan (Pérez y Kaninnen, 2005).

### ***3.3. Plantaciones de *T. grandis* en Costa Rica***

El desarrollo de *T. grandis* (teca) en Costa Rica ha aumentado en las últimas dos décadas y se han realizado considerable cantidad de estudios en el país de esta especie, evaluando aspectos como color de la madera de duramen, a modo de característica importante en elaborar productos comerciales (Moya y Marín, 2011), la variación en propiedades físico-mecánicas y la resistencia de la madera a la degradación (Moya y Berrocal, 2010; Serrano et al., 2015) que se ven afectados por el clima y condiciones de sitio. Así mismo, en el país, el manejo adecuado de las plantaciones comerciales ha llegado a mejorar las condiciones de reproducción, desarrollo y productos a obtener, según Isotupa y Tyynelä (2010) el uso de clones de *T. grandis* para mejorar la calidad de la madera y sus propiedades, puede llegar a aumentar la rentabilidad hasta en un 50% con respecto a plantaciones tradicionales.

### ***3.4. Proporción del duramen y MOEd de la madera en plantaciones forestales como propiedades importantes para determinar la calidad de la madera***

Algunas propiedades físico-mecánicas son empleadas para la caracterización de calidad en la madera de plantaciones forestales, una de ellas de considerable relevancia es la proporción del duramen. Este tejido comprende la madera más importante y rentable del volumen total de un árbol en pie y que conforme aumenta el diámetro en el tronco, crece el porcentaje de este tipo de madera (Prasad y Mariswamy, 2013). Además, la proporción de duramen con respecto al diámetro aumenta en una plantación con un adecuado manejo silvicultural; por ejemplo cuando la intensidad de raleo se aumenta con el tiempo se da un aumento del diámetro del árbol y del porcentaje de duramen, pero la densidad de la madera disminuye (Vallejos, Moya y Serrano, 2015).

Otra propiedad que viene relacionada con la calidad en la madera, que además puede considerarse una caracterización mecánica de la misma, es el módulo de elasticidad dinámico (MOEd); que mide la rigidez en la madera, esta propiedad cambia con la edad y posición de la pieza en el árbol (Kuprevicius et al., 2013). Las características anatómicas de la madera se relacionan directamente con el MOEd (Zheng y Martínez, 2013), por lo que las condiciones de crecimiento del árbol afectan esta propiedad. Tondjo et al. (2015) compararon la variación de estas propiedades con la procedencia de teca en una plantación, donde no hubo cambios significativos, por el raleo de las plantaciones, sin embargo la variación de estas propiedades se marcó con el aumento en altura del árbol.



### ***3.5. Proporción del duramen y MOEd de la madera en plantaciones de *T. grandis****

En plantaciones de rápido crecimiento de teca, la formación del duramen empieza a temprana edad, donde solo está presente la madera juvenil (Bhat, Priya y Rugmini, 2001). Por otro lado, un importante problema en las plantaciones forestales, es que aún con ciclos de corta mayores a 15 años la durabilidad en la madera es baja (Moya, Bond y Quesada, 2014). La durabilidad natural del duramen en *T. grandis* está correlacionada con la aparición de componentes químicos o extractivos (Niamké et al., 2011), que para edades tempranas se carece de estos compuestos. Anish et al. (2015) compararon la tasa de crecimiento con la calidad de la madera, donde las plantaciones de crecimiento lento contienen 22% más extractivos que las de rápido incremento, aunque la proporción de duramen con respecto al diámetro es similar.

Arce y Moya (2015) y Moya et al. (2013) analizaron, para años distintos, las propiedades de la madera en una misma plantación de teca en la región de Guanacaste en Costa Rica; zona que presenta una época seca marcada y reportaron un porcentaje de duramen con respecto al diámetro de aproximadamente 39.5%, con clones de teca a una edad de 13 años, luego dos años más tarde con diámetros superiores, la proporción de duramen se registró entre 49.76 hasta 60.02%. El módulo de elasticidad dinámico, toma una alta importancia para la madera de duramen en la especie *T. grandis*, cambiando con la edad, pero en algunos casos manteniéndose constante entre plantaciones de teca de distintos sitios (Miranda, Sousa y Pereira, 2011). Sin embargo, la distinción entre plantaciones se marca en un adecuado manejo y mantenimiento que se refleja en las propiedades de la madera (Sivaram y Gopinathan, 2013; Cardoso et al., 2015), donde se mejora las características estructurales del duramen y consecuentemente su calidad.

### ***3.6. Efecto de características ambientales sobre las propiedades de la madera***

Las características del duramen en teca llegan a verse afectadas por distintos factores, tales como condiciones de suelo y factores climáticas (Moya y Calvo, 2012; Torres, del Valle y Restrepo, 2012). Un factor que entra en juego cuando se establecen plantaciones y que afecta las características de los árboles plantados, es la calidad de sitio (Goh et al., 2013; Hidayati et al., 2013b), ya que las propiedades de la madera mejoran en los sitios de mayor índice o de calidad. Las condiciones climatológicas del sitio cumplen el papel de alterar el crecimiento de la estructura de la madera, por ende afectando sus propiedades (Managave et al., 2010; Nocetti et al., 2011), tales como el porcentaje de madera de duramen y MOEd.

La densidad en la madera varía tanto dentro del árbol, como entre árboles de una misma plantación y los establecidos en distintos sitios, estando el factor sitio y los efectos naturales relacionados, además de ser algunas de las principales fuentes de variación de esta propiedad (Tavares, Louzada y Pereira, 2014; Zhu et al., 2015). Incluso la variación de la densidad en la madera se da en el crecimiento radial, principalmente entre albura y duramen, además de madera juvenil (Steffenrem et al., 2014). Sin embargo, el grado de respuesta de las propiedades de la madera dependerá tanto de las condiciones de crecimiento y genéticas, como de factores naturales (Ugulino, Latorraca y Tomazello, 2014), además estas propiedades pueden llegar a modelarse por medio de variables del árbol.

### ***3.7. Modelos de predicción de propiedades de la madera***

La predicción del rendimiento y crecimiento de plantaciones forestales es de suma importancia en los requerimientos de manejo forestal; los modelos de crecimiento de las plantaciones forestales son necesarios para la toma de decisiones, se pueden realizar por sitio, región o país. Por ejemplo, Prasad, Álvarez y García (2014), desarrollaron un modelo dinámico de crecimiento para volumen y área basal para plantaciones de teca, adecuado para India. Algunos autores han utilizado el diámetro a la altura de pecho como principal variable para la elaboración de modelos de predicción de calidad, otras variables de medición o propiedades de la madera (Pothier et al., 2013; Mehtatalo, de-Miguel y Gregoire, 2015). En el caso de García et al. (2011), a partir del diámetro de teca en plantación, generaron la predicción del diámetro de duramen. Según Shukla et al. (2012), la información obtenida a partir de las propiedades en la madera para cada plantación de teca es única, pero una adecuada compilación de variables de plantaciones, permite generar modelos de predicción regionales. Costa Rica es un país que hasta el momento no cuenta con un modelo general para *T. grandis*, siendo una necesidad la confección de un modelo estadístico que abarque las regiones donde se planta esta especie.

### ***3.8. Estudios específicos en plantaciones de T. grandis***

Algunas propiedades de la madera en árboles jóvenes de teca se pueden predecir, según Solórzano, Moya y Murillo (2012), midiendo el diámetro a la altura de pecho y la velocidad de ultrasonido se obtiene el módulo de elasticidad dinámico de la madera en pie y seca, además de la densidad básica de la madera y estrés de crecimiento. Para la predicción de variables en plantaciones de teca se debe tener el cuidado de controlar los factores que afecten el crecimiento, tal y como lo reporta Dzifa et al.

(2010), que obtuvieron una correlación directa entre plantaciones jóvenes de rápido crecimiento de *T. grandis* con la precipitación y temperatura, específicamente el cambio en la proporción de duramen del árbol. Además, la precipitación es un factor que está ligado al desarrollo de propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (Venegas et al., 2015), lo que afecta las propiedades en el tiempo de crecimiento. Es necesario la construcción de modelos matemáticos, para a especie *T. grandis*, de modo que se pueda ampliar la comprensión de la variación en las propiedades de la madera, para adecuar el uso y selección en plantación.

## 4. Metodología

### 4.1. Área de estudio

El estudio se realizó en distintas zonas de Costa Rica, y el muestreo se ejecutó entre enero de 2016 y julio de 2017. Fueron muestreadas plantaciones de rápido crecimiento de *Tectona grandis* L.f. de diferentes edades, procedencias, sitios y manejo silvicultural. En la Figura 1 se observa la ubicación de las plantaciones muestras.

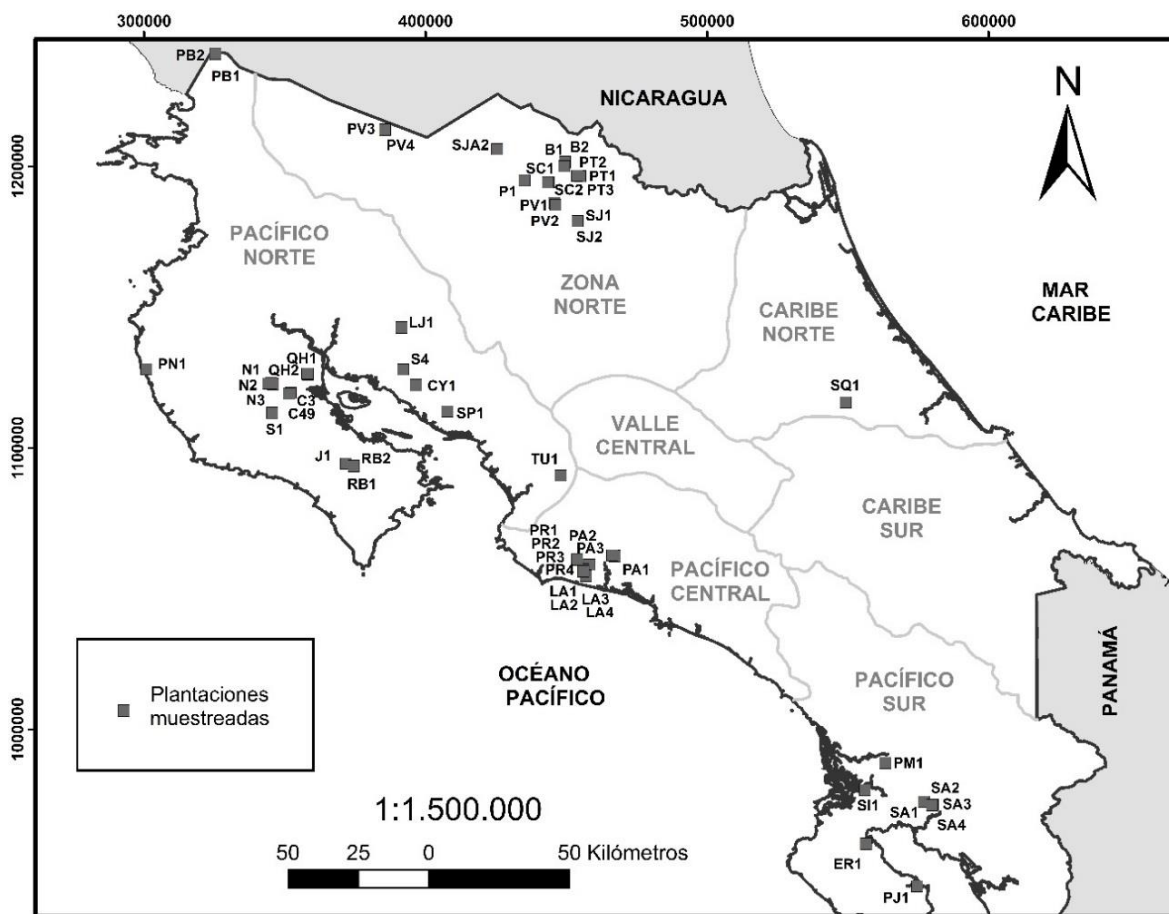


Figura 1. Ubicación de plantaciones de *T. grandis* muestreadas en Costa Rica en la determinación de las propiedades de la madera.

En cada plantación muestreada fue establecida una parcela provisional de un radio de 13 m (531 m<sup>2</sup>) para caracterizar esta plantación. A partir de la parcela se determinó la densidad de la plantación en número de árboles por hectárea (N ha<sup>-1</sup>), diámetro a la altura de pecho promedio en cm (dap), altura total promedio (Ht), altura de copa promedio en metros (hc), la edad de plantación en el momento de muestrearse (E) en años y la región del país donde se muestreó (Tabla 1).

Tabla 1. Características dasométricas de plantaciones de rápido crecimiento de *T. grandis* en distintas zonas de Costa Rica.

Región	ID	Edad (años)	N (arb ha <sup>-1</sup> )	Dap (cm)	Ht (m)	hc (m)	Región	ID	Edad (años)	N (arb ha <sup>-1</sup> )	Dap (cm)	Ht (m)	hc (m)	Región	ID	Edad (años)	N (arb ha <sup>-1</sup> )	Dap (cm)	Ht (m)	hc (m)
PN	C3	9	555,6	25,06	19,41	8,69	PN	TU1	5	565,1	16,13	13,36	3,67	PS	SI1	16	320,2	22,22	15,68	6,08
PN	C49	9	555,6	25,06	19,41	8,69	ZN	SJ1	9	320,2	12,15	15,72	6,40	PS	PJ1	3	791,1	9,31	9,44	2,03
PN	S1	5	357,9	18,27	17,27	5,63	ZN	SJ2	7	583,9	14,65	17,25	5,82	PS	ER1	13	414,4	23,97	18,07	10,32
PN	S4	20	376,7	26,20	23,71	10,30	ZN	SC1	7	753,4	13,86	16,26	5,55	PS	SA1	11	523,3	24,27	19,62	8,13
PN	PN1	22	207,2	24,97	22,27	9,30	ZN	SC2	8	734,6	13,77	16,45	4,93	PS	SA2	10	644,1	23,18	20,03	11,41
PN	QH1	19	207,2	33,27	24,41	12,00	ZN	PT1	2	1111,1	9,33	8,67	3,60	PS	SA3	9	620,8	22,61	19,10	8,18
PN	QH2	14	433,2	24,49	21,59	10,04	ZN	PT2	9	439,7	18,04	15,85	4,12	PS	SA4	8	460,0	23,29	20,17	9,47
PN	PB1	19	180,0	28,10	23,83	6,05	ZN	PT3	10	409,7	18,66	16,55	5,22	PC	PA1	18	226,0	31,50	26,85	11,87
PN	PB2	5	700,0	10,05	13,03	6,46	ZN	PV1	10	414,4	21,30	18,93	5,88	PC	PA2	19	376,7	27,80	27,58	14,84
PN	N1	8	450,0	19,17	14,08	4,22	ZN	PV2	9	414,4	21,87	18,10	5,08	PC	PA3	17	263,7	30,48	29,71	16,11
PN	N2	15	320,0	26,33	18,87	5,84	ZN	PV3	6	1111,1	16,73	14,97	5,53	PC	PR1	24	226,0	30,33	25,73	12,41
PN	N3	14	320,0	23,60	19,77	6,82	ZN	PV4	5	1111,1	19,97	15,87	5,28	PC	PR2	17	226,0	27,50	24,35	11,60
PN	J1	12	263,7	24,94	24,12	11,04	ZN	B1	8	715,7	15,38	15,57	5,83	PC	PR3	19	263,7	29,97	21,61	9,05
PN	RB1	13	376,7	23,88	22,44	11,63	ZN	B2	11	357,9	21,92	19,03	7,29	PC	PR4	15	555,6	22,30	17,70	7,57
PN	RB2	17	263,7	27,31	26,39	11,95	ZN	P1	20	263,7	23,85	16,70	7,17	PC	LA1	18	452,0	20,48	23,14	11,65
PN	SP1	18	433,2	24,29	20,03	7,16	ZN	SJA2	15	357,9	23,98	17,68	8,15	PC	LA2	3	640,4	8,29	8,99	4,29
PN	CY1	10	357,9	20,97	17,69	5,96	CN	SQ1	12	320,2	21,76	16,51	8,04	PC	LA3	13	376,7	23,73	21,51	9,79
PN	LJ1	4	791,1	12,19	11,27	4,38	PS	PM1	19	470,9	16,76	16,02	8,06	PC	LA4	16	339,0	21,23	22,04	11,24

Las regiones de muestreo se distinguieron según las zonas climáticas en Costa Rica, designadas por el Instituto Meteorológico Nacional (Solano y Villalobos, 2000; IMN, 2017), siendo en cinco de estas regiones donde se obtuvieron plantaciones de la especie muestreada: ZN: zona norte, PN: pacífico norte, PC: pacífico central, PS: pacífico sur y CN: caribe norte (Figura 1). En la Tabla 2 se muestran las características climatológicas anuales de las regiones reportadas hasta el 2016.

Tabla 2. Datos climatológicos promedios anuales registrados hasta 2016 de las regiones muestreadas con plantaciones de *Tectona grandis* en Costa Rica.

Regiones Climáticas	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)	Precipitación anual (mm)
	Máxima	Media	Mínima		
<b>Pacífico Norte</b>	32,17	23,16	27,67	74,36	1568,87
<b>Pacífico Central</b>	31,07	22,74	26,90	84,08	3743,00
<b>Pacífico Sur</b>	31,46	21,22	26,34	81,58	4185,00
<b>Zona Norte</b>	29,42	20,78	25,09	86,83	2553,67
<b>Caribe Norte</b>	29,78	21,98	25,87	85,92	3566,60

Fuente: IMN, 2017.

