

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN

DIRECCIÓN DE PROYECTOS

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INNOVACIÓN FORESTAL

**INFORME FINAL DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**MODELAJE DEL PORCENTAJE DE DURAMEN, MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO  
Y DENSIDAD DE PLANTACIONES FORESTALES DE *Tectona grandis* L.f. DE RÁPIDO  
CRECIMIENTO ESTABLECIDAS EN COSTA RICA  
Código: 1401063**

**(DOCUMENTO I)**

**INVESTIGADORES:**

*Ing. Alexander Berrocal J. Dr.*  
*Ing. Roger Moya R. Dr.*  
*M.Sc. Johanna Gaitán Álvarez*

Junio, 2017

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
1. Intrducción .....	4
2. Artículo 1. Heartwood formation and prediction of heartwood parameters in <i>Tectona grandis</i> L.f. trees growing in forest plantations in Costa Rica.....	9
3. Artículo 2. Modelos de predicción de la altura máxima, diámetro, volumen y trozas con duramen en árboles de <i>Tectona grandis</i> creciendo en plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica. ....	28
4. Artículo 3. Development of heartwood, sapwood, bark, pith, specific gravity and dynamic modulus of elasticity of teak ( <i>Tectona grandis</i> ) in fast-growth plantations in Costa Rica.....	55
Artículo 4. Evaluación del perfil de densidad de la madera usando densitometría de rayos-X en árboles de <i>Tectona grandis</i> creciendo en plantaciones de rápido crecimiento: variación con la edad del árbol, entre y dentro de anillos anuales, límite de los anillos anuales y límite entre albura y duramen.....	78

## Resumen general

La madera de duramen es la parte más importante del árbol en *Tectona grandis* L.f. Aunque existen varios modelos de predicción de volumen total (albura y duramen) en esta especie, no existen modelos de predicción de duramen únicamente. El objetivo del presente trabajo fue desarrollar modelos matemáticos para predecir la altura máxima del duramen (HW<sub>h</sub>), el diámetro (HW<sub>diameter</sub>), porcentaje (HW<sub>percentage</sub>), volumen y cantidad de trozas comerciales con duramen, de árboles de *T. grandis* de plantaciones de rápido crecimiento, utilizando variables de fácil medición como diámetro a la altura de pecho (DBH), altura total (Ht) y edad. Diferentes modelos fueron utilizados para establecer las ecuaciones de los parámetros del duramen con las variables predictoras. Se muestrearon en total 54 plantaciones en cinco regiones de Costa Rica, seleccionando 3 árboles por plantación. Los modelos seleccionados para predecir el HW<sub>h</sub>, HW<sub>diameter</sub> y para el volumen de duramen incluyen el DBH y la Ht en los modelos. Para HW<sub>h</sub> y volumen el modelo propuesto es  $Y = \beta_1 + \beta_2 * Ht + \beta_4 * DBH$  con coeficientes de correlación de  $R = 0.85$  y  $0.75$  respectivamente y la ecuación del perfil del fuste para determinar los diferentes HW<sub>diameter</sub> fue  $diHW^2DBH^2 = -1.56 * (hiHt - 1) + 0.90 * (hi^2Ht^2 - 1)$ , con  $R = 0.96$ . En relación a la cantidad de trozas con duramen (diámetro mínimo de 7 cm) y la cantidad de trozas varía de 1, en árboles de 12 a 14 cm al DBH a 8 en diámetro de 40-45 cm al DBH.

## 1. Introducción

---

La teca (*Tectona grandis* L.f) es la especie tropical de mayor importancia en los climas tropicales para la reforestación comercial (Moya et al., 2014). Esta especie es originaria del sureste asiático específicamente de la India, Laos, Myanmar y Tailandia (Gyi & Tint 1998; Pandey & Brown, 2000). Sus plantaciones se han expandido ampliamente a las zonas tropicales de América Latina, Asia, África y Oceanía (Ball et al., 1999 FAO, 2006) y es de considerable importancia comercial dentro de Costa Rica (Pérez y Kaninnen, 2005a; Moya, 2002) y otros países de esta región. En el último tiempo ha sido identificada como una especie con potencial para producir madera de alta calidad (Bhat, 2000; Bhat *et al*, 2001), esto debido a sus propiedades superiores (Moya y Pérez, 2008) y su color que la favorecen dentro del mercado (Tewari, 1999; Thulasidas *et al*, 2006; Zobel y Sprague, 1998)

Por otra parte, la presencia de una relativa alta proporción de duramen en los árboles de teca, hacen que sea una especie excelente para la industria del aserrío y elaboración de productos de mayor valor agregado (Hegde et al., 2014). Por tanto, el duramen presente en los árboles de *T. grandis* representa la parte del tronco más valiosa para su comercialización (Lourenço et al., 2015).

Así mismo, otra propiedad que está 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.

Finalmente de las propiedades ampliamente estudiadas en teca, pero que es altamente relevante, es la densidad; ya que este parámetro es una medida indirecta de otras propiedades (Sinha et al., 2017); que se relacionan con la anatomía de la madera (Zobel y Van Buitjen 1989). La densidad de teca se caracteriza por ser sumamente variable, en especial en la madera proveniente de plantaciones de rápido crecimiento (Moya et al., 2014). Por lo que las variaciones del perfil de densidad en este tipo de árboles deben ser

adecuadamente establecidos para las diferentes condiciones de crecimiento en las nuevas áreas de reforestación.

Basados en lo anterior, el objetivo de este estudio fue modelar la variación del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad dinámico y perfiles de densidad de árboles de *Tectona grandis* de plantaciones forestales de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica.