#### 4.2. Muestreo

Se muestrearon un total de 54 plantaciones, entre las edades de 2 y 24 años, en los cuales 3 árboles por sitios fueron muestreados para un total de 162 árboles (3 muestras x 54 sitios). Las plantaciones que se muestrearon, fueron escogidas al azar en todo Costa Rica y según el apoyo que ofrecieran los productores de madera de *T. grandis*. En cada plantación, se seleccionaron al azar tres árboles con diámetros que representaran la variación de estos en la plantación. Para cada árbol que se muestreó, se midió el diámetro a 1,3 m de altura o dap. Seguidamente se procedió a la corta y con el árbol en el suelo se midió hc y Ht. Seguidamente, se obtuvo una sección transversal del fuste, de la base del árbol de aproximadamente 4 cm de espesor, y posteriormente cada 2,3 m de distancia de la base se obtuvieron disco, hasta el largo total del fuste. Durante este proceso se registraron las alturas en metros de cada uno de los discos (hs). Seguidamente, con la obtención de los discos en las diferentes alturas fue localizada la sección del árbol donde el duramen desaparece. Una vez ubicada se midió desde la base del árbol hasta la altura donde finaliza el duramen y esta variable fue llamada como altura máxima de duramen (Hd), además se localizó la altura donde finalizó el duramen en las ramas,

y se llamó altura máxima de duramen en rama (hdra). Por otro lado, los discos obtenidos se empaquetaron en bolsas plásticas, para evitar la pérdida de humedad contenida en los discos de madera y así se conservaron en estado verde, posteriormente fueron llevados al laboratorio donde se determinaron de las propiedades de interés.

#### ***4.3. Variables de medición en el árbol***

##### *Mediciones en las secciones transversales*

En el laboratorio de propiedades mecánicas y físicas de la madera, del Instituto Tecnológico de Costa Rica, se realizaron las mediciones respectivas de las propiedades de los discos obtenidos. Primero, en cada disco se marcaron dos direcciones (perpendiculares) de medición en sentido radial, pasando por la médula. En cada dirección marcada se midió el diámetro total con corteza, diámetro sin corteza, diámetro del duramen, diámetro de la médula y el radio de la médula hasta la corteza. El límite de albura-duramen se determinó por la diferencia de color típica de madera de esta especie.

Para la determinación de las propiedades físicas de la madera a diferentes alturas, en cada disco se cortó un bloque de dos centímetros de espesor a lo largo del centro del disco, en una dirección de medición determinada norte-sur, según la metodología utilizada por Moya y Pérez (2008). El bloque obtenido se cortó en el centro de la médula para obtener dos piezas (Figura 2). Posteriormente, para cada una de estas piezas se determinó el peso verde en gramos en una balanza digital, precisión 0,01 gramos. Seguidamente, el volumen en condición verde, que se obtuvo por medio de inmersión en agua y por diferencia de masas se determinó el volumen en gramos, según lo establecido en la norma ASTM D-2395-07a (ASTM, 2007).

Se determinó la densidad verde ( $D_v$ ) de cada pieza muestreada a distintas alturas, utilizando la Ecuación 1, que relaciona el peso verde con el volumen verde, en  $\text{g cm}^{-3}$ , según lo determinado por la norma ASTM D-2395-07a (ASTM, 2007).

$$D_v = \frac{P_v}{V_v} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$P_v$  es el peso verde de cada pieza muestreada, en gramos (g)

$V_v$  es el volumen obtenido por inmersión para cada pieza en  $\text{cm}^3$ .

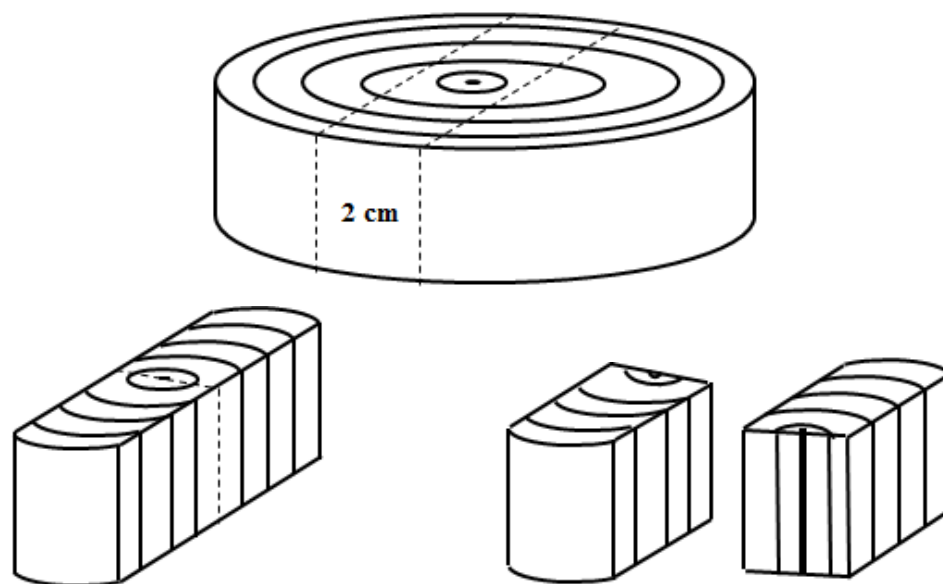


Figura 2. Patrones de corte en cada disco de muestra a distintas alturas, para el análisis de propiedades de la madera en plantaciones de *Tectona grandis*.

#### *Espesor de corteza*

Se determinó el espesor de corteza en los discos a distintas alturas, en ambas direcciones de medición, por medio de la diferencia entre el diámetro con corteza y el diámetro sin corteza, dividido entre dos para obtener el resultado en cm.

#### *Espesor de albura*

Para la determinación del espesor de albura ( $E_a$ ), se obtuvo la diferencia entre el diámetro de disco sin corteza y del diámetro de duramen, promediando ambas direcciones de medición, y esta diferencia fue dividida en dos. En los discos donde no hubo presencia de duramen, el  $E_a$  se estimó como la diferencia del diámetro del disco sin corteza y la media del diámetro de médula, dividido a la mitad, con valor en cm.

#### *Radio de duramen*

De las mediciones en los discos a distintas alturas, se obtuvo el diámetro de duramen ( $D_d$ ) a una altura dada, con el promedio de  $D_d$  en ambas direcciones de medición. El radio de duramen ( $R_d$ ) es producto



de la división por dos del Dd promedio de los discos, expresado en cm. Del mismo modo, el radio del disco se obtuvo del promedio de los diámetros con corteza, dividido entre dos.

#### *Porcentaje de duramen*

El cálculo del porcentaje de duramen (Dp) en cada disco que se obtuvo a distintas alturas, y se determinó con base en el área total del duramen (se usaron los diámetros de duramen en las dos direcciones de medición) en relación al área total del disco con corteza, y se expresó porcentualmente. La determinación del Dp se presenta en la Ecuación 2.

$$PD = \frac{d_1^2 + d_2^2}{D_1^2 + D_2^2} * 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

PD representa la proporción del área de duramen con respecto al área total del disco correspondiente, en %

$d_1$  y  $d_2$  son los diámetros de medición norte-sur y este-oeste, respectivamente del duramen, en cm

$D_1$  y  $D_2$  son los diámetros de medición norte-sur y este-oeste, respectivamente del disco con corteza evaluado, en cm

#### *Altura relativa de muestreo y del duramen*

Para la altura relativa de los discos muestreados a distintas alturas (hr), se obtuvo mediante la relación entre el  $h_s$  y la  $H_t$ , expresado porcentualmente, siendo 0 % la base del árbol y 100 % la altura total. Con respecto a la altura relativa donde desaparece el duramen (Hdr), se relacionó la  $H_d$  con la  $H_t$  de los árboles y se expresó porcentualmente.

#### *Volumen de duramen*

El volumen de duramen (V) se estimó para cada árbol muestreado, utilizando el método de volumen en forma cónica (Ecuación 4), donde se estimó desde la base del árbol hasta donde alcanza la  $H_d$ . Para el V se tomó en cuenta el área transversal de duramen en la base del árbol (Ecuación 3). Los árboles que no presentaron duramen fueron omitidos para esta variable.

$$a_b (m^2) = \frac{\pi * d^2 (m)}{4} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$V (m^3) = \frac{a_b(m^2) * Hd (m)}{3} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$a_b$  es el área trasversal del duramen de la base del árbol

$d$  es la medida del diámetro promedio de duramen en la base del árbol

$V$  es el volumen de duramen, estimado de la base del árbol hasta la altura máxima de duramen en el fuste

$Hd$  es la altura máxima de duramen en metros

#### ***4.4. Módulo de elasticidad dinámico***

##### *Tiempo de onda de ultrasonido en discos*

La medición de onda de ultrasonido se refiere al tiempo que transcurre para que una onda sónica atraviese un material de un punto a otro, en el caso de la madera puede ser evaluada en diferentes sentidos del árbol en pie o en piezas aserradas (Carter et al., 2005). Para los discos muestreados y tomados a distintas alturas, se determinó el tiempo de onda de ultrasonido en sentido transversal en estado verde, en las dos direcciones de medición de diámetro sin corteza que se determinaron (norte-sur y este-oeste). La medición se llevó a cabo mediante el equipo de ultrasonido SYLVATESTDUO, con transductores de 22 kHz, un transductor transmite la onda y el otro la capta. El dispositivo está configurado para realizar cuatro lecturas por medición y brinda el tiempo en microsegundo entre un punto y otro.

##### *Determinación del módulo de elasticidad dinámico*

El módulo de elasticidad dinámico (MOEd) es un método no destructivo de evaluación de la rigidez y resistencia de la madera en cualquiera de sus dimensiones (Carter et al., 2005). El MOEd se evaluó para todos los discos que se muestrearán a distintas alturas del fuste, en ambos sentidos de medición de diámetros norte-sur y este-oeste. La velocidad de onda de ultrasonido se obtuvo mediante la Ecuación 5, haciendo uso del tiempo de onda medido en los discos. El MOEd se calculó por medio

de la Ecuación 6, donde se utilizó la densidad verde promedio estimada de las piezas obtenidas de cada disco respectivo y la velocidad de onda, anteriormente descrita.

$$V = L / \left( \frac{T}{1000000} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\text{MOED} = V^2 \times D_v \times 10^{-6} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

V es la velocidad de ultrasonido a través de un material en  $\text{km s}^{-1}$ .

L es la longitud de la sección evaluada transversalmente del disco en metros

T es el tiempo que tardó la onda del ultrasonido en recorrer la pieza en  $\mu\text{s}$

MOED es el módulo de elasticidad dinámico en MPa

$D_v$  es la densidad verde de la madera en  $\text{kg m}^{-3}$ , que se determinó con las piezas tomadas del centro del disco (peso verde entre volumen verde)

#### ***4.5. Análisis estadístico***

Una vez conformada la base de datos, primeramente se estudió el comportamiento del espesor de corteza, el diámetro de duramen y el porcentaje de área de duramen según la altura en metros y relativa. Seguidamente, se estudió la variación del espesor de albura a distintas alturas en el fuste, se aplicó un análisis de varianza de un solo factor (ANOVA) para cada edad de plantación, para la cual se utilizó como variable independiente la altura en metros y variable dependiente el espesor de albura. Para la comparación de este análisis de varianza se utilizó la prueba Tukey con nivel estadístico ( $p$ ) de 0,05. Se evaluó la existencia de patrones de distribución de espesor de albura según la edad de plantación, con la prueba t para dos medias (Significancia  $p$  0,05).

Para la distribución de variables medidas en los árboles según las regiones de muestreo en Costa Rica, se evaluaron solo cuatro regiones: PN, PC, PS y ZN, pues presentan repeticiones suficientes para su comparación. En el caso de la región CN, tan solo presentó una sola plantación, por lo que se excluyó de la comparación con las demás regiones.

El análisis de la varianza se efectuó mediante el modelo lineal, en la Ecuación 7, que evalúa el efecto de la edad de plantación (E), la altura de muestreo en metros (hs) y las regiones del país (R) donde se muestrearon las plantaciones de *T. grandis*.

$$Y_{ijk} = \mu + E_i + hs_j + R_k + E_i * hs_j + hs_j * R_k + E_i * R_k + E_i * hs_j * R_k \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$Y_{ijk}$  representa la observación para cada variable de los discos

$ijk$  corresponde a  $i$  árbol de cierta edad en  $j$  altura de medición con  $k$  región de muestreo respectiva

$\mu$  representa la media de la variable

Para el MOEd se realizó la prueba t de dos medias ( $p$  0,05), para comparar estas variables según la tendencia en las alturas de los árboles y por región del país. Se realizó la comparación de las variables medidas en los árboles con los parámetros calculados, según la correlación lineal, a través del análisis de coeficientes de la prueba de correlación de Pearson (significancia del 95%). Esta prueba permitió evaluar las variables más significantes para los modelos de regresión lineal múltiples.

Un aspecto importante que se tomó en cuenta, es que a pesar de que otros autores (Berthier et al., 2001; Climent et al., 2003; Sousa et al., 2012) no tomaron en cuenta las mediciones base de los árboles en el estudio de la variación de propiedades debido a la irregularidad en la forma del árbol a esa altura, en este trabajo se tomó en cuenta para el análisis de la formación de duramen.

#### **4.6. Modelos estadísticos**

En primera instancia, se verificó la distribución normal de los datos para la confección de los modelos de predicción. Se probó la distribución normal de los datos de cada variable, por medio de la prueba de normalidad de Ryan-Joiner, las variables a modelar que no presentaron distribución normal se le aplicó una transformación adecuada. Se utilizó el método de regresión lineal múltiple (significancia del 95 %) para obtener los modelos de predicción de las variables de Ea, Rd, Hd, Dp y V del árbol. Los modelos fueron probados con las variables independientes de mejor ajuste según la correlación

con las variables a modelar, y su escogencia se determinó según los estadísticos de comparación en unidades reales: el valor del error estándar y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) o el coeficiente de determinación en unidades reales FI (para los modelos transformados). Las gráficas de residuos fueron analizadas para evaluar la validez de los modelos.

## 5. Resultados

### 5.1. Variación de corteza y duramen en las plantaciones

El espesor de corteza, para todos los árboles de *T. grandis* muestreados en condiciones de rápido crecimiento, tuvo una tendencia a decrecer de forma polinómica convexa con el aumento en altura y altura relativa de los árboles (Figura 3a-b). Los coeficientes de correlación lineal, el espesor de corteza y la altura en metros o altura relativa de los árboles, indicaron una relación negativa estadísticamente significativa (coeficientes -0,58 y -0,69, respectivamente), lo que indica que el espesor de corteza decrece significativamente con la altura de los árboles. El espesor de corteza varía entre 0,2 y 2,8 cm en las diferentes alturas (0 a 24 m).

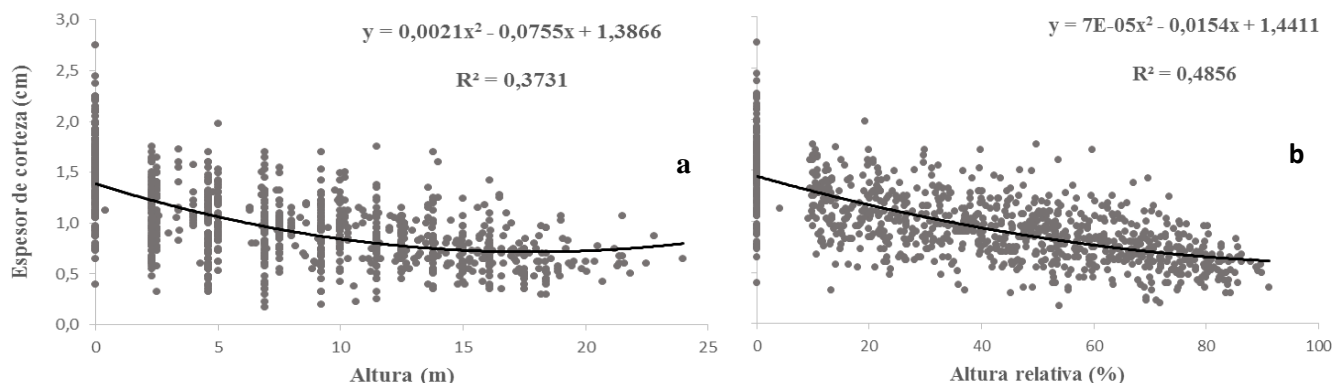


Figura 3. Variación del espesor de corteza con respecto a la altura en metros (a) y a la altura relativa (b) en árboles de *T. grandis* en plantaciones de rápido crecimiento a diferentes edades en Costa Rica.

La variación del diámetro de duramen, con respecto a la altura o altura relativa (Figura 4a-b), presentó una tendencia polinómica cóncava decreciente considerablemente ajustado con el aumento de la altura. Los diámetros de duramen obtenidos oscilaron entre 0,25 cm y 39,70 cm; de la misma forma los diámetros de duramen de mayor envergadura se encuentran cerca de la base del fuste, mientras que los de menor dimensión estuvieron en la parte alta del fuste.