El estudio se realizó en distintas zonas de Costa Rica y fueron muestreadas un total de 54 plantaciones con edades entre 2 y 24 años. De cada plantación se extrajeron 3 árboles, para un total de 162 árboles provenientes de diferentes edades, procedencias, sitios y manejo silvicultural. Diferentes análisis para evaluar y caracterizar el volumen, el MOEd y los perfiles de densidad por edad, por sitio y por altura fueron realizados.

Los resultados mostraron que el ancho de albura es mayor entre los 2 y 10 años que entre los 10-22 años. El duramen comienza a aparecer en la parte basal de los árboles entre los 2 y 3 años, pero no aparece al dap (diámetro a la altura del pecho) hasta los 3 a 4 años de edad. El duramen desaparece a un rango de altura entre el 0 a 90 % de la altura total, dependiendo de la edad del árbol. Finalmente modelos de predicción fueron desarrollados para el espesor de albura, radio de duramen, altura máxima del duramen, porcentaje y volumen de duramen utilizando el modelo  $Y = K_0 + K_1 \cdot (\text{espesor de albura}) + K_2 \cdot (\text{altura relativa}) + K_3 \cdot (\text{dap}) + K_4 \cdot (\text{edad del árbol})$ . Estos modelos mostraron coeficientes de 70 %, 90 %, 95 %, 73 % y 31 %, respectivamente.

Los modelos seleccionados para predecir la altura de duramen, diámetro de duramen y para el volumen de duramen incluyen el dap y la altura total en los modelos. Para la altura de duramen y volumen el modelo propuesto es  $Y = \beta_1 + \beta_2 \cdot H_t + \beta_4 \cdot DBH$  con coeficientes de correlación de  $R=0.85$  y  $0.75$  respectivamente y la ecuación del perfil del fuste para determinar los diferentes diámetros de duramen fue  $\frac{diHW^2}{DBH^2} = -1.56 * \left(\frac{hi}{H_t} - 1\right) + 0.90 * \left(\frac{hi^2}{H_t^2} - 1\right)$  con  $R=0.96$ . En relación a la cantidad de trozas con duramen (diámetro mínimo de 7 cm), la cantidad de trozas varía de 1 en árboles con un dap entre 12 a 14 cm, hasta 8 en árboles de 40-45 cm de dap.

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

La región donde las plantaciones crecieron no mostró efecto en el dap, altura total, diámetro de duramen y de médula y espesor de albura y de corteza. La edad y la densidad de rodal mostraron correlación estadísticamente significativa con el dap y la altura total del árbol. El duramen comienza a desarrollarse a los 4 años de edad y su proporción incrementa con la edad. La proporción de corteza permanece constante a lo largo del árbol, mientras que el porcentaje de corteza incrementa en árboles antiguos y a mayores alturas. El diámetro de corteza y el módulo de estabilidad dinámico (MOEd), medido para los árboles en pie, no mostraron correlación con la edad, mientras que el peso específico presentó una correlación positiva con la edad.

Finalmente, en el estudio se encontró que el perfil de densidad de la madera muestra un comportamiento creciente de la densidad con respecto a la edad del árbol. En la marcación de los anillos de crecimiento se establecieron 5 tipos de perfiles de densidad a través del anillo anual. Además se encontró que los árboles con edades inferiores a 8 años o en la parte interna de los árboles, el perfil de densidad de la madera no mostró adecuadamente el límite del anillo de crecimiento; por lo que en esta condición se debe complementar la identificación de los anillos con una preparación visual. En árboles adultos, el perfil de densidad de la madera sí mostró la marcación de los anillos de crecimiento, no obstante si se acompaña con una identificación visual es más acertada la marcación de los anillos. Entonces el estudio dendrocronológicos de estos árboles debe ser una combinación de densitometría rayos-X con una identificación visual. En relación con el límite entre albura y duramen, el perfil de densidad de la madera mostró un descenso de la densidad de la madera en esta sección, sin embargo no es una técnica apropiada para su uso como indicador de esta zona, debido a la variabilidad existente.

En relación a los principales logros obtenidos en este proyecto se pueden mencionar:

1. Una tesis del programa de Maestría en Ciencias Forestales titulada: “Modelado de parámetros de albura y duramen en árboles de *Tectona grandis* L.f. en plantaciones forestales de distintas edades en Costa Rica” del estudiante David Fernández Solís que fue aprobada el día lunes 16 de abril de 2018.

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

2. Cuatro artículos científicos, uno de los cuales ya fue publicado (Revista Bois et Forests des Tropiques), otro fue aceptado con modificaciones (Revista Journal of Forestry Research), uno fue sometido (Revista Annals Forest Research) y uno está en edición para ser sometido a la Revista Dendrochronologia.

A partir de los resultados generados surgen algunas interrogantes que deberían ser abordadas a través de estudios posteriores en la misma línea:

- a) Ampliar el número de unidades de muestreo en las regiones, idealmente en la Zona Norte, con el fin de abordar el estudio de duramen, resistencia mecánica y perfiles de densidad por zonas de crecimiento y su relación con los datos obtenidos a nivel nacional.
- b) Profundizar en el estudio de la relación entre la altura de la última rama con formación de duramen y la altura máxima del fuste donde se observa madera de duramen, con el fin de crear un indicador que permita caracterizar la calidad de plantaciones forestales, donde el volumen de duramen es muy relevante.
- c) Ahondar el estudio de los perfiles de densidad de la madera, técnica que permitiría generar un mayor conocimiento de las propiedades fisicomécnicas de la madera de teca con un nivel de detalle mayor que las técnicas tradicionales, considerando el hecho que la densidad es un excelente predictor de otras tantas propiedades físicas y mecánicas de la madera.

Finalmente, con respecto a los beneficios inmediatos y futuros de los resultados obtenidos se debe destacar:

- a) Un incremento en el acervo de información de teca disponible a nivel nacional, con información relevante de plantaciones de rápido crecimiento en diferentes zonas del país, con posibilidad de ser utilizada a nivel regional en materia de modelación del duramen, MOEd y perfiles de densidad

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

- b) Un aporte significativo la productividad académica de la Escuela de Ingeniería Forestal y del Instituto Tecnológico de Costa Rica, a través de cuatro publicaciones en índices superiores (Scopus y Web of Science).
- c) Haber generado modelos matemáticos para diferentes variables tales como espesor de duramen, volumen de duramen, diámetro de duramen, espesor de albura, espesor de corteza, espesor de médula, MOEd, peso específico entre otros, que contribuyen al manejo de plantaciones forestales de rápido crecimiento de teca. Mención especial es para el modelo predictor del diámetro de duramen, que tendría una aplicación práctica relevante por la forma en que se cuantifica y comercializa la madera en el país.
- d) Contar con una base científica adecuada para futuros relacionados con los temas abordados en el proyecto, de tal forma que pueda incrementarse la información de propiedades de la madera de teca proveniente de plantaciones de rápido crecimiento, incrementando de esta forma la información existente a nivel nacional e internacional para esta especie forestal tan relevante a nivel mundial.

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**



**2. Artículo 1. Heartwood formation and prediction of heartwood parameters in *Tectona grandis* L.f. trees growing in forest plantations in Costa Rica.**

---

**HEARTWOOD FORMATION AND PREDICTION OF HEARTWOOD PARAMETERS IN  
*Tectona grandis* L.f. TREES GROWING IN FOREST PLANTATIONS IN COSTA RICA**

**David FERNÁNDEZ-SÓLIS**

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [davfersolis@yahoo.com](mailto:davfersolis@yahoo.com)

**Alexander BERROCAL**

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [aberrocal@itcr.ac.cr](mailto:aberrocal@itcr.ac.cr)

**Róger MOYA\***

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [rmoya@itcr.ac.cr](mailto:rmoya@itcr.ac.cr)

\*Authors correspondence, Email: [rmoya@itcr.ac.cr](mailto:rmoya@itcr.ac.cr)

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

## **Heartwood formation and prediction of heartwood parameters in *Tectona grandis* L.f. trees growing in forest plantations in Costa Rica**

### **Abstract**

The aim of this work is to establish heartwood variations (percentage, diameter, radius, volume) in relation to tree height and sapwood thickness. In addition, the age at which heartwood formation begins and the maximum heartwood height in *Tectona grandis* trees were studied. Statistical prediction models were also produced for sapwood thickness, heartwood radius, maximum heartwood height, heartwood proportion and heartwood volume. Sixteen plantations from different zones of Costa Rica, with ages ranging between 2 and 22 years, were sampled. The results showed that sapwood thickness is thicker at 2-10 years than at 10-22 years of age. Heartwood begins to appear at the basal part of trees at 2 and 3 years of age but does not appear at breast height until 3 to 4 years of age. The heartwood disappears at a height ranging from 0 to 90 % of the total height, depending on the age of the tree. Finally, prediction models were developed for sapwood thickness, heartwood radius, maximum heartwood height, heartwood percentage and heartwood volume utilizing the model  $Y = K_0 + K_1(\text{sapwood thickness}) + K_2(\text{relative sampling height}) + K_3(\text{diameter at breast height}) + K_4(\text{tree age})$ . Those models showed determination coefficients of 70 %, 90 %, 95 %, 73 % and 31 %, respectively.

**Key words:** heartwood, sapwood, *Tectona grandis*, vertical variation, prediction models.

### **Abbreviations**

HWrh: relative height where the heartwood disappears

H<sub>HW</sub>: maximum heartwood height

DBH: diameter at breast height

HW<sub>percentage</sub>: percentage of heartwood

SWT: sapwood thickness

SWT<sub>2.3</sub>: sapwood thickness at 2.3 m height.

HW<sub>diameter</sub>: heartwood diameter

HW<sub>radius</sub>: heartwood radius

HW<sub>volume</sub>: heartwood volume

### **Introduction**

*Tectona grandis* L.f. grows naturally in India, Myanmar, Laos and Thailand, and its wood is highly valuable in the international market (Minn *et al.*, 2014). In other regions of the tropical zones in countries of Africa, Central America and South America (Koskela *et al.*, 2014), it was introduced as part of fast-growth forest plantations for small-diameter log production. *T. grandis* timber coming from plantations has been widely studied, mainly regarding silvicultural development and genetic improvement programs and their effects on wood properties (Moya *et al.*, 2014).

*T. grandis* heartwood represents the most commercially valuable wood of the trunk due to its color, durability and resistance (Lourenço *et al.*, 2015), which give it great salability in the timber market. Hegde *et al.* (2014) stress that its high proportion of heartwood and proportionally low sapwood at different tree heights make *T. grandis* an excellent species for

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

the timber sawing industry. For this reason, many studies have investigated heartwood formation during the growth of the tree (Moya *et al.*, 2014). For example, Miranda *et al.* (2011), Kumar and Dhillon (2015), Anish *et al.* (2015), and Galeano *et al.* (2015) observed a decrease in the diameter and proportion of heartwood as the total tree height increases. García *et al.* (2011a and 2011b) developed a prediction model that relates the variation of heartwood diameter to total tree height and to the diameter at breast height (DBH) for 2- to 14-year-old plantations of *T. grandis*.