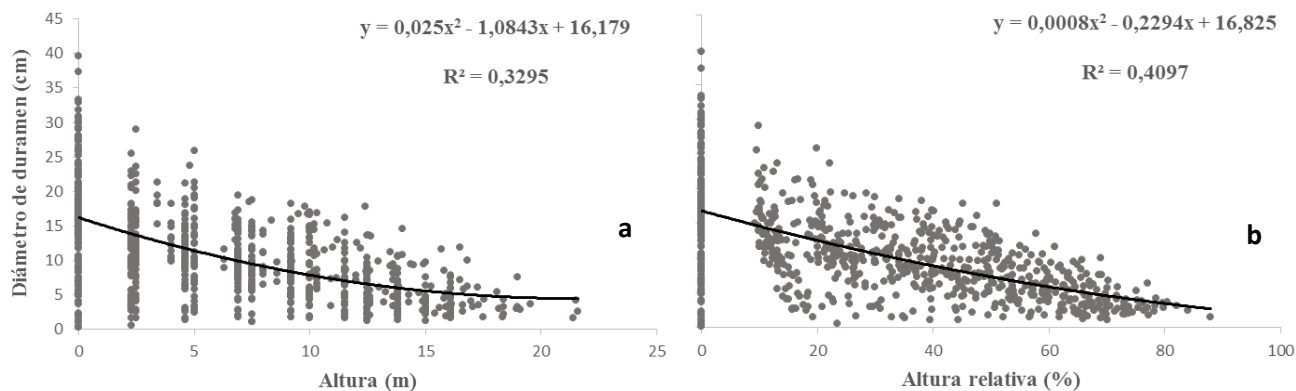


Figura 4. Variación de diámetro de duramen con respecto a la altura en metros (a) y a la altura relativa (b) en árboles de *T. grandis* en plantaciones de rápido crecimiento a diferentes edades en Costa Rica.

En el caso del porcentaje de duramen se observó una tendencia polinómica cóncava decreciente, tanto para la altura en metros (Figura 5a), como para la altura relativa de los árboles (Figura 5b), observándose también una considerable variabilidad del porcentaje de duramen a lo largo del fuste. Por otra parte, el porcentaje de duramen en los árboles varió entre 0,02 y 70,79%, y se encontraron los mayores porcentajes de duramen cerca de la base de los árboles y los más bajos porcentajes fueron para las alturas más cercanas al ápice del árbol.

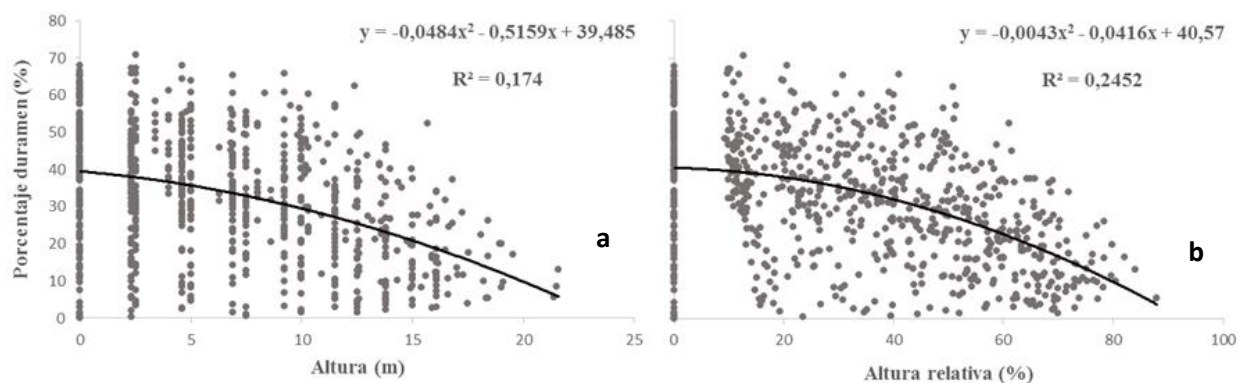


Figura 5. Variación de porcentaje de duramen con respecto a la altura en metros (a) y a la altura relativa (b) en árboles de *T. grandis* en plantaciones de rápido crecimiento a diferentes edades en Costa Rica.

## 5.2. Variación de la albura a lo largo del fuste

El espesor de albura no mostró una tendencia definida con respecto a la altura y la altura relativa de los árboles (Figura 6a-b). El espesor de albura observado varió entre 0,53 y 6,45 cm, a lo largo de la altura de los árboles. Los coeficientes de determinación de la regresión lineal, entre el espesor de albura con respecto a la altura en metros y a la altura relativa de muestreo, indicaron una relación estadísticamente no significativa según los coeficientes de correlación Pearson (0,153 y 0,147 respectivamente), lo que demuestra que el espesor de albura fue uniforme a lo largo del fuste de los árboles (Figura 6a-b).

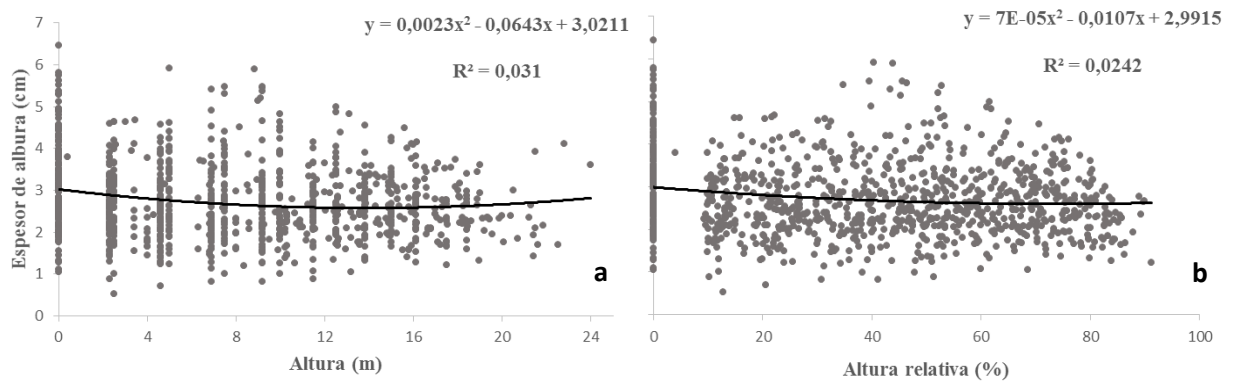


Figura 6. Variación de espesor de albura con respecto a la altura en metros (a) y a la altura relativa (b) en árboles de *T. grandis* en plantaciones de rápido crecimiento a diferentes edades en Costa Rica.

Así mismo fue posible observar que existe diferencia significativa en la variabilidad del espesor de albura a lo largo del fuste del árbol en algunas edades muestreadas (Tabla 3). En las edades de 2, 3 y 7 años se presentó una tendencia a decrecer con la altura, mientras que para las edades de 8, 9 y 14 años se observaron irregularidades del espesor de albura a lo largo del fuste. Las edades mayores a 10 años (exceptuando 14 años) no presentaron diferencias significativas con el espesor de albura en todo el fuste. En la Tabla 3, se puede observar además que en las edades tempranas y en los primeros metros fue donde se encontraron los mayores espesores de albura, por otro lado, los menores espesores se observaron en las alturas finales de los árboles, sin distinción de la edad.



Tabla 3. Variabilidad del espesor de albura (cm) a distintas alturas de árboles de *T. grandis* en plantaciones de rápido crecimiento a diferentes edades en Costa Rica.

Altura de muestreo (m)	Edad (años)																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	24
0	4,57 <sup>a</sup>	4,45 <sup>a</sup>	4,58 <sup>a</sup>	3,57 <sup>a</sup>	4,38 <sup>a</sup>	3,66 <sup>a</sup>	3,74 <sup>abc</sup>	3,80 <sup>ab</sup>	3,37 <sup>a</sup>	2,83 <sup>a</sup>	3,00 <sup>a</sup>	2,31 <sup>a</sup>	2,23 <sup>ab</sup>	2,79 <sup>a</sup>	2,79 <sup>a</sup>	2,37 <sup>a</sup>	3,09 <sup>a</sup>	2,55 <sup>a</sup>	2,52 <sup>a</sup>	3,05 <sup>a</sup>
2,3	2,38 <sup>b</sup>	*2,64 <sup>b</sup>	3,68 <sup>a</sup>	2,39 <sup>a</sup>		2,87 <sup>ab</sup>	2,92 <sup>abc</sup>	2,69 <sup>bcd</sup>	3,00 <sup>a</sup>	2,49 <sup>a</sup>	2,03 <sup>a</sup>	2,16 <sup>a</sup>	1,83 <sup>b</sup>		2,38 <sup>a</sup>		2,88 <sup>a</sup>	1,89 <sup>a</sup>	2,73 <sup>a</sup>	2,17 <sup>a</sup>
2,5				3,44 <sup>a</sup>	3,17 <sup>a</sup>		3,45 <sup>abc</sup>	3,40 <sup>abc</sup>	3,05 <sup>a</sup>		2,26 <sup>a</sup>	2,31 <sup>a</sup>	1,98 <sup>ab</sup>	2,21 <sup>a</sup>				2,40 <sup>a</sup>	1,18 <sup>a</sup>	
4,6	*1,84 <sup>b</sup>	*1,90 <sup>b</sup>	*3,68 <sup>a</sup>	3,29 <sup>a</sup>		*2,74 <sup>ab</sup>	3,12 <sup>abc</sup>	2,75 <sup>abcd</sup>	2,86 <sup>a</sup>	2,35 <sup>a</sup>	1,81 <sup>a</sup>	1,98 <sup>a</sup>	2,03 <sup>ab</sup>		2,53 <sup>a</sup>		2,50 <sup>a</sup>	1,90 <sup>a</sup>	2,56 <sup>a</sup>	2,16 <sup>a</sup>
5,0				3,57 <sup>a</sup>	3,51 <sup>a</sup>		4,73 <sup>a</sup>	3,20 <sup>abcd</sup>	2,86 <sup>a</sup>		2,15 <sup>a</sup>	2,56 <sup>a</sup>	2,08 <sup>ab</sup>	2,32 <sup>a</sup>		2,48 <sup>a</sup>		2,32 <sup>a</sup>	1,58 <sup>a</sup>	
6,9				*3,85 <sup>a</sup>		*2,15 <sup>b</sup>	2,84 <sup>bc</sup>	2,38 <sup>cd</sup>	3,12 <sup>a</sup>	2,18 <sup>a</sup>	2,21 <sup>a</sup>	2,26 <sup>a</sup>	2,02 <sup>ab</sup>		2,43 <sup>a</sup>		2,23 <sup>a</sup>	2,14 <sup>a</sup>	2,57 <sup>a</sup>	2,23 <sup>a</sup>
7,5				3,59 <sup>a</sup>	*3,64 <sup>a</sup>		4,85 <sup>ab</sup>	3,31 <sup>abcd</sup>	2,98 <sup>a</sup>		2,36 <sup>a</sup>	2,65 <sup>a</sup>	1,94 <sup>ab</sup>	2,36 <sup>a</sup>				2,44 <sup>a</sup>	1,42 <sup>a</sup>	
9,2						*1,64 <sup>b</sup>	2,83 <sup>abc</sup>	2,85 <sup>abcd</sup>	3,66 <sup>a</sup>	2,35 <sup>a</sup>	2,13 <sup>a</sup>	2,31 <sup>a</sup>	2,08 <sup>ab</sup>		2,74 <sup>a</sup>		2,65 <sup>a</sup>	2,04 <sup>a</sup>	2,86 <sup>a</sup>	2,55 <sup>a</sup>
10,0				*3,39 <sup>a</sup>				3,86 <sup>ab</sup>	3,18 <sup>a</sup>		2,58 <sup>a</sup>	3,03 <sup>a</sup>	2,12 <sup>ab</sup>	2,39 <sup>a</sup>		2,45 <sup>a</sup>		2,32 <sup>a</sup>	1,49 <sup>a</sup>	
11,5							2,73 <sup>abc</sup>	2,82 <sup>abcd</sup>	2,97 <sup>a</sup>	2,39 <sup>a</sup>	2,18 <sup>a</sup>	2,32 <sup>a</sup>	2,61 <sup>a</sup>		2,91 <sup>a</sup>			2,16 <sup>a</sup>	2,98 <sup>a</sup>	2,73 <sup>a</sup>
12,5								4,10 <sup>a</sup>	2,45 <sup>a</sup>		2,71 <sup>a</sup>	3,28 <sup>a</sup>	2,08 <sup>ab</sup>	2,98 <sup>a</sup>		1,93 <sup>a</sup>		2,58 <sup>a</sup>	2,06 <sup>a</sup>	
13,8							1,98 <sup>c</sup>	2,72 <sup>abcd</sup>	2,93 <sup>a</sup>	2,71 <sup>a</sup>	2,20 <sup>a</sup>	2,46 <sup>a</sup>			3,90 <sup>a</sup>			2,59 <sup>a</sup>	3,18 <sup>a</sup>	2,54 <sup>a</sup>
15,0								*3,11 <sup>abcd</sup>			3,18 <sup>a</sup>	3,33 <sup>a</sup>	2,12 <sup>ab</sup>	*3,00 <sup>a</sup>		2,00 <sup>a</sup>	2,50 <sup>a</sup>	2,45 <sup>a</sup>	2,01 <sup>a</sup>	
16,1							3,36 <sup>abc</sup>	*2,22 <sup>abcd</sup>	3,03 <sup>a</sup>	2,39 <sup>a</sup>	1,27 <sup>a</sup>	2,45 <sup>a</sup>			*3,59 <sup>a</sup>			2,31 <sup>a</sup>		2,55 <sup>a</sup>
17,5								*1,54 <sup>d</sup>			2,21 <sup>a</sup>	*2,26 <sup>a</sup>	*2,67 <sup>ab</sup>			*2,33 <sup>a</sup>			*2,45 <sup>a</sup>	
18,4									*2,72 <sup>a</sup>	*2,22 <sup>a</sup>		*2,37 <sup>a</sup>			*2,86 <sup>a</sup>			2,13 <sup>a</sup>		*3,03 <sup>a</sup>
20,0																*2,39 <sup>a</sup>				
20,7																		*1,84 <sup>a</sup>		
22,5																*1,69 <sup>a</sup>				

Valores con letras distintas indican diferencias significativas entre alturas, nivel de confiabilidad del 95%.

\* No se presenta crecimiento de duramen.

El anterior resultado sugiere que el espesor de albura presentó dos diferentes patrones de distribución por edades de plantación (Figura 7a-b). El primer patrón se presentó en los árboles de plantaciones de 2 a 10 años de edad, donde el espesor de albura muestra una tendencia a decrecer con el aumento en altura del árbol (Figura 7). El segundo patrón de distribución se presentó en los árboles de plantaciones de 11 a 24 años, con una tendencia a mantenerse constante con el aumento de altura del árbol. Al aplicar la prueba t en los dos rangos de espesor de albura (árboles menores e igual a 10 años y árboles mayores a 10 años) se demostró que existen diferencias significativas entre los dos rangos de edades ( $t = 15,40$ ; valor  $p < 0,05$ ), el rango que comprende de 11 a 24 años presenta un espesor de albura menor estadísticamente, que los árboles en el grupo de edad de 2 a 10 años. El rango de las primeras edades mostró una variación del espesor de albura entre 0,53 y 4,82 cm, mientras que para las edades entre 2 y 10 años, el espesor de albura varía entre 1,21 y 6,45 cm.

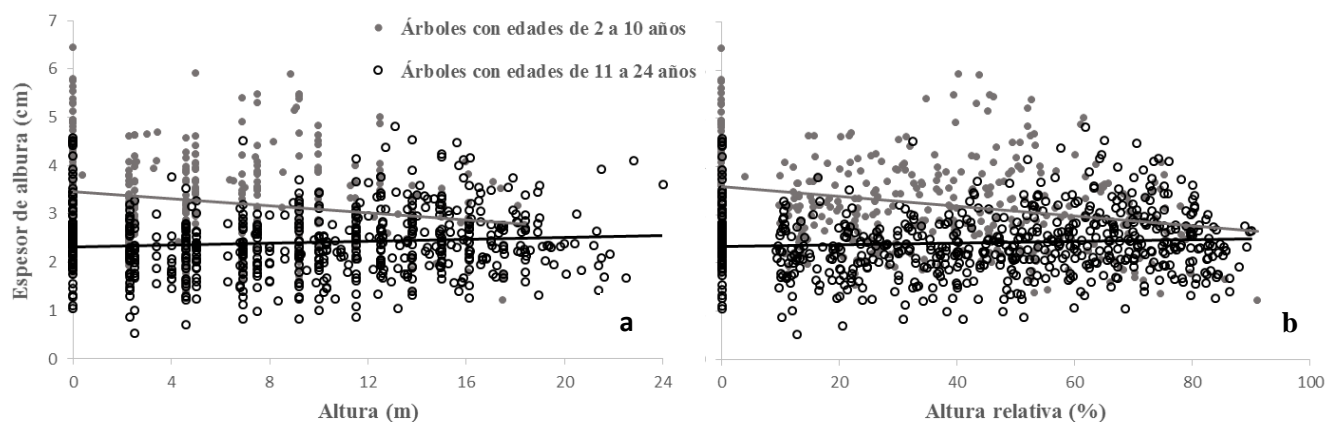


Figura 7. Variación de espesor de albura en relación con respecto a la altura en metros (a) y a la altura relativa (b) en árboles de *T. grandis* en plantaciones de rápido crecimiento en dos categorías de edades en Costa Rica.

### 5.3. Edad de formación y altura máxima de duramen

En cuanto a la formación de duramen, en el muestreo de los árboles entre la edad de 2 y 3 años se encontró que fue a partir de estas edades cuando inició la formación de duramen en la base del árbol (Figura 8a-b). A los dos años sólo dos árboles presentaron formación de duramen, mientras que para los árboles de tres años, cuatro individuos presentaron duramen en la base, pero no en el resto de las alturas de estos árboles. En cuanto a la altura máxima de los árboles, donde se observó presencia de duramen, se determinó que fue proporcional con la edad de las plantaciones (Figura 8a); de tal forma

que con el aumento en edad de los árboles, el duramen desaparece a mayor altura ( $R^2 = 59,25\%$ ). También se observó que con el aumento en edad, la altura máxima de duramen tiende a acortar su distancia con respecto a la altura total del árbol (Figura 8a), de tal forma que en los árboles de menor edad la distancia entre la altura máxima de duramen y el ápice del árbol, tiende a disminuir con el aumento en la edad de los árboles. Así mismo, se observó una proporción significativa de la altura máxima de duramen con la edad ( $R^2 = 57,67\%$ ), de tal manera que a mayor edad de plantación, la desaparición del duramen en altura también fue mayor (Figura 8b).

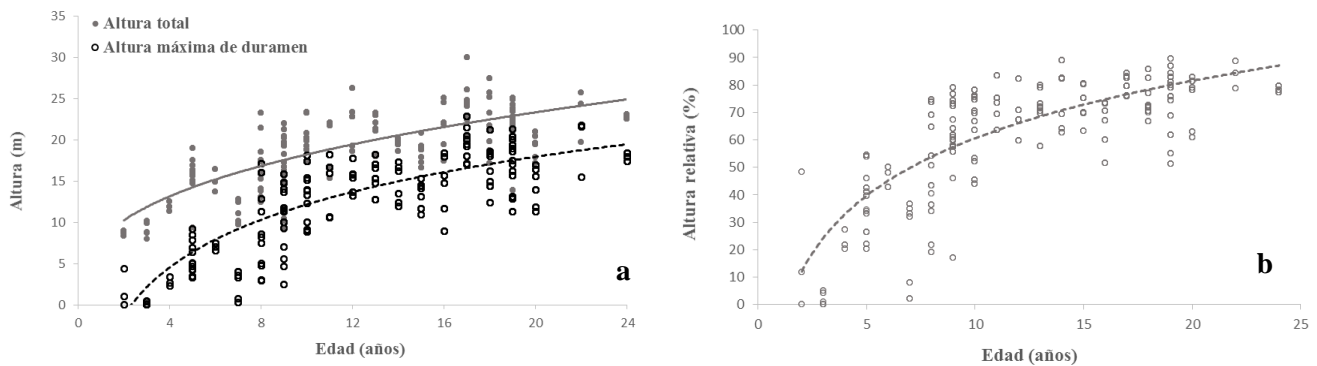


Figura 8. Relación de la altura máxima de duramen, altura total (a) y altura máxima relativa de duramen (b) con la edad de la plantación de árboles de *T. grandis* en plantaciones de rápido crecimiento de diferentes edades en Costa Rica.

De la misma forma se comparó la variación de la altura máxima de duramen por edad de plantación, según las categorías de zonas de muestreo en Costa Rica (Figura 9a). Las zonas de PC ( $R^2 = 62,44\%$ ) y PN ( $R^2 = 70,87\%$ ) presentan una distribución creciente con pendiente similar, mientras que ZN ( $R^2 = 39,53\%$ ) muestra una tendencia de datos crecientes con distinta pendiente, y por último en PS ( $R^2 = 25,43\%$ ) se observó una tendencia más constante con el aumento de la edad de las plantaciones. Por su parte, al comparar la altura relativa de duramen con la edad de plantación (Figura 9b), las categorías de PC y PN presentaron distribuciones similares, con tendencia creciente ( $R^2: 76,3\%$  y  $69,6\%$ , respectivamente), mientras que ZN y PS presentaron una tendencia creciente menos marcada ( $R^2: 39,16\%$  y  $33,93\%$ , respectivamente), con la diferencia que PS presenta los mayores valores de altura relativa de duramen con respecto a las demás.

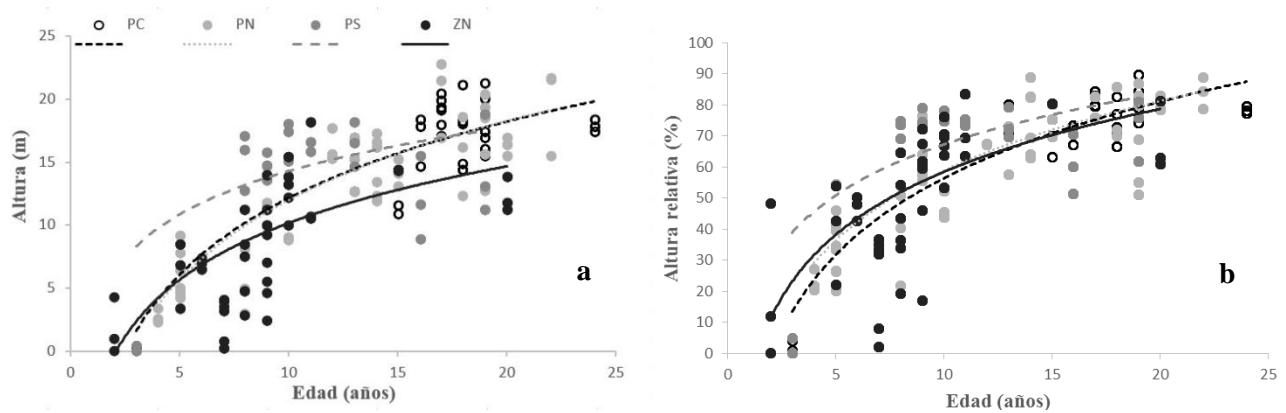


Figura 9. Relación de la altura máxima de duramen según la altura en metros (a) y la altura relativa (b), con la edad de la plantación de árboles de *T. grandis* en plantaciones de rápido crecimiento de diferentes edades en Costa Rica.

#### 5.4. Relación de altura máxima de duramen con variables dasométricas del árbol

La relación de la altura máxima de duramen con otras variables dasométricas muestra diferentes tendencias. En el caso de la altura de copa de los árboles se observó una correlación logarítmica positiva (Figura 10a), de igual forma se presenta una tendencia positiva logarítmica con el dap de los árboles (Figura 10b) y por último se observó una relación lineal creciente con la altura total del árbol (Figura 10c).

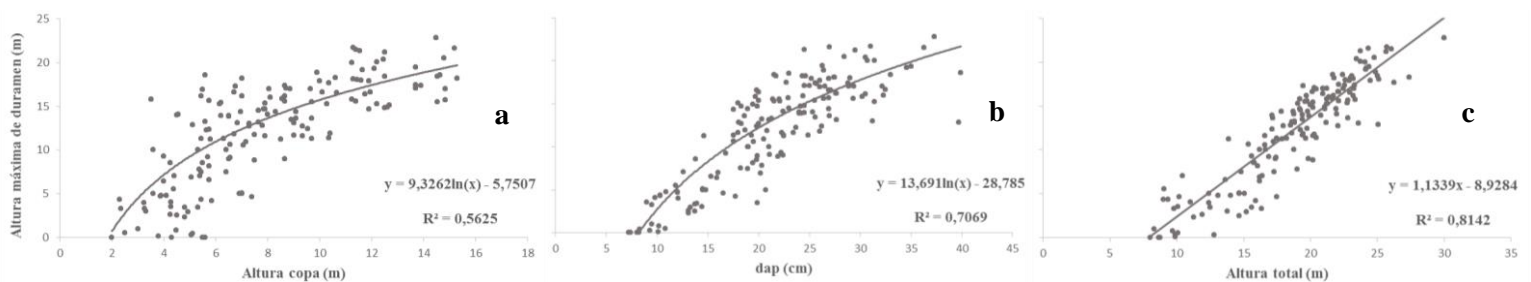


Figura 10. Relación de la altura máxima de duramen con la altura de la copa (a), diámetro a la altura del pecho (b) y altura total (c) de árboles de *T. grandis* en plantaciones de rápido crecimiento de diferentes edades en Costa Rica.

La variable altura máxima de duramen en rama también fueron relacionadas con las variables dasométricas estudiadas en los árboles, en el caso de la altura máxima de duramen la relación fue lineal (Figura 11a). La relación de la altura máxima de duramen y la altura máxima de duramen en

rama según la edad de plantación, presentaron unas tendencias logarítmicas crecientes ( $R^2$  respectivamente 59,25% y 29,67%). La diferencia que presentaron la altura máxima de duramen y altura máxima de duramen en rama, se encontró entre las distancias de 0,05 y 6,00 m, lo que indica que entre este rango de distancia no se presentaron ramas con formación de duramen (Figura 11b).

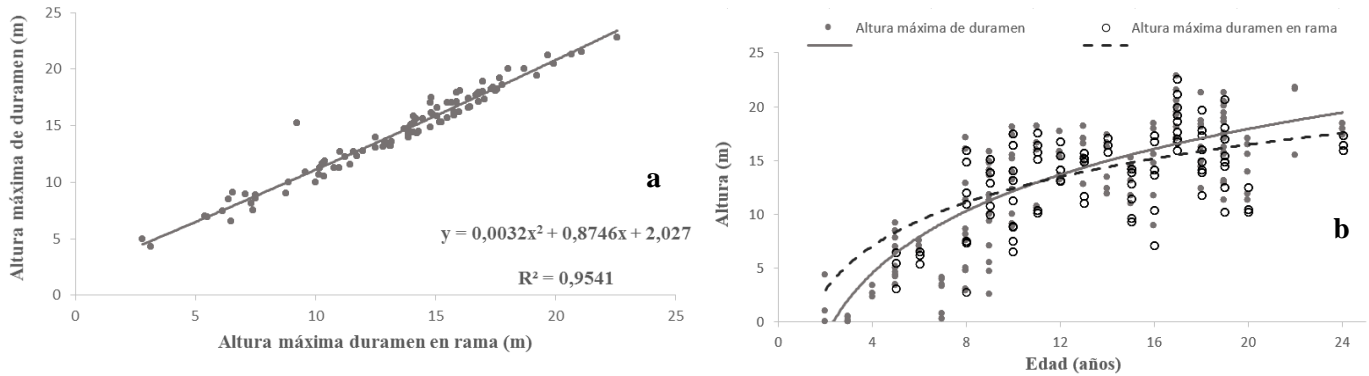


Figura 11. Relación de altura máxima de duramen y altura máxima de duramen en rama (a) y la relación de ambas variables con la edad (b) de árboles de *T. grandis* en plantaciones de rápido crecimiento de diferentes edades en Costa Rica.

Así mismo, la altura máxima de duramen en rama presenta una relación creciente con la altura total (Figura 12a), y de igual manera existe una tendencia creciente con la variable dap de los árboles (Figura 12b).

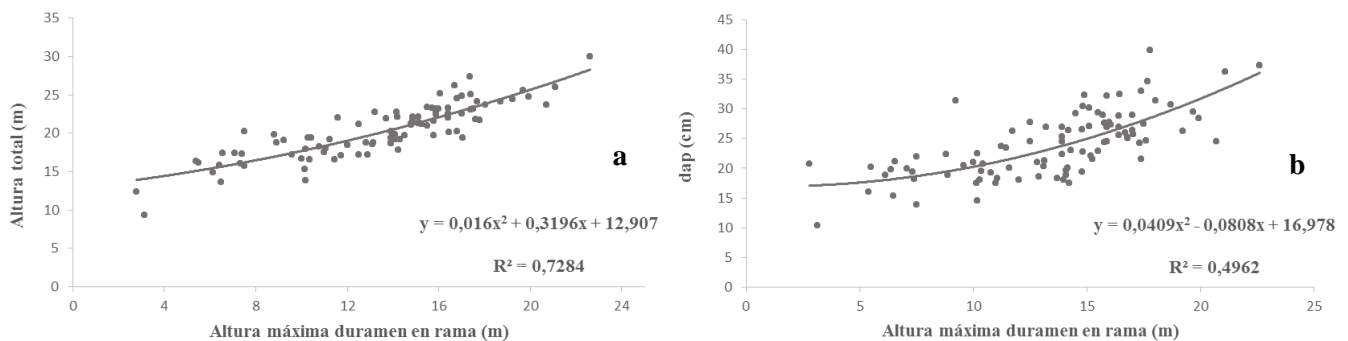


Figura 12. Relación de la altura máxima de duramen en rama con la altura total (a) y de la altura máxima de duramen en rama con el dap (b) de árboles de *T. grandis* en plantaciones de rápido crecimiento de diferentes edades en Costa Rica.

Con respecto a la relación de radio de duramen y radio sin corteza promedio en el fuste de los árboles a distintas alturas muestreadas, se observó una variación de ambos parámetros de los 2 y hasta los 24 años de edad (Figura 13). Para las primeras edades, la formación de duramen fue poco desarrollada y existe mayor desarrollo del espesor de albura (Figura 13a, b y c). A partir de los 5 años el desarrollo del duramen sobre pasa la altura de 5 m (figura 13d), exceptuando la edad de 7 años que en promedio solo sobrepasó los 2,5 m de altura (Figura 13f). De la edad de 9 años en adelante (Figura 13h), la altura máxima del duramen sobrepasa los 10 metros en el fuste y presentó un radio de duramen en la base de 7,42 cm. A los 12 años, se sobrepasa los 15 metros de altura en el duramen, con un radio de 9,10 cm en su base (Figura 13k). El punto más alto promedio de la altura de duramen, se alcanzó en la edad de 22 años, con 19,6 m, y para esa edad se presentó un radio de duramen en base de 13,20 cm (Figura 13s). En el caso de los árboles que presentaron una morfología cónica, se observó que al aumentar la altura, disminuye el radio del fuste hasta llegar al ápice. No obstante, algunos árboles presentaron una morfología irregular a lo largo de la altura del duramen, principalmente en las edades de 8, 10, 11, 18, 19 y 24 años (Figura 13g, i, j, p, q y t), esto considera que la disminución del radio en altura fue irregular en estas edades. Además se observó que el radio de duramen, a partir de los 5 años de edad, disminuyó entre 25,06 y 43,16 %, desde la base hasta las alturas de 2,3 y 25 m del fuste, con excepción de la edad de 7 años que disminuyo en un 66,18 %.

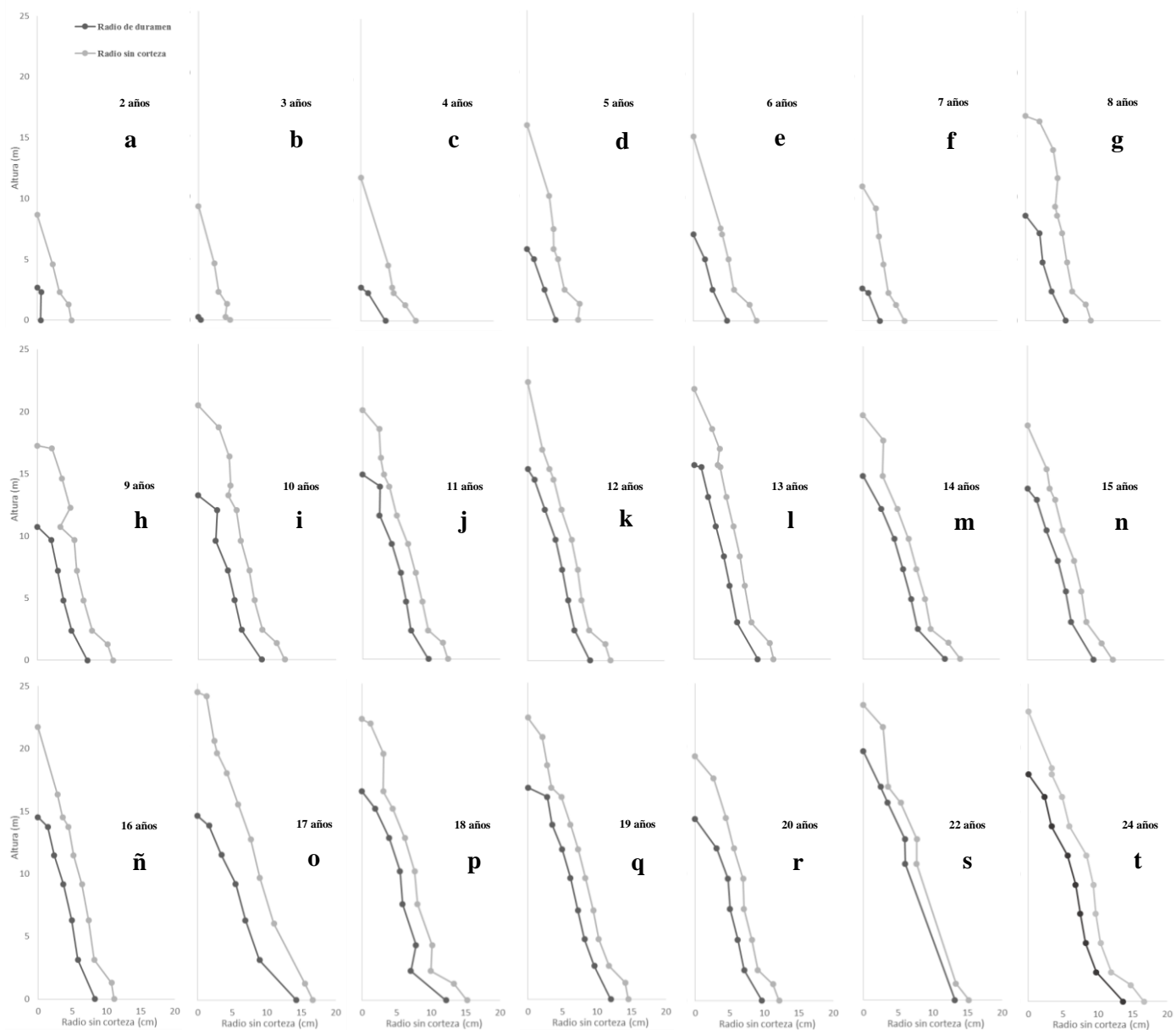


Figura 13. Distribución promedio del radio de duramen y radio sin corteza a lo largo del fuste, a diferentes edades en árboles de *T. grandis* en plantaciones de rápido crecimiento de diferentes edades en Costa Rica.