Other investigations have determined the variation of the percentage of heartwood ( $HW_{\text{percentage}}$ ) with management conditions and DBH, among other morphological parameters of the tree. For example, Serrano *et al.* (2015) and Arce and Moya (2015) show that different site and climatic conditions, soil fertility and management of the plantation affect sapwood thickness (SWT) and  $HW_{\text{percentage}}$  at DBH. Thulasidas and Bhat (2009) found great differences in  $HW_{\text{percentage}}$  and heartwood diameter ( $HW_{\text{diameter}}$ ) between wet and dry sites in India, with the wet sites presenting larger heartwood diameters. In contrast, Pérez and Kanninen (2003) and Crespo *et al.* (2008) reported, for studies conducted in Costa Rica and Ecuador, respectively, significantly greater  $HW_{\text{diameter}}$  in plantations growing at dry sites.

Moya *et al.* (2014) mentioned that heartwood formation is affected by variables such as DBH, age of the tree and total tree height. On the other hand, studies by Pâques and Charpentier (2015), Nocetti *et al.* (2015) and Kennedy *et al.* (2014) found that SWT varies slightly, and this variable is little affected by tree morphology (height or diameter), growing conditions or types of wood. Based on this theory, the authors expect that through statistical methods, it is possible to estimate the heartwood parameters at a specific height, considering SWT, diameter at a specific height and age of the tree.

As mentioned,  $HW_{\text{diameter}}$  is a feature correlated to tree age and total height of the tree (Knapic *et al.*, 2014). Zhang and Jiang (2015) established a model of the variation of  $HW_{\text{diameter}}$ , considering the tree age and height accurately and precisely. Miranda, Gominho and Pereira (2015) carried out some estimations for predicting  $HW_{\text{diameter}}$  and maximum heartwood height in *Eucalyptus globulus* trees and developed a model involving DBH and total height of tree.

In the specific case of *T. grandis* heartwood, there are various models to estimate  $HW_{\text{diameter}}$  based on DBH (Pérez and Kanninen, 2003; Okuyama *et al.*, 2005; García *et al.*, 2011a and 2011b); however, these models are restricted to tree age, and only DBH is used. Therefore, there are no models to predict these features in standing trees while considering multiple factors such as tree age, DBH, total tree height, and SWT, among other types of variables affecting heartwood development.

Thus, this work focuses on the characterization and prediction of variables related to heartwood in *T. grandis* L.f. trees growing in fast-growth plantations at different ages in Costa Rica. Specifically, the aim of the study is to establish the variability of SWT,  $HW_{\text{diameter}}$ ,  $HW_{\text{percentage}}$  and maximum heartwood height. In addition, statistical models were developed for predicting SWT, heartwood radius ( $HW_{\text{radius}}$ ), maximum heartwood height ( $H_{\text{HW}}$ ),  $HW_{\text{percentage}}$ , and heartwood volume ( $HW_{\text{volume}}$ ) at various tree heights.

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

### “Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”

## Methodology

### *Sampled plantations*

Sixteen fast-growth plantations of *T. grandis* (teak) were sampled in different regions of Costa Rica: the North Pacific, South Pacific and northern regions (Figure 1). The dasometric parameters of the trees are presented in Table 1. The plantations presented different ages, altitudes and silvicultural management. Age categories varied from 2 to 22 years (Table 1). These ages represent the age range of the tree before it is cut for sawlog production in Costa Rica; the age rotation for cutting is 20-25 years. A 13-m-radius (531 m<sup>2</sup>) temporary plot was established in each plantation, in which all trees were measured by their DBH, total tree height and height up to the beginning of the crown, marked by the first living branch, or height of the crown. The plantation density was determined using the number of trees in the plot, as detailed in Table 1.

### *Sampling within the plantation and tree variables measured*

From each plantation, three trees with diameters within the category of variation present in the plantation were selected randomly. A total of 48 trees was sampled, corresponding to a total of 3 samples x 16 sites. DBH was measured in each sampled tree. After the tree was cut, the height of the crown and total tree height were recorded. Then, a disc approximately 4 cm thick was cut at the base of the tree and additional discs every 2.3 m from the base of the tree to the highest part. During this process, the height in meters at which each disk was cut—which corresponds to the distance from the base of the tree to the height of this sampling—was recorded. Next, the maximum heartwood height ( $H_{HW}$ ) of the tree was located based on the disks at the different heights. Once located, the distance from the tree base to maximum heartwood height was measured.

### *Measurements in cross-sections*

In each disc, two perpendicular radial directions were marked, passing through the pith. In each direction, diameter without bark, heartwood diameter and pith diameter were measured. The sapwood-heartwood boundary was determined by the difference in color.

### *Data analysis*

The following parameters were determined from the measurements with the discs: relative sampling height, SWT,  $HW_{radius}$ ,  $HW_{percentage}$ ,  $HW_{volume}$ ,  $H_{HW}$  maximum heartwood height and  $HW_{rh}$ . The relative sampling height of each disc obtained from the tree was estimated as the height in meters of the disc, taken at different heights, divided into the total height of that tree and expressed as a percentage.

For SWT determination, the difference between the disc diameter without bark and heartwood diameter was calculated and divided in two. Where there was no presence of heartwood, SWT was estimated as the difference between the disc diameter without bark and the mean of the pith diameter, divided in half.  $HW_{radius}$  was determined based on the heartwood diameter measured in the discs and divided in two. Another parameter determined for each disc was  $HW_{percentage}$ , calculated as the area of heartwood with respect to the disc cross-section area and expressed as a percentage.  $HW_{rh}$  was calculated by the ratio of maximum heartwood height and total tree height, expressed as a percentage. Lastly,  $HW_{volume}$  was estimated by the conical volume method (Equation 1), which estimates the heartwood volume from the base of the tree to where the maximum heartwood height is reached.