### 5.5. Volumen de duramen

El volumen de duramen de los árboles muestreados, presentó una tendencia creciente convexa tanto para la variable altura total de los árboles (Figura 14a), como para el dap (Figura 14b) y la edad de plantación (Figura 14c). Cabe resaltar, que a mayor edad, dap y altura total del árbol, aumentó el volumen del duramen en el fuste.

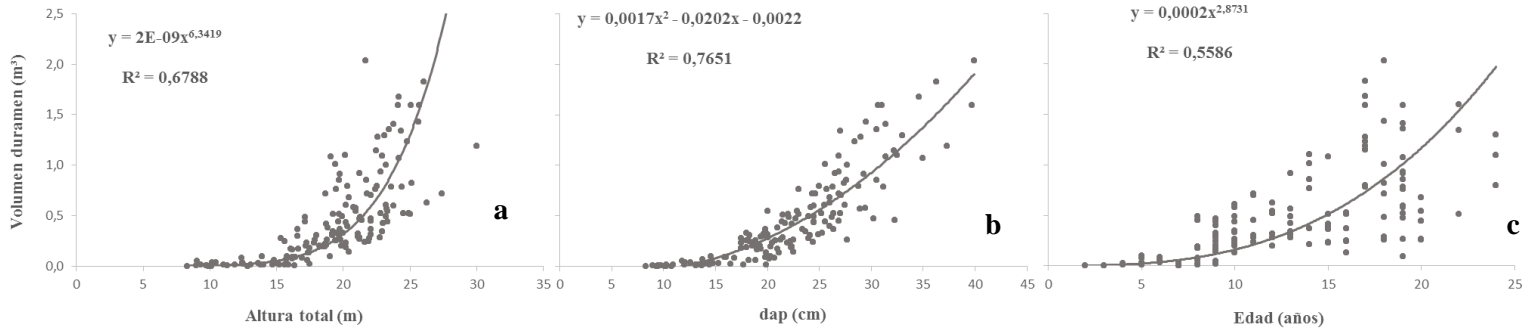


Figura 14. Distribución del volumen de duramen con relación a la altura total (a), el dap (b) y la edad de plantación (c) de los árboles muestreados en plantaciones forestales de *T. grandis* en plantaciones de rápido crecimiento de diferentes edades en Costa Rica.

### 5.6. Variación del MOEd en altura y edad del árbol

La distribución del MOEd, para todas las edades muestreadas, tuvo una tendencia a crecer mostrando una tendencia polinómica (Figura 15), siendo mayor este parámetro en las plantaciones de mayor edad. El MOEd varió entre 480,8 y 4779,4 MPa.

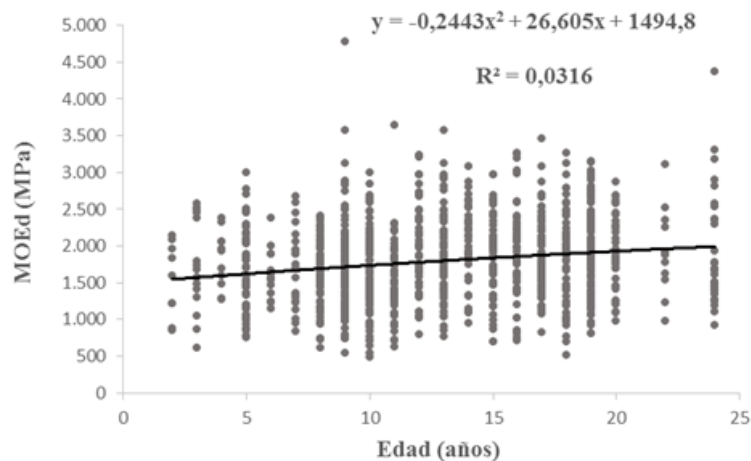


Figura 15. Distribución de MOEd según la edad de los árboles muestreados en plantaciones forestales de *T. grandis* en plantaciones de rápido crecimiento de diferentes edades en Costa Rica.

Con el resultado anterior, se sugirió que se compararan las diferencias significativas que puedan existir en el MOEd según la distribución en regiones o alturas del árbol. Se observó que la distribución del MOEd en las distintas alturas de los árboles, según las categorías de zonas del país, presentaron tendencia creciente polinómica (Figura 16a, b, c y d). El MOEd de la ZN, por medio de



la prueba t, mostró diferencias significativas con las zonas de PN, PS y PC (valores  $p < 0,05$ ), por lo que estas zonas presentan una media mayor a la zona ZN. Por el contrario, la comparación para el resto de las zonas no se presentaron diferencias significativas (valores  $p > 0,05$ ).

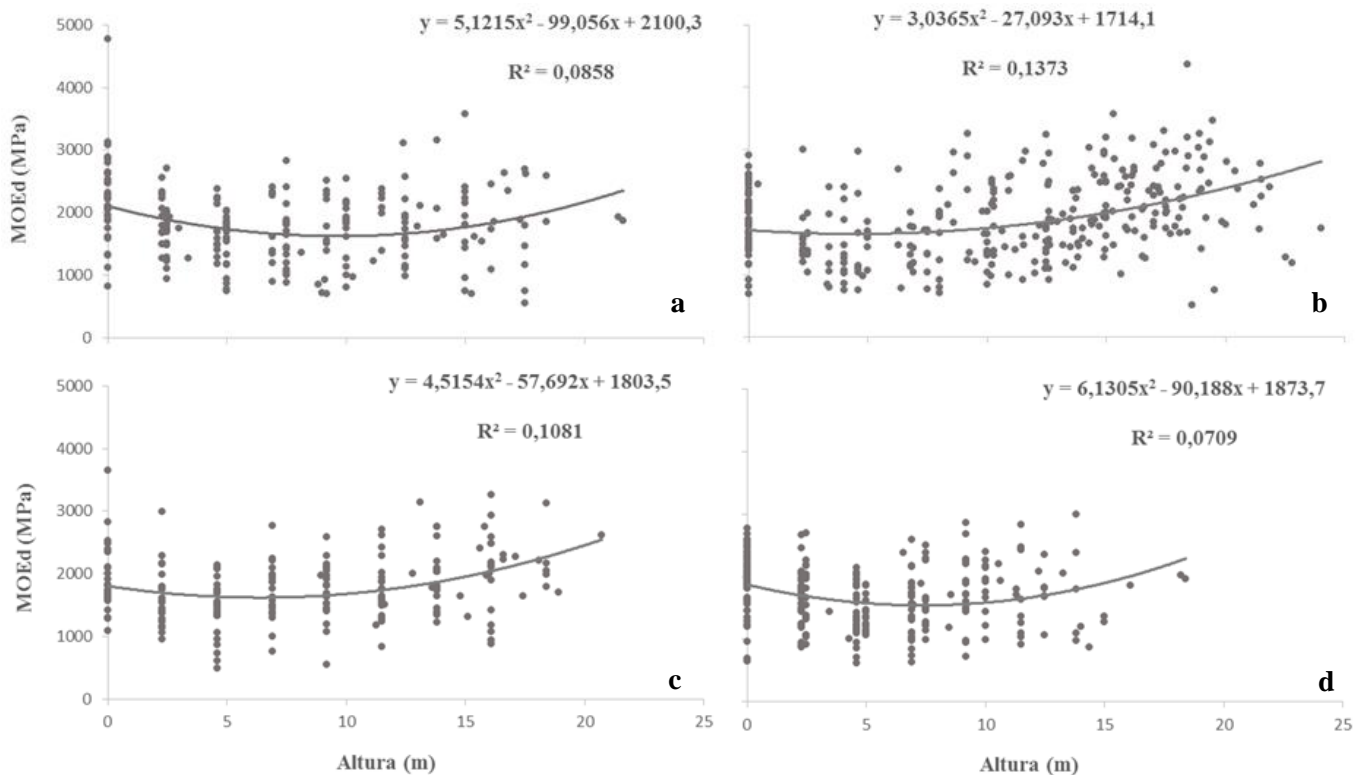


Figura 16. Distribución de MOEd por altura de los árboles de *T. grandis* muestreados en plantaciones de rápido crecimiento, en distintas zonas de Costa Rica: PN (a), PC (b), PS (c) y ZN (d).

Por otro lado, se comparó el MOEd en las cuatro primeras alturas de muestreo de los árboles (Figura 17). Donde la altura de 0 m presentó una tendencia del MOEd a decrecer de forma exponencial (Figura 17a), mientras que para las demás alturas, entre 2,3 y 7,5 m, las tendencias fueron con crecimiento polinomial (Figura 17b, c y d). La prueba t de medias, mostró que el MOEd en la altura de 0 m fue estadísticamente diferente a las demás alturas (valores de  $p < 0,05$ ), lo que demuestra que la media de valor de MOEd en la base de los árboles fue mayor que las alturas superiores. Además, este parámetro en la altura de 2,3 y 2,5 m también presentó diferencias significativas con la altura de

medición 4,6 y 5 m (valor  $p < 0,05$ ), siendo mayor el valor medio de MOEd en la primera altura. Por otro lado, el MOEd en la altura de 6,9 y 7,5 m, no presentó diferencias significativas con la segunda y tercera altura de medición en el fuste (valores de  $p > 0,05$ ).

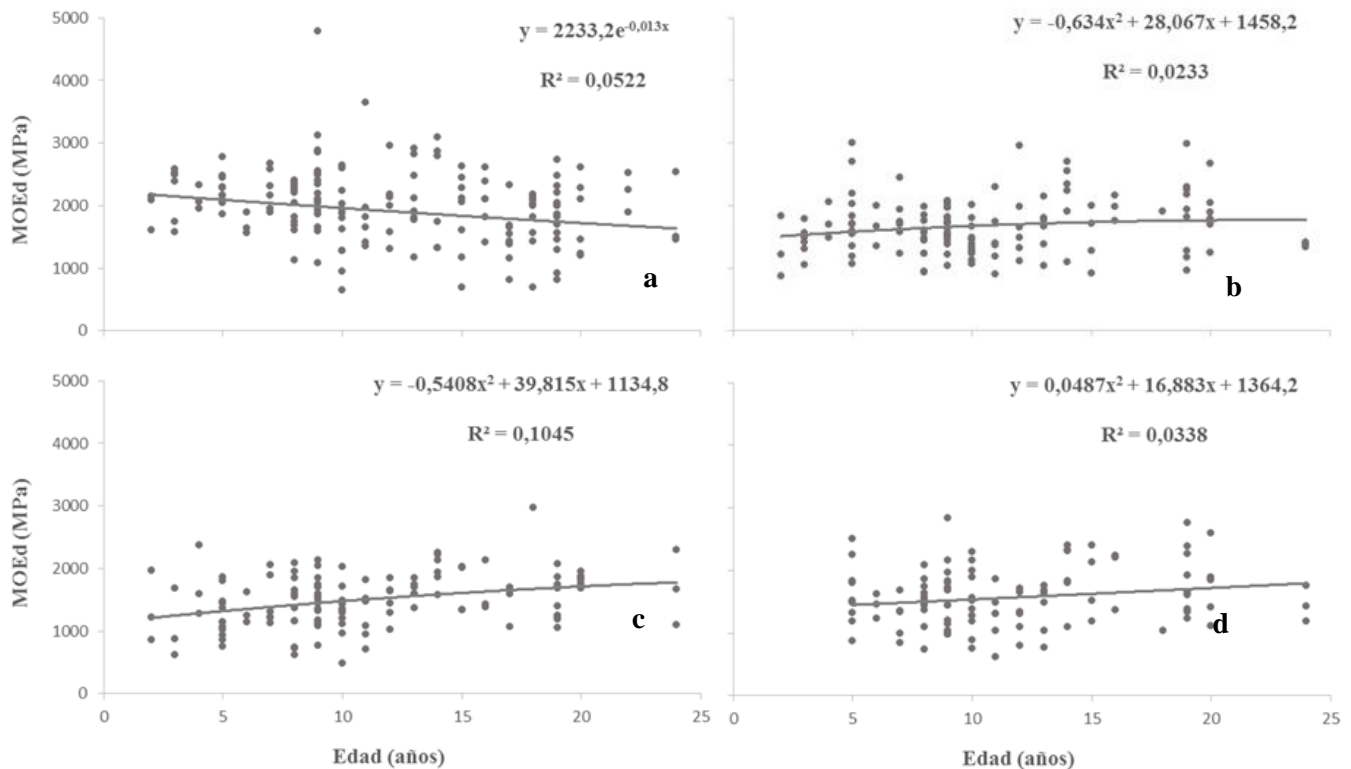


Figura 17. Distribución de MOEd por edad de árboles de *T. grandis* muestreados en plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica. Altura de medición **a.** 0 m, **b.** 2,3 y 2,5 m, **c.** 4,6 y 5 m y **d.** 6,9 y 7,5 m.

### 5.7. Modelos de predicción del duramen

#### Correlación de variables de los árboles

Se establecieron las correlaciones de los parámetros de los árboles con mayor relevancia para la confección de los modelos de predicción (Tabla 4). El dap, altura total y edad del árbol mostraron correlación significativa en mayor medida con la altura máxima de duramen y volumen de duramen,

y con menor significancia con el diámetro de duramen y el porcentaje de área de duramen. En cuanto a la altura en metros y la altura relativa de muestreo, presentaron significativamente correlación negativa con el diámetro de duramen en mayor medida y con menor significancia con el porcentaje de área de duramen. Además presentaron correlación positiva con la altura máxima de duramen, mientras que con el volumen de duramen fue con menor significancia. En el caso de la altura de copa en el árbol, se presentó correlación positiva con fuerte significancia con la altura máxima de duramen, y con menor significancia con el diámetro de duramen, porcentaje de duramen y volumen de duramen. Por último, el parámetro de espesor de albura presentó correlación negativa con todas las variables medidas en los árboles, pero con baja significancia.

Tabla 4. Coeficientes de correlación entre variables de árboles de *T. grandis* muestreados en plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

<b>Variables</b>	<b>dap</b>	<b>Altura total</b>	<b>Altura relativa</b>	<b>Altura</b>	<b>Edad</b>	<b>Altura copa</b>
<b>Altura máxima duramen</b>	0,789**	0,894**	0,271	0,449	0,693**	0,719**
<b>Espesor albura</b>	-0,159	-0,223	-0,147	-0,153	-0,404	-0,302
<b>Diámetro duramen</b>	0,454	0,333	-0,637**	-0,564**	0,327	0,159
<b>Porcentaje duramen</b>	0,413	0,368	-0,477	-0,409	0,437	0,265
<b>Volumen duramen</b>	0,938**	0,768**	0,197	0,368	0,598**	0,495

Todos los coeficientes presentan significancia con  $p < 0,05$ .

\*\*mayor significancia con los parámetros.

### Modelos de predicción

Para las variables a modelar, espesor de albura, radio de duramen, altura máxima de duramen, porcentaje de área de duramen y volumen de duramen, se probó la normalidad de los datos por medio de la prueba de Ryan-Joiner. Las variables espesor de albura, altura máxima de duramen y porcentaje de área de duramen, presentaron normalidad de su distribución de datos (valor  $p < 0,01$ ; valor RJ de 0,98, 0,97 y 0,99, respectivamente), y no fue necesaria la transformación de variables. Por el contrario, para el radio de duramen y el volumen duramen no presentaron normalidad en su distribución, por lo que se requirió la transformación con raíz cuadrada para que fuesen normales las distribuciones (valor  $p < 0,05$ ; valor RJ de 0,99 y 0,99, respectivamente).

Se evaluó como variable predictora categórica las distintas zonas de muestreo de plantaciones (PN, PC, PS y ZN), sin embargo para esta variable el ajuste no fue significativo con respecto al modelo general para todos los datos. Por el contrario, para el porcentaje de duramen, se incluyó la variable categórica de edades (Tabla 5), la cual ajustó mejor el modelo de predicción. Las variables categóricas  $Z_1$ ,  $Z_2$  y  $Z_3$ , tomaron el valor dado según la edad de plantación que se evalúe para un mejor ajuste del modelo 4 (Tabla 6) de porcentaje de duramen.

Tabla 5. Variable categórica según rangos de edades de plantaciones de *T. grandis* creciendo en Costa Rica.

Edades de plantación	Variables categóricas de modelo de predicción		
	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$
<b>2 a 6 años</b>	0	0	0
<b>7 a 11 años</b>	1	0	0
<b>12 a 16 años</b>	0	1	0
<b>17 a 24 años</b>	0	0	1

En la estimación del espesor de albura, se basó en el coeficiente de determinación y error estándar para el mejor ajuste, con las variables edad de plantación, altura de muestreo en metros y altura relativa de muestreo. Este modelo explica un 19% (regresión valor  $p < 0,05$ ) de la variación del espesor de albura a distintas alturas del fuste (modelo 1 en Tabla 6), además de presentar una distribución significativamente adecuada de los errores (Figura 18a).