---

## INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

$$\text{HWvolume (m}^3\text{)} = \frac{a_b(\text{m}^2) * \text{H}_{\text{HWD}}(\text{m})}{3} \quad \text{Equation 1}$$

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

where HWvolume is the heartwood volume, estimated from the base of the tree to the highest heartwood height in the trunk;  $a_b$  is the cross-section area of the heartwood at the tree base, estimated through Equation 2; maximum heartwood height is the maximum height of the heartwood in meters; and diameter is the heartwood diameter at the measured height.

It should be mentioned that some authors (Berthier et al., 2001; Climent et al., 2003; Sousa *et al.*, 2012) did not take into account the measurements at the tree base while studying the variation of properties because of the irregularity in the shape of the tree at that height. This work considered those measurements in the analysis except in the plantations of Pueblo Viejo and Hojanca, where discs at the base of the trunk could not be obtained due to trunk base rotting. The parameters of the cross-sections were measured using the small and large diameters of the cross-sections.

#### *Statistical methods*

First, SWT behavior with respect to the sampled height was studied through the variation of SWT along the tree-trunk height. SWT normality was confirmed; and then a one-factor analysis of variance (ANOVA) was applied for each age of the plantation, using the sampling height (in meters) as the independent variable and SWT as the dependent variable. The Tukey test was used for the comparison of this analysis of variance at a statistical level ( $p$ ) of 0.05. Another analysis performed was the linear correlation between the variables in the study, compared through Pearson's correlation coefficient analysis (95 % significance). This test established the most significant variables for the multiple linear regression models.

#### *Prediction models*

The multiple linear regression method was used to obtain the prediction models for the tree variables SWT,  $\text{HW}_{\text{radius}}$ , maximum heartwood height,  $\text{HW}_{\text{percentage}}$ ,  $\text{HW}_{\text{rh}}$  and  $\text{HW}_{\text{volume}}$ . The Ryan-Joiner normality test was used to test the normal distribution of the data of each variable. A suitable transformation was applied to the variables to be modeled that did not present a normal distribution. The models were tested with the best-fitting independent variables according to correlation with the variables to be modeled. Residual plots were analyzed to evaluate the validity of the models.

## **Results**

#### *Sapwood thickness variation along the trunk*

SWT of *T. grandis* trees in fast-growth plantation conditions tended to decrease with increasing tree height in both total tree height and relative sampling height (Figure 2a-b). The coefficients of determination for linear regression between SWT and the relative sampling height or the height of sampling indicate a statistically non-significant relationship (correlation coefficients 0.026 and 0.028, respectively), showing that SWT is uniform along the trunk of the trees. However, it is also possible to observe a wide variability in SWT along the tree trunk. SWT decreases with tree height at ages 2, 3 and 7 years, with significant differences in total

tree height, whereas other tree ages do not present significant differences in SWT in the entire trunk.

SWT separation by tree age showed two distribution patterns (Figure 3a-b). The first pattern occurred in trees from plantations aged 2 to 10 years, with SWT showing a tendency to decrease with increasing total tree height. The second pattern is associated with trees from plantations aged 11 to 22 years, with SWT showing no increasing or decreasing pattern relative to total tree height. The t-student test of the two age ranges (trees less than and equal to 10 years and trees over 10 years) showed that there are significant differences between the two groups in sapwood thickness ( $\alpha = 0.05$ ;  $T = 9.83$ ;  $P \text{ value} = 0.00$ ); therefore, trees aged 11 to 22 years have a statistically lower SWT than trees 2 to 10 years old. In the former age category, SWT is 0.5 to 3.2 cm, and for trees aged from 2 to 10 years, SWT is 1.4 to 6.5 cm.

#### *Age of formation and maximum height of heartwood*

Heartwood formation at the base of sampled trees 2-3 years of age was found in only two trees of each age (Figure 4a) and not in the rest of the heights analyzed at these ages. Meanwhile, maximum heartwood height was proportional to the age of the plantation; i.e., as the tree ages (Figure 4a), heartwood disappears at greater heights ( $R^2 = 72.29 \%$ ). Additionally, maximum heartwood height tended to approach the total height of trees (Figure 4a). In younger trees, the distance between maximum heartwood height and the apex of the tree tends to diminish as the tree ages. HW<sub>rh</sub> presented a significant proportionality with tree age ( $R^2 = 63.00 \%$ ) (Figure 4b): the older the plantation, the greater the height at which heartwood disappears.

#### *Relationship between maximum heartwood height and dasometric variables of the tree*

In addition to the relationship between tree age (Figure 4) and maximum heartwood height, it was found that this height was positively correlated with other variables of the trees (Table 2, Figure 5a-b-c). DBH, total tree height and height of crown are proportional to maximum heartwood height. Moreover, HW<sub>radius</sub>, HW<sub>percentage</sub> and HW<sub>volume</sub> presented a positive correlation with maximum heartwood height.

Additional correlations were established with the parameters of the trees (Table 2): (i) DBH showed a significant and positive correlation with maximum heartwood height (Figure 5a), HW<sub>radius</sub>, HW<sub>volume</sub> and HW<sub>percentage</sub>; (ii) the total height of the trees also presented a positive significant correlation with maximum heartwood height (Figure 5b), HW<sub>radius</sub>, HW<sub>volume</sub> and HW<sub>percentage</sub>; (iii) to a lesser extent, the relative sampling height showed a positive and significant correlation with the variable maximum heartwood height, in contrast with HW<sub>radius</sub>, HW<sub>volume</sub> and HW<sub>percentage</sub>, for which the correlation was significantly negative; (iv) the height of sampling in the tree was negatively correlated with HW<sub>radius</sub>, HW<sub>volume</sub> and HW<sub>percentage</sub> and significantly positively correlated with maximum heartwood height; and (v) both height of crown and age of the plantation showed a positive and significant correlation with maximum heartwood height (Figure 5c), HW<sub>radius</sub>, HW<sub>volume</sub> and HW<sub>percentage</sub>. The variable SWT at different heights of the tree showed a significant negative correlation with total tree height, DBH, relative sampling height, height of sampling, height of crown and age of the plantation. Finally, maximum heartwood height was the variable that presented the strongest significant correlations in proportion to the rest of the variables. In addition to this variable, in trees presenting heartwood, its maximum height was within the category of 0.27 to 21.7 m.