Tabla 6. Regresión ajustada para modelos de precisión para albura y duramen en árboles de *T. grandis* muestreados en plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

	<b>Error estándar</b>	<b>R<sup>2</sup> ajustado (%)</b>	<b>FI</b>	<b>Modelos</b>	
Espesor de albura	0,80	18,67	-	<b>Ea</b> = 3,8973 - 0,08134 <b>E</b> + 0,0852 <b>hs</b> - 0,02007 <b>hr</b>	(1)
Radio de duramen	0,30	-	84,03	$\sqrt{\mathbf{Rd}} = -2,225 + 0,2229\sqrt{\mathbf{E}} + 0,4989\sqrt{\mathbf{dap}} + 0,4915\sqrt{\mathbf{Ht}} - 0,91\sqrt{\mathbf{hs}} + 0,2112\sqrt{\mathbf{hr}}$	(2)
Altura máxima de duramen	1,83	86,28	-	<b>Hd</b> = -7,09 + 0,1842 <b>E</b> + 0,1881 <b>dap</b> + 0,5715 <b>Ht</b> + 0,3036 <b>hc</b>	(3)
Proporción de área de duramen	9,22	68,34	-	<b>Dp</b> = -8,99 + 0,753 <b>E</b> + 0,8515 <b>dap</b> + 0,559 <b>Ht</b> + 0,690 <b>hc</b> - 2,2906 <b>hs</b> + 7,06 <b>Z</b> <sub>1</sub> + 10,87 <b>Z</b> <sub>2</sub> + 11,22 <b>Z</b> <sub>3</sub>	(4)
Volumen de duramen	0,12	-	81,35	$\sqrt{\mathbf{V}} = -1,4474 + 0,11391\sqrt{\mathbf{E}} + 0,32797\sqrt{\mathbf{dap}} + 0,04227\sqrt{\mathbf{hc}}$	(5)

FI: R<sup>2</sup> en unidades reales para modelos transformados.

El radio de duramen con el modelo transformado de mejor ajuste, con las variables de predicción raíz cuadrada de la edad de la plantación, del dap, de la altura total del árbol, altura de muestreo en metros y altura relativa de muestreo, logra explicar el 84% (regresión valor  $p < 0,05$ ) de la variación a distintas alturas en el árbol (modelo 2 en Tabla 6). La distribución de los errores para este modelo presentó algunos residuos fuera de la distribución, con baja significancia en la distribución (Figura 18b).

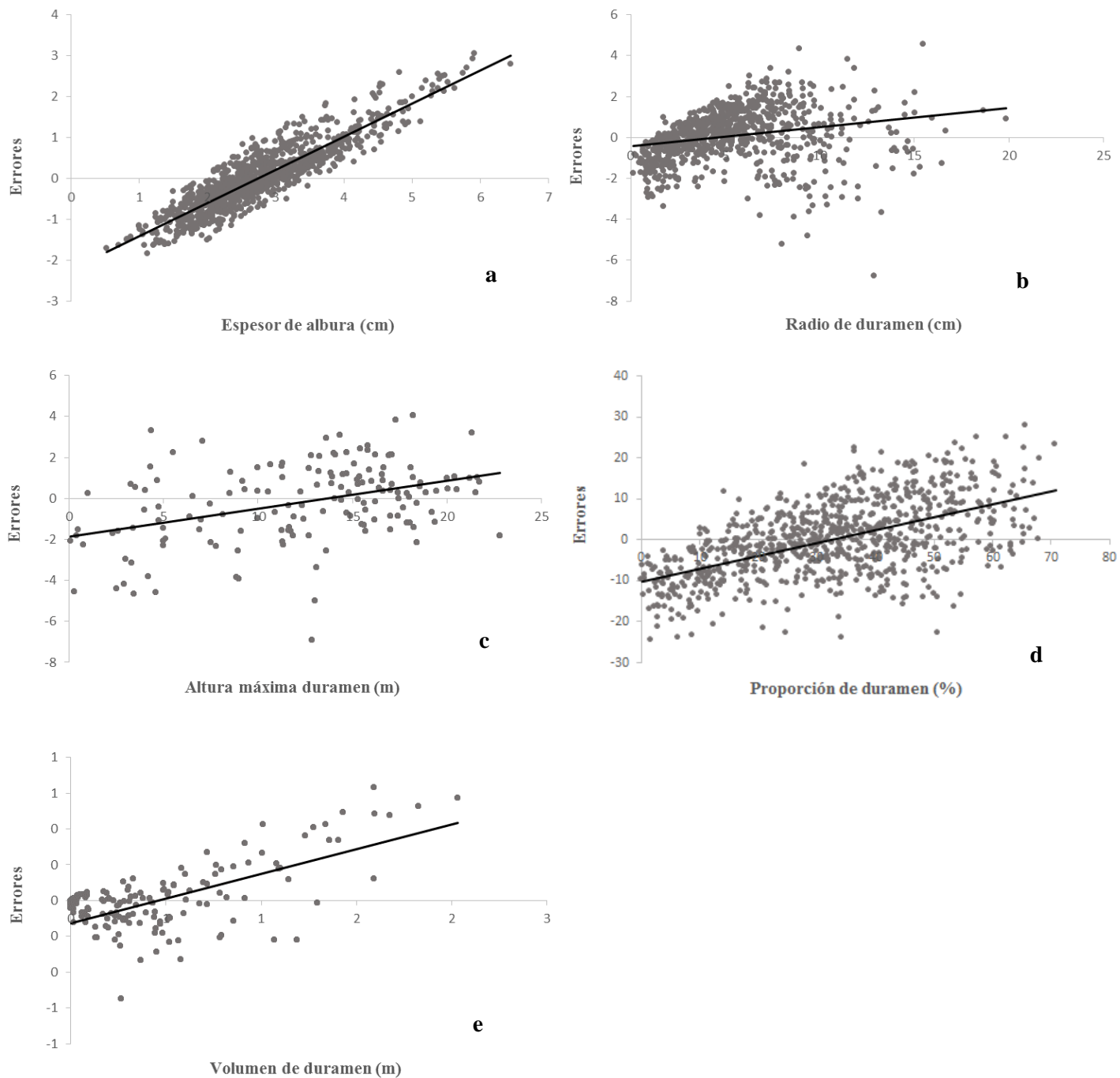


Figura 18. Distribución de los errores de los modelos de predicción de espesor de albura a distintas alturas (a), radio de duramen a distintas alturas (b), altura máxima de duramen (c), proporción de área de duramen a distintas alturas (d) y volumen de duramen (e) en árboles de *T. grandis* muestreados en plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

La altura máxima de duramen, un rasgo difícil de medir, se ajustó significativamente con las variables edad de plantación, dap, altura total y altura de copa del árbol, explicando en un 86% (regresión valor  $p < 0,05$ ) la variación de la altura de duramen (modelo 3 en Tabla 6). La distribución del error fue significativamente adecuada para este modelo (Figura 18c).

En la estimación de la proporción del área de duramen, se logró el mejor ajuste con las variables predictoras de edad de plantación, dap, altura total, altura de copa, altura en metros de muestreo y con la variable categórica de edades de plantaciones (Tabla 5). Este modelo (regresión valor  $p < 0,05$ ) explica el 68% de la variación (modelo 4 en Tabla 6), con una adecuada distribución de los errores del modelo (Figura 18d).

Finalmente, se ajustó el modelo transformado para el volumen de duramen con un 81% (regresión valor  $p < 0,05$ ) que se explica con las variables raíz cuadrada de la edad de plantación, del dap y de la altura de copa de los árboles (modelo 5 en Tabla 6). Este modelo presentó una distribución adecuada del error de los datos, sin embargo se observaron algunos fuera de la tendencia (Figura 18e).

## 6. Discusión

### 6.1. Variación de corteza y duramen en las plantaciones

El espesor de corteza tuvo tendencia decreciente significativa con la altura en metros o la altura relativa de los árboles de *T. grandis* (Figura 1a-b). Este comportamiento fue distinto, según lo observado por Pérez y Kanninen (2003), quienes encontraron que el espesor de corteza se mantuvo constante con la altura del fuste, utilizando 87 árboles de teca de Costa Rica con edades entre los 5 a 47 años. Además estos autores encontraron que la proporción de corteza disminuyó con el aumento de la edad y el dap, lo que coincide con los resultados del presente estudio. Por su parte Moya y Pérez (2008), en un estudio para plantaciones de *T. grandis* de 7 a 15 años de edad en Costa Rica, aseguran que el espesor de corteza es afectado por variables de crecimiento, lo que puede ser controlado por parámetros del suelo y manejo en la plantación. Del mismo modo Prasad y Mariswamy (2013), encontraron una relación inversamente proporcional del espesor de corteza con la edad de los árboles y el dap, pero es proporcional con la densidad de plantación, esto para una muestra de 13 árboles entre 11-36 años de edad en India, esto es congruente con lo encontrado en este estudio, el espesor de corteza es menor con el aumento de la edad y el dap.

El diámetro y proporción de duramen fue decreciente con respecto a la altura del árbol (Figura 4 y 5). Varios autores con estudios para plantaciones de distintas edades de teca en Costa Rica, reportaron valores de proporción de duramen variados: una plantación de 4 años en Los Chiles, reportó una proporción promedio de 12,9% (Solórzano, 2010); en tanto para un estudio de plantaciones entre 7 – 45 años, se reportó porcentajes entre 0,41 a 61% (Pérez y Kanninen, 2005a); mientras que en un estudio para edades entre 7 – 15 años, Moya y Pérez (2008) obtuvieron proporción de este tejido entre 10 – 60%; en el estudio de Moya et al. (2013), para una plantación de teca de 10 años, obtuvieron una proporción de duramen promedio de 38,3 % a la altura del dap, y esta propiedad presentó una tendencia significativa a crecer con el aumento del dap; Arce (2013) obtuvo en una plantación de 15 años en Peñas Blancas, Guanacaste, el diámetro promedio de duramen de 17,6 cm (proporción 56,7 %). Estos anteriores valores de proporción de duramen con coincidentes con los reportados en este estudio, entre los 0,02 a 70,05%. Por último Kokutse et al. (2004), con un estudio de plantaciones de *T. grandis* con edades entre los 6 – 70 años, en Togo, obtuvieron valores de proporción de duramen a distintas alturas de los árboles que variaron de 26,1 a 74%, tomando en cuenta que el mayor valor corresponde a la plantación de 70 años, los valores de proporción se



encuentran dentro de los reportados en este estudio. Los autores mencionados coinciden en que el diámetro o proporción de duramen aumentan con la edad de plantación, el dap y que disminuye con la altura del árbol, además que el incremento del duramen puede ser manejo por buenas prácticas silviculturales.

## ***6.2. Variación de albura a lo largo del fuste***

El espesor de albura presentó una correlación no significativa con la hs o hr en los árboles de teca de las diferentes edades (Figura 6a-b), por lo que se afirma que el espesor de albura fue uniforme en el fuste de los árboles. Este resultado es coincidente con lo afirmado por Moya, Bond y Quesada (2014), por una amplia revisión del comportamiento de duramen-albura en *T. grandis*, el espesor de albura para distintas edades de árboles se mantiene estable con la altura, variando entre 2 a 5 cm. Sin embargo, esta categoría de espesor de albura fue menor a lo encontrado en este estudio, ya que varió entre 0,53 – 6,45 cm.

Además se marcaron dos patrones de variación del espesor de albura según la edad de los árboles de teca: árboles de 2 a 10 años de edad presentaron mayor espesor de duramen y decrece en la altura del árbol; árboles entre 11 a 24 años presentaron menor espesor de albura y se mantuvo uniforme con la altura del fuste (Figura 7a-b). Estos patrones de albura pueden estar relacionados con factores de crecimiento del árbol y la diferenciación del duramen. Taylor, Gartner y Morrell (2002) en un estudio amplio de la formación de duramen, determinó que este inicia con comportamientos metabólicos y enzimáticos en la madera de albura, que desencadenan la muerte de parénquima y posterior almacenaje de extractivos que resultan en la formación del tejido de duramen. La formación del duramen es ampliamente conocida en las especies coníferas (Yang et al., 1994), mientras que para las especies tropicales es poco conocido y con gran variación (Taylor, Gartner y Morrell, 2002), y además muy limitado el conocimiento en árboles de teca de plantaciones de rápido crecimiento en estado juvenil (Moya, Bond y Quesada, 2014). No obstante, según los conceptos plasmados por Taylor, Gartner y Morrell (2002), en el presente estudio se puede afirmar que según los procesos fisiológicos regulados por el árbol para la distinción albura-duramen, los primeros años de crecimiento no se estimula la formación de duramen y se mantiene mayor espesor de albura, dado que se invierte mayor energía en los procesos de crecimiento en altura del árbol. Esto puede explicar que durante el periodo juvenil de los árboles de teca en condiciones de rápido crecimiento (árboles

con edades menores a 10 años), se presente mayor espesor de albura que en árboles de mayor edad (Figura 7a-b).

Este comportamiento fue encontrado por algunos autores, en el estudio del espesor de albura a distintas alturas. Pérez y Kanninen (2003) en un estudio de plantaciones de 5 a 47 años de teca, observaron mayor porcentaje de albura en plantaciones jóvenes, y acorde con el desarrollo del duramen se da con la edad de los árboles, la albura disminuye hasta mantenerse constante con la edad. Así mismo, Kokutse et al. (2004) con el estudio de plantaciones de teca entre 6 – 70 años, donde afirman que entre las edades de 11 a 13 años, el 30% de la superficie de la fue transformada en duramen, edades donde la presencia de madera juvenil es menor y existe mayor desarrollo del duramen (Bhat, Priya y Rugmini, 2001).

### ***6.3. Edad de formación y altura máxima de duramen***

La edad de formación del duramen en los primeros años del árbol es difícil de determinar, aun así Taylor, Gartner y Morrell (2002), en una revisión amplia de la formación del duramen, coinciden en que la formación de este tejido en especies tropicales se produce en etapas de mayor estrés en el árbol, donde hay un declive en la actividad del cambium, y este hecho puede determinar, ya sea por clima extremo o densidad de la plantación, el desarrollo del duramen. La formación temprana del duramen en árboles de teca en este estudio se presentó en árboles de 2 y 3 años (Figura 8), a la altura de la base del tronco. Estos árboles con presencia de duramen presentaron un dap promedio de 9,9 y 9,3 cm respectivamente, sin presencia de duramen a la altura del dap. Si bien existen varios estudios centrados en la formación del duramen en *T. grandis*, pocos son los que detallan la edad donde se inicia la formación del duramen. En el caso de Solórzano (2010), que estudió la característica de proporción de duramen a la altura de la base de árboles de 4 años de edad, con diámetros entre 7,5-19,2 cm, encontrando en algunos árboles desde la ausencia de duramen a esta altura, hasta árboles con un valor máximo de 49%, lo que hace suponer de presencia de madera juvenil. Por el contrario Moya, Bond y Quesada (2014), sugieren que la diferenciación entre albura- duramen se presenta entre las edades de 4 a 6 años en plantaciones de rápido crecimiento, con dap aproximado entre 6 y 10 cm. Mientras que Kokutse et al. (2004) observaron que la formación del porcentaje de duramen estuvo mayormente correlacionada con el dap, cuando los árboles fueron jóvenes, con diámetros entre los 10-20 cm alrededor de los 7 años, y por encima de 21 cm de dap el duramen se extiende más lentamente. Esta afirmación es contradictoria con los años de aparición de duramen en el

presente trabajo, en 2 y 3 años (Figura 8a-b). Contrario a los demás autores consultados (Kokutse et al., 2004; Solórzano, 2010; Moya, Bond y Quesada, 2014), el presente estudio indica que la formación de duramen se inicia a la edad de 2 años. En lo que sí coinciden los estudios con el presente estudio, es que en promedio a 10 cm de dap, inicia la formación de duramen, por lo que el desarrollo anticipado del duramen está marcado por el crecimiento acelerado de las plantaciones entre los 2 y 7 años.

Para la altura máxima de duramen se presentó una relación positiva con la edad de plantación y la altura total de los árboles (Figura 8a-b), además la altura máxima de duramen alcanzó de 0 a 90 % (0,1 a 22,8 m) del total de la altura en los árboles. Aunque son limitados los estudios de la altura máxima que alcanza el duramen en *T. grandis*, el trabajo de Leite et al. (2011a) sobre el volumen de duramen para plantaciones de teca entre los 3 a 12 años, en el Estado de Mata Grosso, Brasil, encontraron una altura de duramen promedio entre 0 a 18,7 m de altura en el fuste. Con respecto al presente trabajo se alcanzó un rango similar para las edades antes mencionadas, con altura máxima de duramen entre 0 a 18,2 m (Figura 8).

Por otro lado existe mayor cantidad de estudios para especies en zonas templadas, sobre la altura máxima de duramen que se alcanza. Yang et al. (1994) con un estudio de la variación vertical del duramen en *Cryptomeria japonica*, presentó una altura máxima de duramen promedio de 20,3 m, a la edad de 45 años. Giroud, Cloutier y Alteyrac (2008), en un estudio de la distribución vertical del duramen en árboles maduros de *Betula papyrifera*, encontraron la altura máxima relativa de duramen entre 9 y 41 % del total de altura en el árbol. Cardoso y Pereira (2017), para la especie *Pseudotsuga menziesii*, encontraron que para árboles mayores a 39 años, la altura máxima alcanzada por el duramen se presentó entre 24 y 27,5 m de altura en el fuste. Mientras que para *Pinus radiata* (Wilkes, 1991) con muestreo de árboles maduros se encontró duramen a 17,6 m de altura y en *Pinus pinaster* (Pinto, Pereira y Usenius, 2004), con edades maduras entre 42 a 83 años, el duramen fue encontrado inclusive a la altura de 20 metros y en algunas ramas. Estos autores coinciden en el aumento de la altura en la cual desaparece el duramen con la edad de los árboles, coincidiendo con los resultados encontrados en el presente trabajo en el caso de los árboles de *T. grandis*, la altura de duramen aumenta con la edad e incluso se sugiere que el duramen esté presente en las ramas de árboles (Figura 8).

También fue evaluado en este trabajo la variación de la altura máxima de duramen entre las regiones de Costa Rica donde se realizaron los muestreos de teca (Figura 9a-b). El estudio de la variación de propiedades físicas y mecánicas de teca en distintas localidades, incluyendo el crecimiento del duramen, ha mostrado que existen diferencias por cambios climáticos y condiciones de suelo que afecten la plantación (Bhat, Priya y Rugmini, 2001). Por otro lado no se encontraron autores que hayan estudiado el comportamiento de la altura máxima de duramen para *T. grandis* según la distribución de regiones climáticas. Con la amplia revisión de Moya, Bond y Quesada (2014), han deducido que para el diámetro de duramen en dap en árboles de teca, existe mayor crecimiento en sitios con una mayor estación seca, que en sitios con precipitación constante durante el año. Con este resultado y con la relación que existe de la altura máxima de duramen con el dap (Figura 10b), en este estudio la altura máxima de duramen debería en la región de PN, pero no existen diferencias significativas marcadas en cuanto a las regiones.

#### ***6.4. Relación de altura máxima de duramen con variables dasométricas del árbol***

La altura máxima de duramen presentó correlación significativa con las variables altura de copa, dap, altura total (Figura 10a, b y c) y con la altura máxima de duramen en rama (Figura 11a). Algunos estudios han encontrado relaciones entre la copa del árbol y el crecimiento del duramen en el fuste. Algunos autores (Yang et al., 1994; Pérez y Kanninen, 2003; Cardoso y Pereira, 2017) observaron que el duramen finaliza por encima de la altura de copa, en plantaciones maduras y cuando se presenta esta condición, algunas ramas cuentan con duramen que coinciden con la formación de este tejido en el eje principal (tallo). Además otro grupo de autores (Maguire y Batista, 1996; Ojansuu y Maltamo, 1995; Morataya et al., 1999; Taylor, Gartner y Morrell, 2002), relacionaron variables de altura y radio de copa con el desarrollo del duramen en el árbol, esto quiere decir que tiene que ver con el manejo de la plantación. Leite et al. (2011a) observaron una relación proporcional del volumen de duramen con el dap para árboles de teca, y como el volumen de duramen está relacionado a la altura máxima de duramen, es de considerar que exista el mismo comportamiento de que con el aumento del dap en los árboles, el duramen desaparezca a mayor altura. Por otro lado, varios autores (Yang et al., 1994; Anish et al., 2015; Cardoso y Pereira, 2017) han coincidido en que la desaparición del duramen en el fuste presenta una proporcionalidad con la altura total del árbol; es decir con el aumento de los árboles en altura, se acorta la distancia entre la desaparición del duramen y el ápice del árbol. Según la literatura consultada, se puede deducir que tanto la altura máxima de duramen, como la altura máxima de duramen en rama aumentan con el desarrollo del árbol en altura y en dap,

además con el debido manejo de la altura de copa puede incentivarse el crecimiento de la altura de duramen en el fuste.

Se presentó la variación del desarrollo de radio de duramen y altura de duramen en los árboles promedio, para las edades de 2 hasta 24 años (Figura 13). Chaix et al. (2011) encontraron que la tasa de crecimiento de la altura total y dap en árboles de teca es mayor en los primeros años, aproximadamente a los 5 años de edad de plantación, lo que puede deberse a que en este momento el metabolismo del árbol se especifica en la formación de duramen en altura y diámetro. Esto puede explicar que la formación anterior a los 5 años (Figura 13a, b y c) no se desarrolla con forme a la altura y dap del árbol, en comparación a las demás edades en el presente estudio. Además, como anteriormente ya fue mencionado en la revisión de algunos autores (Kokutse et al., 2004; Pérez y Kanninen, 2003 y 2005a; Moya y Pérez, 2008; Cardoso y Pereira, 2017), el diámetro o radio de duramen y la altura máxima de duramen aumentan con el aumento de la edad, altura total y dap de los árboles.

En este estudio se presentó una morfología cónica generaliza a lo largo de la altura de duramen a distintas edades (Figura 13). Esta conicidad fue observada en otras especies en el duramen: Yang et al. (1994) encontraron que *C. japonica* presentó el duramen en forma cónica en el tronco, donde el diámetro de duramen disminuyó con el incremento de la altura en el árbol; en el caso de Maguire y Batista (1996), presentaron modelos de conicidad para la albura a lo largo del fuste de *Pseudotsuga menziesii*, basados en el dap, altura total y altura de copa en el árbol; de igual manera para *Pinus radiata* (Wilkes, 1991), *Pinus sylvestris* (Ojansuu y Maltamo, 1995) y *Pinus canariensis* (Climent et al., 2003) presentaron el duramen con conicidad en altura del fuste. En el caso de teca, Leite et al. (2011a y 2011b) mostraron que el duramen en el fuste presenta una disminución gradual con el aumento de la altura del árbol, generando una forma volumétrica cónica, del cual desarrollaron modelos en base a altura total, dap, altura comercial y diámetro de duramen de los árboles. Warner, Jamroenprucksasri y Puangchit (2016) exponen la importancia de estos modelos de conicidad de los árboles de teca, para decisión de la optimización del manejo, además de estimar la proporción de madera con respecto a su edad de plantación y crecimiento.

### ***6.5. Volumen de duramen***

El volumen de duramen fue proporcional a la altura total, al dap y a la edad de las plantaciones muestreadas (Figura 14). Rivero y Moya (2006), observaron para una plantación de teca de 8 años, una proporción de duramen de 28%; para una plantación de 10 años, Arce (2001) encontró valores promedios de volumen de duramen de 44%; mientras que Blanco (2012) en el estudio de una plantación de teca de 13 años, se presentó una proporción media de volumen de duramen de 51,44%, con respecto al volumen del fuste sin corteza; y por último, Pérez y Kanninen (2003) encontraron un promedio de 55% para plantaciones de 30 años de edad. Con base en estos resultados se puede indicar que el volumen de duramen aumenta con la edad, altura total del árbol y dap, como se observó en el presente estudio. El volumen de duramen en plantaciones de teca, según Kokutse et al. (2004), es influenciado por la edad de plantación, las practicas silviculturales y la procedencia del individuo; además de la zona ecológica donde se desarrolle la plantación también influye en la proporción de volumen de duramen (Bhat, Priya y Rugmini, 2001).

### ***6.6. Variación del MOEd en altura y edad del árbol***

La tendencia del MOEd fue a aumentar con la edad de plantación (Figura 15). Hidayati et al. (2015) reportó para una plantación de 10 años, en la base los árboles, MOEd con diferencias significativas con respecto al material vegetativo, lo que puede influir sin importar el manejo silvicultural. Por otro lado, la diferencia más marcada se da con el aumento del MOEd a mayor edad de las plantaciones, y con diferencias significativas entre algunas regiones (Wahyudi y Arifien, 2005; Wahyudi et al., 2014a y 2014b). Así mismo, Bhat, Priya y Rugmini (2001) encontraron diferencias significativas con respecto al MOEd en tres distintas localidades, siendo la localidad con menor precipitación anual y mayor temperatura promedio la que tiene menor valor de MOEd. En el caso del presente estudio, las regiones PN y PC, presentaron una media mayor a la región ZN, esto puede deberse a la época seca más marcada durante el año que presentan las zonas PC y PN, con respecto a ZN. Además hay que tomar en cuenta que el manejo silvicultural de las plantaciones juega un papel importante en el desarrollo de esta propiedad mecánica en la teca (Izekor, Fuwape y Oluyege, 2010).

Con respecto al MOEd a distintas alturas del fuste, en el presente estudio se mostró que presenta diferencias significativas en los primeros metros con relación a las demás alturas (Figura 17). Esto

podría explicarse por la presencia de mayor proporción de duramen en los primeros metros de la troza (Leite et al., 2011a), y este gran volumen de duramen permite mayor rigidez de este tejido, con respecto a otras alturas del fuste.

### **6.7. Modelos de predicción del duramen**

La variación de los diferentes parámetros en el fuste que se observó en los árboles de *T. grandis* en este estudio demuestra que el Ea, Rd, Hd, Dp y V, son estadísticamente predecibles, con las variables medibles en el árbol: E, hs, hr, dap, Ht, hc y la variable categórica  $Z_i$  (Tabla 6).

El Ea no presentó variación a lo largo del fuste de los árboles, esto se ve reflejado en el modelo que explica un 19% de la variación a distintas alturas de medición (Tabla 6). Varios autores (Pérez y Kanninen, 2003; Prasad y Mariswamy, 2013; Moya, Bond y Quesada, 2014) coinciden que la predicción por modelación no se puede definir, por no presentar variación a lo largo del fuste, para distintas edades y alturas, coincidiendo con lo encontrado en el presente trabajo.

El Rd puede ser explicado con un 84% de su variación a lo largo del fuste, por medio de las variables E, dap, Ht, hs y hr (Tabla 6). Leite et al. (2011a) modelaron la relación en teca del diámetro de duramen, que es directamente proporcional con el radio de duramen, con las variables de dap y altura total del árbol, con hasta un 95% de explicación de la variación. Con un modelo similar, Leite et al. (2011b), explicó hasta con un 99% de explicación el diámetro de duramen, con la incorporación de las variables de diámetro con y sin corteza, dap y altura total. Leite et al. (2011a y 2011b) y Moya y Marín (2011) mostraron la relación significativa del diámetro de duramen con la Ht y su edad de plantación, además de coincidir con la disminución del duramen con la altura del árbol.

La Hd con el mejor ajuste de modelado, explicó un 86% de su variación, con la incorporación de las variables E, dap, Ht y hc (Tabla 6). No existen modelos que expliquen la variación de la altura máxima de duramen de *T. grandis*, por la escases de estudios sobre este parámetro para distintas edades, alturas y dap en el árbol (Moya, Bond y Quesada, 2014). Leite et al. (2011a) desarrollaron modelos para explicar la conicidad del duramen en teca, por lo que indirectamente trabajaron con el desarrollo del duramen hasta que llegó a un punto máximo de crecimiento en el árbol, estos modelos incorporación las variables de dap y Ht, para edades entre 3 y 12 años.

La proporción de duramen fue explicada con un 68% de variación, explicado por medio de las variables E, dap, Ht, hc, hs y  $Z_i$  (Tabla 6). Este resultado coincide con lo encontrado por Miranda, Sousa y Pereira (2011) y Kokutse et al. (2004), que se presenta una disminución de Dp con el aumento de la altura de los árboles, y un aumento de Dp con el aumento de la edad de plantación. Jayawardana y Amarasekera (2009), encontraron una correlación considerable del Dp con características propias de la altura de copa, coincidiendo con la incorporación en este trabajo de la variable hc en el modelo respectivo.

Por último, el V presentó un 81% de explicación de su variación en los árboles de teca, con las variables E, dap y hc (Tabla 6). Prasad y Mariswamy (2013) obtuvieron modelos de volumen de duramen de teca entre 11 y 36 años, incorporando solo la variable de dap con un hasta un 99% de explicación de la variable. Mientras que Pérez y Kanninen (2003), incorporando la edad del árbol y el dap, alcanzaron un 94% de explicación de las variables volumen de duramen de teca, con plantaciones entre 5-47 años. Según Viquez y Pérez (2005), el volumen de duramen esta correlacionado con el dap y Ht de los árboles, lo que quiere decir que puede ser influencia por manejo silvicultural para aumentar el desarrollo del volumen de duramen.



## 7. Conclusiones

El espesor de corteza tendió a decrecer con la altura de los árboles de *Tectona grandis*, con una variación entre 0,2 a 2,8 cm. El diámetro y proporción de duramen decreció con el aumento en altura del fuste de los árboles, hasta llegar un punto máximo de crecimiento, y variaron entre 0,3 - 39,7 cm y 0,02 – 70,79%, respectivamente.

El espesor de albura, con respecto a la altura de los árboles de *T. grandis*, varió entre 0,5 y 6,5 cm. Según la edad de plantación se observó que para los árboles de edades juveniles entre 2 a 10 años, el espesor de albura (1,2 a 6,5 cm) decrece con la altura y es mayor que los árboles de 11 a 24 años (0,5 a 4,8 cm) que se mantiene estable con la altura, esta diferencia está marcada por el crecimiento acelerado de la albura en edades juveniles, para luego dar paso al desarrollo de duramen.

Según los resultados de este estudio, la edad de formación de duramen fue entre los 2 y 3 años en plantaciones de rápido crecimiento de *T. grandis*, con un dap promedio de los árboles de 9,5 cm. Esta edad de formación del duramen se observó en la base del árbol, pero no así a la altura de dap. La formación de duramen se hizo visible a la altura del dap a partir de la edad de 4 años. La altura máxima de duramen en los árboles varió entre 0,1 - 22,8 m, para los árboles que presentaron formación de duramen. No se presentaron diferencias de la altura máxima de duramen entre las distintas regiones de Costa Rica donde se realizó el muestreo de las plantaciones.

El MOEd en este estudio varió entre 480,8 y 4779,4 MPa para las distintas alturas evaluadas de *T. grandis*. El MOEd presentó una media mayor para las regiones de Pacífico Norte, Central y Sur, con respecto a la región de Zona Norte, esto se debe a las condiciones climatológicas de las regiones. El MOEd decreció con respecto al aumento en altura de los árboles, por la presencia de mayor desarrollo de duramen en los primeros metros del fuste.

Se adecuaron los modelos de predicción para las variables de medición espesor de albura, radio de duramen, altura máxima de duramen, proporción de área de duramen y volumen de duramen para árboles de plantación de *T. grandis* entre las edades de 2 a 24 años y para todo Costa Rica. Los modelos presentaron bondades de ajuste de 19% para Ea, 84% para (Rd), 86% para Hd, 68% para DP y finalmente 81% para V, Estos modelos son importantes para el manejo adecuado de plantaciones forestales de teca.

## 8. Bibliografía

1. American Society for Testing and Materials (ASTM). (2007). ASTM D 2395-07a, Standard test methods for specific gravity of wood and wood-base materials. ASTM International, West Conshohocken, PA.
2. Anish, M. C., Anoop, E. V., Vishnu, R., Sreejith, B., y Jijeesh, C. M. (2015). Effect of growth rate on wood quality of teak (*Tectona grandis* L. f.): a comparative study of teak grown under differing site quality conditions. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 12(1), 81-88.
3. Arce, V. H. (2001). *Relación albura-duramen y características físicas de la madera de teca (Tectona grandis) en plantaciones de 10 años con dos diferentes densidades de plantación en Playa Garza Guanacaste, Costa Rica* (Doctoral dissertation, Tesis pregrado en Ingeniería Forestal. Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica).
4. Arce-Hernández, N. (2013). Determinación de propiedades generales, físicas y de color para 20 clones de *Tectona grandis* en la zona de Peñas Blancas Guanacaste, Costa Rica. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Forestal. ITCR, Cartago. p. 44.
5. Arce, N., y Moya, R. (2015). Wood characterization of adult clones of *Tectona grandis* growing in Costa Rica. *Cerne*, 21(3), 353-362.
6. Berthier, S., Kokutse, A. D., Stokes, A., y Fourcaud, T. (2001). Irregular heartwood formation in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait): consequences for biomechanical and hydraulic tree functioning. *Annals of Botany*, 87(1), 19-25.
7. Bhat, K. M., Priya, P. B., y Rugmini, P. (2001). Characterisation of juvenile wood in teak. *Wood Science and Technology*, 34(6), 517-532.
8. Bhat, K. M., y Priya, P. B. (2004). Influence of provenance variation on wood properties of teak from the Western Ghat region in India. *Iawa Journal*, 25(3), 273-282.
9. Blanco, J. (2012). Caracterização tecnológica da madeira jovem de teca (*Tectona grandis* L. f). Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira. Universidade Federal de Lavras. p. 85.
10. Camacho, M. E., Alvarado, A., y Fernández-Moya, J. (2016). *Vochysia guatemalensis* donn. smith, an alternative species for reforestation on acid tropical soils. *New Forests*, 47(4), 497-512.
11. Cardoso, S., Sousa, V. B., Quilhó, T., y Pereira, H. (2015). Anatomical variation of teakwood from unmanaged mature plantations in east Timor. *Journal of Wood Science*, 61(3), 326-333.
12. Cardoso, S., y Pereira, H. (2017). Characterization of Douglas-fir grown in Portugal: heartwood, sapwood, bark, ring width and taper. *European Journal of Forest Research*, 136(4), 597-607.

13. Carter, P., Briggs, D., Ross, R. J., y Wang, X. (2005). Acoustic testing to enhance western forest values and meet customer wood quality needs. *Productivity of western forests: A forest products focus. Gen Tech Rep PNW-GTR-642. USDA For Serv Pacific Northwest Research Station, Portland, OR*, 121-129.
14. Chaix, G., Monteuis, O., Garcia, C., Alloysius, D., Gidiman, J., Bacilieri, R., y Goh, D. K. (2011). Genetic variation in major phenotypic traits among diverse genetic origins of teak (*Tectona grandis* Lf) planted in Taliwas, Sabah, East Malaysia. *Annals of forest science*, 68(5), 1015.
15. Chazdon, R. L., Brancalion, P. H., Laestadius, L., Bennett-Curry, A., Buckingham, K., Kumar, C., ... y Wilson, S. J. (2016). When is a forest a forest? Forest concepts and definitions in the era of forest and landscape restoration. *Ambio*, 1-13.
16. Climent, J., Chambel, M. R., Gil, L., y Pardos, J. A. (2003). Vertical heartwood variation patterns and prediction of heartwood volume in *Pinus canariensis* Sm. *Forest Ecology and Management*, 174(1), 203-211.
17. Djati, I. D., Tauchi, T., Kubo, M., y Terauchi, F. (2015). Mechanical Properties and Characteristics of Young Teak for Making Products. *Bulletin of Japanese Society for the Science of Design*, 62(3), 3\_25-3\_34.
18. Dzifa, A., Stokes, A., Kuma, N., y Kokou, K. (2010). Which factors most influence heartwood distribution and radial growth in plantation teak? *Annals of Forest Science*, 67(4), 407.
19. FAO. (2002). Teak (*Tectona grandis*) in Central America. *Forest Resources Development Service, Forest Resources Division*. FAO, Rome.
20. García, H., Marques, M. L., Breda, D. H., Fardin, L., y Hissashi, F. (2011). Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for *Tectona grandis* linn. trees using artificial neural networks. *European Journal of Forest Research*, 130(2), 263-269.
21. Giroud, G., Cloutier, A., y Alteyrac, J. (2008). Occurrence, proportion, and vertical distribution of red heartwood in paper birch. *Canadian journal of forest research*, 38(7), 1996-2002.
22. Goh, D. K., Bacilieri, R., Chaix, G., y Monteuis, O. (2013). Growth variations and heritabilities of teak CSO-derived families and provenances planted in two humid tropical sites. *Tree Genetics y Genomes*, 9(5), 1329-1341.
23. Hansen, O. K., Changtragoon, S., Ponoy, B., Kjær, E. D., Finkeldey, R., Nielsen, K. B., y Graudal, L. (2015). Genetic resources of teak (*Tectona grandis* Linn. f.)—strong genetic structure among natural populations. *Tree genetics and genomes*, 11(1), 802.