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

### *Prediction models*

For the variables to be modeled (SWT,  $HW_{radius}$  at different heights, maximum heartwood height,  $HW_{percentage}$  and  $HW_{volume}$ ), the normality of data distribution was tested by means of the Ryan-Joiner test. SWT and maximum heartwood height presented data normality (p-value < 0.01; RJ value of 0.98 and 0.96, respectively), and transformation was unnecessary. In contrast,  $HW_{radius}$ ,  $HW_{percentage}$  and  $HW_{volume}$  did not show a normal distribution; therefore, transformation by means of the square root was required to achieve normality (P value < 0.01; RJ value of 0.98, 0.97 and 0.94, respectively).

After transformation in the case of SWT, the best fit for the determination of this parameter was obtained with the variables SWT at 2.3 m height, height of sampling, relative sampling height and total tree height. This fit explained 70 % of the variation of SWT at different heights of the tree in addition to presenting adequate error distribution (model 1 in Table 3, Figure 6a).

In the estimation of  $HW_{radius}$  with the best fit, based on the coefficient of determination and standard error, the multiple square root should be considered with DBH,  $HW_{radius}$  at 2.3 m height, the height of sampling and relative height. This model explains 89 % of the variation of  $HW_{radius}$  at different heights (model 2 in Table 3), and the error distribution was appropriate, as shown in Figure 6b.

The maximum heartwood height is a difficult feature to measure. A prediction model was adjusted in this case (explaining 95 % of the variation), including the fitting variables of SWT at 2.3 m height ( $SWT_{2.3}$ ), DBH and total height of the tree (model 3 in Table 3). The error distribution was significantly appropriate for the model (Figure 6c).

The  $HW_{percentage}$  present in a cross-section was modeled based on the transformed variables of the multiple square root of SWT at 2.3 m, the  $HW_{radius}$  at 2.3 m, relative sampling height, total tree height and the height of sampling in the individuals, for a precision of 73 % (model 4 in Table 3), being the least adjusted model. The distribution of the errors of the model, as shown in figure 6d, is not significantly adequate.

Finally, for  $HW_{volume}$ , the best fit was achieved with the inclusion of the transformed variables of the multiple square root of DBH and tree crown height (model 5 Table 3). This prediction model accounts for 31 % of the dependent variable, with a uniform distribution of the data error (Figure 6e).

## **Discussion**

### *Sapwood variation along the trunk*

The correlation between SWT and relative sampling height or height of sampling was not significant (Figure 2a-b), which means that SWT is uniform in the tree trunk. These results agree with those affirmed in Moya *et al.* (2014), who hypothesized that SWT for different ages of trees of *T. grandis* is stable with height, varying from 2 to 5 cm in SWT. However, this study of SWT is lower than 0.5 to 6.5 cm.

Furthermore, from the results, it is important to note that two patterns of SWT variation are present according to the age of the trees: in trees from 2 to 10 years of age, more SWT is

present than in trees between 11 and 22 years of age (Figure 3a-b). The formation of heartwood occurs due to the death of parenchyma and the accumulation of substances (extractives) in the inner part of the tree, while the degree of formation is regulated by the physiological behavior of the enzymes in the region of the sapwood, a situation that is regulated by growth conditions (Taylor *et al.*, 2002). Thus, heartwood formation is a biochemical transformation occurring in an already existing tissue (sapwood). The wood cells are still the same in terms of position, dimensions and composition of the cell walls. Thus, the cell is still xylem that has lost its sap transportation and stocking functions (Taylor *et al.*, 2002). Although knowledge of the formation of heartwood is extensive in the case of conifers (Yang *et al.*, 1994), it is less so for tropical species (Taylor *et al.*, 2002) and very limited for teak trees from young plantations (Moya *et al.*, 2014). However, after applying the concepts developed by Taylor *et al.* (2002) in the present study, it is possible to affirm that the tree regulates its physiological processes to maintain sapwood, preventing the formation of heartwood during the first years of growth, since the tree invests its physiological processes in reaching a greater height quickly. Therefore, higher SWT is expected during the juvenile period (trees under 10 years of age) than in older trees, as found in the present study.

This same behavior was found by Pérez and Kanninen (2003), who in their study on *T. grandis* plantations 5 to 47 years old observed a greater proportion of sapwood in juvenile plantations, while as heartwood develops with age, SWT decreases until it reaches constant variation. Furthermore, Kokutse *et al.* (2004), in a study on the presence of heartwood in trees from different life zones in Togo, found that heartwood is already present in trees with diameters from 10 to 20 cm, while its transformation occurs between 11 and 13 years of age. On the other hand, the variation in SWT can be expected to decrease with the utilization of clone trees or of plantations with similar silvicultural management because the properties are uniform in clones (Moya *et al.*, 2013) or plantations with uniform management properties (Moya and Berrocal, 2010).