24. Hegde, H. T., Kalkoor, M. A., Jha, S. K., y Thakur, N. S. (2014). Evaluation of variation in Physical properties of wood among some Tropical Tree Species of South India. *Indian Forester*, 140(1), 70-75.
25. Hidayati, F., Ishiguri, F., Iizuka, K., Makino, K., Takashima, Y., Danarto, S.,... y Yokota, S. (2013a). Variation in tree growth characteristics, stress-wave velocity, and Pilodyn penetration of 24-year-old teak (*Tectona grandis*) trees originating in 21 seed provenances planted in Indonesia. *Journal of wood science*, 59(6), 512-516.
26. Hidayati, F., Ishiguri, F., Iizuka, K., Makino, K., Tanabe, J., Marsoem, S. N., . . . y Yoshizawa, N. (2013b). Growth characteristics, stress-wave velocity, and pilodyn penetration of 15 clones of 12-year-old *Tectona grandis* trees planted at two different sites in Indonesia. *Journal of Wood Science*, 59(3), 249-254.
27. Hidayati, F., Sulistyono, J., Lukmandaru, G., Listyanto, T., Praptoyo, H., y Pujiarti, R. (2015). Physical and Mechanical Properties of 10-Year Old Superior and Conventional Teak Planted in Randublatung Central Java Indonesia. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*, 13(1), 11-21.
28. Huang, G. H., Liang, K. N., Zhou, Z. Z., Xu, J. M., y Ma, H. M. (2015). Genetic variation and origin of teak (*Tectona grandis* Lf) native and introduced provenances. *Silvae Genetica*, 64(1-6), 33-46.
29. Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2017). Datos climatológicos. San José, Costa Rica. Fecha de revisión: 23 de octubre 2017. <https://www.imn.ac.cr/web/imn/inicio>.
30. Isotupa, O., y Tyynelä, T. (2010). Growing cloned teak seedlings for small-scale farmers in Costa Rica. *Small-Scale Forestry*, 9(3), 263-279.
31. Izeke, D. N., Fuwape, J. A., y Oluyeye, A. O. (2010). Effects of density on variations in the mechanical properties of plantation grown *Tectona grandis* wood. *Archives of Applied Science Research*, 2(6), 113-120.
32. Jayawardana, D. N., y Amarasekera, H. S. (2009). Effect of growth rate on wood quality of teak (*Tectona grandis* Lf) plantations at Malsiripura, Kurunegala, Sri Lanka. *Vidyodaya J Humanities Soc Sci (Golden Jubilee Issue)*, 149-170.
33. Kokutse, A. D., Bailleres, H., Stokes, A., y Kokou, K. (2004). Proportion and quality of heartwood in Togolese teak (*Tectona grandis* Lf). *Forest Ecology and Management*, 189(1), 37-48.
34. Kokutse, A. D., Stokes, A., Kokutse, N. K., y Kokou, K. (2010). Which factors most influence heartwood distribution and radial growth in plantation teak?. *Annals of forest science*, 67(4), 407.

35. Koskela, J., Vinceti, B., Dvorak, W., Bush, D., Dawson, I. K., Loo, J.,... y Jamnadass, R. (2014). Utilization and transfer of forest genetic resources: a global review. *Forest ecology and management*, 333, 22-34.
36. Kumar, A., y Dhillon, G. P. S. (2015). Variation of sapwood and heartwood content in half-sib progenies of *Eucalyptus tereticornis* Sm. *Indian Journal of Natural Products and Resources (IJNPR) [Formerly Natural Product Radiance (NPR)]*, 5(4), 338-344.
37. Kuprevicius, A., Auty, D., Achim, A., y Caspersen, J. P. (2013). Quantifying the influence of live crown ratio on the mechanical properties of clear wood. *Forestry*, 86(3), 361-369.
38. Leite, H. G., Oliveira-Neto, R. R. D., Monte, M. A., Fardin, L., Alcantara, A. M. D., Binoti, M. L. M. D. S., y Castro, R. V. O. (2011a). Modelo de afilamento de cerne de *Tectona grandis* Lf. *Scientia Forestales*, 39(89), 53-59.
39. Leite, H. G., da Silva, M. L. M., Binoti, D. H. B., Fardin, L., y Takizawa, F. H. (2011b). Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for *Tectona grandis* Linn. trees using artificial neural networks. *European Journal of Forest Research*, 130(2), 263-269.
40. Lourenço, A., Neiva, D. M., Gominho, J., Marques, A. V., y Pereira, H. (2015). Characterization of lignin in heartwood, sapwood and bark from *Tectona grandis* using Py-GC-MS/FID. *Wood Science and Technology*, 49(1), 159-175.
41. Maguire, D. A., y Batista, J. L. (1996). Sapwood taper models and implied sapwood volume and foliage profiles for coastal Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research*, 26(5), 849-863.
42. Managave, S. R., Sheshshayee, M. S., Bhattacharyya, A., y Ramesh, R. (2011). Intra-annual variations of teak cellulose  $\delta^{18}O$  in Kerala, India: implications to the reconstruction of past summer and winter monsoon rains. *Climate dynamics*, 37(3-4), 555-567.
43. Manson, D. G., Schmidt, S., Bristow, M., Erskine, P. D., y Vanclay, J. K. (2013). Species-site matching in mixed species plantations of native trees in tropical Australia. *Agroforestry Systems*, 87(1), 233-250.
44. Mehtätalo, L., de-Miguel, S., y Gregoire, T. G. (2015). Modeling height-diameter curves for prediction. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(7), 826-837.
45. Miranda, I., Sousa, V., y Pereira, H. (2011). Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. *Journal of Wood Science*, 57(3), 171-178.
46. Morataya, R., Galloway, G., Berninger, F., y Kanninen, M. (1999). Foliage biomass-sapwood (area and volume) relationships of *Tectona grandis* LF and *Gmelina arborea* Roxb.: silvicultural implications. *Forest Ecology and Management*, 113(2), 231-239.

47. Moya, R., y Calvo-Alvarado, J. (2012). Variation of wood color parameters of *Tectona grandis* and its relationship with physical environmental factors. *Annals of Forest Science*, 69(8), 947-959.
48. Moya, R., y Berrocal, A. (2010). Wood colour variation in sapwood and heartwood of young trees of *Tectona grandis* and its relationship with plantation characteristics, site, and decay resistance. *Annals of Forest Science*, 67(1), 109.
49. 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*, 48(2), 411-433. doi:10.1007/s00226-014-0618-3
50. Moya, R., y Marín, J. D. (2011). Grouping of *Tectona grandis* (lf) clones using wood color and stiffness. *New Forests*, 42(3), 329-345.
51. Moya, R., Marín, J., Murillo, O., y Leandro, L. (2013). Wood physical properties, color, decay resistance and stiffness in *Tectona grandis* clones with evidence of genetic control. *Silvae Genetica*, 62(3), 142-152.
52. Moya, R., y Pérez, D. (2008). Effects of physical and chemical soil properties on physical wood characteristics of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science*, 248-257.
53. Niamké, F. B., Amusant, N., Charpentier, J., Chaix, G., Baissac, Y., Boutahar, N., . . . y Jay-Allemand, C. (2011). Relationships between biochemical attributes (non-structural carbohydrates and phenolics) and natural durability against fungi in dry teak wood (*Tectona grandis* L. f.). *Annals of Forest Science*, 68(1), 201-211.
54. Nocetti, M., Rozenberg, P., Chaix, G., y Macchioni, N. (2011). Provenance effect on the ring structure of teak (*Tectona grandis* lf) wood by X-ray microdensitometry. *Annals of Forest Science*, 68(8), 1375-1383.
55. Ojansuu, R., y Maltamo, M. (1995). Sapwood and heartwood taper in Scots pine stems. *Canadian journal of forest research*, 25(12), 1928-1943.
56. Pawson, S., Brin, A., Brockerhoff, E., Lamb, D., Payn, T., Paquette, A., y Parrotta, J. (2013). Plantation forests, climate change and biodiversity. *Biodiversity and Conservation*, 22(5), 1203-1227.
57. Pérez, L. D., y Kanninen, M. (2003). Heartwood, sapwood and bark content, and wood dry density of young and mature teak (*Tectona grandis*) trees grown in Costa Rica. *Silva Fennica*, 37(1), 45-54.

58. Pérez, D., y Kanninen, M. (2005). Effect of thinning on stem form and wood characteristics of teak (*Tectona grandis*) in a humid tropical site in Costa Rica. *Silva Fennica*, 39(2), 217-225.
59. Pinto, I., Pereira, H., y Usenius, A. (2004). Heartwood and sapwood development within maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stems. *Trees*, 18(3), 284-294.
60. Piotto, D., Craven, D., Montagnini, F., y Alice, F. (2010). Silvicultural and economic aspects of pure and mixed native tree species plantations on degraded pasturelands in humid Costa Rica. *New Forests*, 39(3), 369-385.
61. Pothier, D., Fortin, M., Auty, D., Delisle-Boulianne, S., Gagné, L. V., y Achim, A. (2013). Improving tree selection for partial cutting through joint probability modelling of tree vigor and quality. *Canadian Journal of Forest Research*, 43(3), 288-298.
62. Prasad, V., y Mariswamy, K. (2013). Heartwood, sapwood and bark content of teak trees grown in Karnataka, India. *Journal of Forestry Research*, 24(4), 721-725.
63. Prasad, V., Álvarez-González, J. G., y García, O. (2014). Developing a dynamic growth model for teak plantations in India. *Forest Ecosystems*, 1(1), 1-10.
64. Rivero, J., y Moya, R. (2006). Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F. (teca), proveniente de una plantación de ocho años de edad en Cochabamba, Bolivia. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 3(9), 50-63.
65. Sandewall, M., Ohlsson, B., Sandewall, R. K., y Viet, L. S. (2010). The expansion of farm-based plantation forestry in Vietnam. *Ambio*, 39(8), 567-579.
66. Serrano, R., Moya, R., Berrocal, A., Trejos, G. G., y Foglia, R. C. (2015). General, physical and mechanical properties, termites resistance and drying defects of lumber of *Tectona grandis* from plantations of different climatic and sites fertility condition. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 12(1), 63-73.
67. Shukla, S., Rao, R., Shashikala, S., Kumar, P., y Sharma, S. (2011). Wood quality variation in *Tectona grandis* (teak) clones from CSO raised at Maredumilli (Rajahmundry), Andhra Pradesh. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 8(2), 116-119.
68. Sivaram, M., y Gopinathan, K. (2013). Hedonic price analysis of teak logs. *Small-Scale Forestry*, 12(4), 597-609.
69. Solano, J., y Villalobos, R. (2000). Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica. *San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional*.
70. Solórzano, S. (2010). Evaluación a los 4 años de edad de variables dasométricas, calidad del fuste y propiedades de la madera en clones de *Tectona grandis* L., Los Chiles, Costa Rica. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Forestal. ITCR, Cartago. p. 82.

71. Solórzano, S., Moya, R., y Murillo, O. (2012). Early prediction of basic density, shrinking, presence of growth stress, and dynamic elastic modulus based on the morphological tree parameters of *Tectona grandis*. *Journal of Wood Science*, 58(4), 290-299.
72. Somarriba, E., Suárez-Islas, A., Calero-Borge, W., Villota, A., Castillo, C., Vílchez, S., . . . y Cerda, R. (2014). Cocoa–timber agroforestry systems: *Theobroma cacao*–*Cordia alliodora* in Central America. *Agroforestry Systems*, 88(6), 1001-1019.
73. Sousa, V. B., Cardoso, S., Quilhó, T., y Pereira, H. (2012). Growth rate and ring width variability of teak, *Tectona grandis* (Verbenaceae) in an unmanaged forest in East Timor. *Revista de Biología Tropical*, 60(1), 483-494.
74. Steffenrem, A., Kvaalen, H., Dalen, K. S., y Høibø, O. A. (2014). A high-throughput X-ray-based method for measurements of relative wood density from unprepared increment cores from *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 29(5), 506-514.
75. Tavares, F., Louzada, J. L., y Pereira, H. (2014). Variation in wood density and ring width in *Acacia melanoxylon* at four sites in Portugal. *European journal of forest research*, 133(1), 31-39.
76. Taylor, A. M., Gartner, B. L., y Morrell, J. J. (2002). Heartwood formation and natural durability—a review. *Wood and fiber science*, 34(4), 587-611.
77. Tewari, V. P., y Mariswamy, K. M. (2013). Heartwood, sapwood and bark content of teak trees grown in Karnataka, India. *Journal of forestry research*, 24(4), 721-725.
78. Thulasidas, P. K., y Bhat, K. M. (2012). Mechanical properties and wood structure characteristics of 35-year old home-garden teak from wet and dry localities of Kerala, India in comparison with plantation teak. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 9(1), 23-32.
79. Tondjo, K., Brancheriau, L., Sabatier, S., Kokutse, A. D., Akossou, A., Kokou, K., y Fourcaud, T. (2015). Is the variability of key wood properties linked with the variability of key architectural traits? case of planted teak in Togo regarding thinning and provenance. *Annals of Forest Science*, 72(6), 717-729.
80. Torres, D. A., del Valle, J. I., y Restrepo, G. (2012). Site index for teak in Colombia. *Journal of Forestry Research*, 23(3), 405-411.
81. Ugulino, B., Latorraca, J. d. F., y Tomazello Filho, M. (2014). Tree-ring growth response of teak (*Tectona grandis* Lf) to climatic variables in central-west region of Brazil. *Scientia Forestalis*, 42(104), 473-482.
82. Vallejos, J., Moya, R., y Serrano, R. (2015). Effects of thinning on diameter, heartwood, density and drying defects of *Gmelina arborea*. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 17(2), 365-372.



83. Venegas-González, A., von Arx, G., Chagas, M. P., y Tomazello Filho, M. (2015). Plasticity in xylem anatomical traits of two tropical species in response to intra-seasonal climate variability. *Trees*, 29(2), 423-435.
84. Vihervaara, P., Marjokorpi, A., Kumpula, T., Walls, M., y Kamppinen, M. (2012). Ecosystem services of fast-growing tree plantations: a case study on integrating social valuations with land-use changes in Uruguay. *Forest Policy and Economics*, 14(1), 58-68.
85. Viquez, E., y Pérez, D. (2005). Effect of pruning on tree growth, yield, and wood properties of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Silva Fennica*, 39(3), 381.
86. Wahyudi, I., y Arifien, A. F. (2005). Perbandingan struktur anatomi, sifat fisis dan sifat mekanis kayu jati unggul dan kayu jati konvensional. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*, 3(2), 53-59.
87. Wahyudi, I., Priadi, T., y Rahayu, I. S. (2014a). Karakteristik dan sifat-sifat dasar kayu Jati Unggul umur 4 dan 5 tahun asal Jawa Barat. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 19(1), 50-56.
88. Wahyudi, I., Sinaga, D. K. D., y Jasni, L. B. (2014b). Pengaruh jarak tanam terhadap pertumbuhan pohon dan beberapa sifat fisis-mekanis kayu jati cepat tumbuh. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 19(3), 204-210.
89. Warner, A. J., Jamroenprucksakul, M., y Puangchit, L. (2016). Development and evaluation of teak (*Tectona grandis* Lf) taper equations in northern Thailand. *Agriculture and Natural Resources*, 50(5), 362-367.
90. Wilkes, J. (1991). Heartwood development and its relationship to growth in *Pinus radiata*. *Wood Science and Technology*, 25(2), 85-90.
91. Yang, K. C., Chen, Y. S., Chiu, C., y Hazenberg, G. (1994). Formation and vertical distribution of sapwood and heartwood in *Cryptomeria japonica* D. Don. *Trees-Structure and Function*, 9(1), 35-40.
92. Yeboah, D., Burton, A. J., Storer, A. J., y Opuni-Frimpong, E. (2014). Variation in wood density and carbon content of tropical plantation tree species from Ghana. *New Forests*, 45(1), 35-52.
93. Zheng, J., y Martínez-Cabrera, H. I. (2013). Wood anatomical correlates with theoretical conductivity and wood density across China: evolutionary evidence of the functional differentiation of axial and radial parenchyma. *Annals of botany*, mct153.
94. Zhu, J., Shi, Y., Fang, L., Liu, X., y Ji, C. (2015). Patterns and determinants of wood physical and mechanical properties across major tree species in China. *Science China Life Sciences*, 58(6), 602-612.