#### *Age of formation and maximum height where heartwood is present*

Early formation of heartwood was found in only two trees from plantations aged 2 to 3 years, unlike the rest of the trees of the same age (Figure 4a). These two trees presented an average DBH of 9.9 and 9.4 cm, and the presence of heartwood was evidenced at the base of the tree instead of at DBH. Although a number of studies have addressed heartwood formation in *T. grandis*, few have studied in detail the age at which such formation starts. For example, Solórzano *et al.* (2012a and 2012b) found 12 % heartwood on average at DBH in a four-year-old plantation of *T. grandis*, although the age at which heartwood formation started was not mentioned. This result contradicts the assumptions made by Moya *et al.* (2014), who suggested that the differentiation between sapwood and heartwood occurs between the ages of 4 and 6 years in fast-growth plantations, with diameters at breast height between 6 and 10 cm. Therefore, the results of this study suggest, along with other references, that heartwood formation begins at the age of 2 years at the base of the tree and that if there is more accelerated development of the diameter, such as 10 cm DBH, heartwood can begin its earliest formation at the base of the tree at the age of 2 years.

If comparing the age of appearance of heartwood in teak trees with that of other species, Hillis (1999), for example, describes the heartwood formation of some species of *Eucalyptus* at the age of 5 years. On the other hand, Gominho *et al.* (2001) found that in the variety *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* at 5-6 years of age in Portugal, heartwood is present in 65 % of the total height of the tree. In natural *Pinus spp.* (Hillis, 1999), the formation of

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**



heartwood can start at 12 years old. This indicates that the fast-growth conditions of *T. grandis* trees produce an early appearance of heartwood by accelerating the physiological processes that transform sapwood into heartwood (Taylor *et al.*, 2002).

#### *Relationship between maximum heartwood height and some dasometric variables of the tree*

The maximum heartwood height and HW<sub>rh</sub> relative to total tree height show a positive relationship to tree age (Figure 5a-b). This result was to be expected, for as the tree ages, the height at which heartwood can be found increases (Yang *et al.*, 1994). Anish *et al.* (2015) agree with the results of this study, indicating that heartwood growth increases with increasing age until reaching a maximum point in the tree height in fast-growth *T. grandis* plantations.

This study found that *T. grandis* heartwood reaches a maximum height from 0 to 90 % (0.27 to 21.7 m) of total tree height (Figure 4b). Gominho *et al.* (2001) observed for the hybrid *Eucalyptus urograndis* that the heartwood reaches up to 65 % of total tree height in 5-year-old trees, slightly lower than in the present study. On the other hand, Gominho and Pereira (2000) found maximum heartwood height varying from 65 to 70 % of total tree height in 9-year-old *E. globulus* trees, again a lower value than the maximum value found in *T. grandis* trees. Meanwhile, mature *Pinus radiata* (Wilkes, 1991) tree sampling found heartwood at 17.6 m in height, while in *Pinus pinaster* (Pinto *et al.*, 2004) trees with mature ages between 42 and 83 years, heartwood was found even at a height of 20 m and in some branches. These references show an increase in the height at which heartwood disappears with tree age, suggesting that in the case of *T. grandis* trees, the maximum heartwood height is expected to increase with age, and heartwood could be present even in the branches.

#### *Prediction models*

The variation of the different parameters of heartwood observed within and between trees in this study demonstrates that HW<sub>radius</sub>, maximum heartwood height, HW<sub>percentage</sub> and HW<sub>volume</sub> are statistically predictable with the following variables: DBH, height of sampling, Hr, and total tree height (Table 3). On the other hand, SWT showed no variation regarding tree height when this parameter was evaluated in two age ranges (1-10 and 10-25 years) (Figure 2a). However, the model can explain 70 % of the variation in total tree height and relative sampling height (Table 3). Moya *et al.* (2014) did not define prediction models for SWT, as it remained invariable along the trunk, and they observed a category between 2 and 5 cm thickness for the different ages and heights. For that reason, their results are not consistent with those presented in this work. However, the predictions of the model can increase if the information comes from clone trees, where the variation decreases (Moya *et al.*, 2013), or from plantations with similar silvicultural management because the properties are more uniform in managed than in un-managed plantations (Moya and Berrocal, 2010).

The variation of HW<sub>radius</sub> can be explained at 89 % by means of DBH, HW<sub>radius</sub> at 2.3 m tree height, height of sampling, relative sampling height and total tree height (Table 3). García *et al.* (2011a and 2011b), as well as Moya and Marín (2011), showed a relationship between the heartwood diameter with respect to tree total tree height and tree age; however, they did not present prediction models, although their results are consistent with the tendency found in this study with respect to heartwood decreasing with height. The best adjusted modeling is maximum heartwood height, explained at 95 %, which can be predicted using SWT at a tree height of 2.3 m, DBH and total tree height (Table 3). The maximum heartwood height is a hardly studied variable, and there is no explanatory model for *T. grandis* for different tree ages, heights and diameters (Moya *et al.*, 2014). Climent *et al.* (2003) obtained a strong correlation

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

of maximum heartwood height with the variables  $HW_{radius}$  at DBH and total tree height in *Pinus canariensis* growing in natural forests. This coincides with the relationships found for maximum heartwood height in this study on *T. grandis* with the variables DBH and total tree height (Table 3).

Of the variation in  $HW_{percentage}$ , 74 % is explained by the SWT and  $HW_{radius}$  variables at the height of 2.3 m, height of sampling, relative sampling height and total tree height (Table 3). This trend coincides with the results of Miranda *et al.* (2011), who obtained the relationship between the decrease of  $HW_{percentage}$  and the increase of the height of the tree. Finally,  $HW_{volume}$  at different heights is explained at 31 % by means of DBH and height of crown (Table 3). According to Viquez and Pérez (2005),  $HW_{volume}$  correlates with DBH and total height of the trees, which can be affected by silvicultural management in *T. grandis* plantations, meaning that plantation management can help increase the  $HW_{volume}$ .

It is important to clarify that in this study on *T. grandis* trees, SWT and  $HW_{radius}$  were incorporated in some models at a tree height of 2.3 m because the sampled trees were obtained during a commercial cutting, and arrangements had not been made to extract discs at DBH. For a future variable prediction with the developed models,  $HW_{radius}$  and St at the height of 2.3 m can be obtained by means of a drill as a non-destructive technique to characterize standing wood.

## Conclusions

St with respect to tree height in the plantation of *T. grandis* presented variations from 0.5 to 6.5 cm. Regarding the age of the plantation, it was observed that for juvenile trees between 2 and 10 years old, SWT (1.4 to 6.5 cm) is greater than for 11- to 22-year-old trees (0.5 to 3.2 cm).

The present study found that heartwood formation occurred between 2 and 3 years of age in *T. grandis* fast-growth plantations among trees of 10 cm DBH. However, heartwood formation starts at this age at the base of the tree but not at DBH height. Heartwood formation at DBH starts later, at 3-4 years of age. The maximum heartwood height in trees that presented heartwood growth is in the category of 0.27 to 21.7 m.

Prediction models were developed for sapwood thickness, heartwood radius, maximum heartwood height, proportion of the area of the heartwood and heartwood volume at different heights. Those models showed goodness of fit of 70 %, 90 %, 95 %, 73 % and 31 %, respectively. These models can be incorporated by commercial plantations for more accurate data in heartwood production and thus for greater security in sawlog commercialization.

## Acknowledgements

The authors wish to thank the *Vicerrectoría de Investigación y Extensión at the Instituto Tecnológico de Costa Rica* and all companies for the providing raw material and other assistance in carrying out this study.

## References

---

### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

- Anish, M.C., Anoop, E.V., Vishnu, R., Sreejith, B., 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.
- Arce, N., Moya, R. 2015. Wood characterization of adult clones of *Tectona grandis* growing in Costa Rica. *Cerne*, 21(3), 353-362.
- Berthier, S., Kokutse, A.D., Stokes, A., 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.
- Climent, J., Chambel, M.R., Gil, L., 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.
- Crespo, R., Jiménez, E., Suatunace, P., Law, G., Sánchez, C., 2008. Comparative analysis of physical-mechanical properties of teak (*Tectona grandis* LF) from Quevedo and Baltazar. *Ciencia y Tecnología*, 1, 55-63.
- Galeano, E., Vasconcelos, T.S., Vidal, M., Mejia-Guerra, M.K., Carrer, H., 2015. Large-scale transcriptional profiling of lignified tissues in *Tectona grandis*. *BMC Plant Biology*, 15(1), 221.
- García, H., da Silva, M.L.M., Binoti, D. H. B., Fardin, L., Takizawa, F.H., 2011a. 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.
- García, H., de Oliveira Neto, R.R., Monte, M.A., Fardin, L., de Alcantara, A. M., Binoti, M.D.S., Castro, R.V.O., 2011b. Models of heartwood of *Tectona grandis* Lf. *Scientia Forestalis*, 39(89), 53-59.
- Gominho, J., Figueira, J., Rodríguez, J.C., Pereira, H.. 2001. Within-tree variation of heartwood, extractives and wood density in the eucalypt hybrid urograndis (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*). *Wood and Fiber Science*, 33(1), 3-8.
- Gominho, J., Pereira, H., 2000. Variability of heartwood content in plantation-grown *Eucalyptus globulus* Labill. *Wood and Fiber Science*, 32(2), 189-195.
- Hegde, H.T., Kalkoor, M.A., Jha, S.K., 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.
- Hillis, W.E., 1999. The Formation of heartwood and its extractives. In *Phytochemicals in Human Health Protection, Nutrition, and Plant Defense* (pp. 215-253). Springer US.
- Kennedy, S.G., Yanchuk, A.D., Stackpole, D.J., Jefferson, P.A., 2014. Incorporating non-key traits in selecting the *Pinus radiata* production population. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 44(1), 1-10.
- Knapic, S., Oliveira, V., Makkonen, M., Pinto-Seppä, I., Pereira, H., 2014. Circumferential variation of heartwood and stem quality in maritime pine stems. *European Journal of Forest Research*, 133(6), 1007-1014.
- Kokutse, A.D., Bailleres, H., Stokes, A., Kokou, K., 2004. Proportion and quality of heartwood in Togolese teak (*Tectona grandis* Lf). *Forest Ecology and Management*, 189(1), 37-48.
- Koskela, J., Vinceti, B., Dvorak, W., Bush, D., Dawson, I. K., Loo, J., Kjaer E.D., Navarro, C., Padolina, C., Bordács, S., Jamnadass, R., Graudal, L., Ramamonjisoa, L., 2014. Utilization and transfer of forest genetic resources: A global review. *Forest Ecology and Management*, 333, 22-34,
- Kumar, A., 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*, 5(4), 338-344.

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

- Lourenço, A., Neiva, D.M., Gominho, J., Marques, A.V., 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.
- Minn, Y., Prinz, K., Finkeldey, R., 2014. Genetic variation of teak (*Tectona grandis* Linn. f.) in Myanmar revealed by microsatellites. *Tree Genetics and Genomes*, 10(5), 1435-1449.
- Miranda, I., Sousa, V., 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.
- Miranda, I., Gominho, J., Pereira, H., 2015. Heartwood, sapwood and bark variation in coppiced *Eucalyptus globulus* trees in 2nd rotation and comparison with the single-stem 1st rotation. *Silva Fennica*, 49(1), id 1141.
- Moya, R., 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 Forest Science*, 67, 109-129.
- Moya, R., Bond, B., Quesada, H., 2014. A review of heartwood properties of *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations. *Wood Science and Technology*, 48(2), 411-433.
- Moya, R., Marin, J.D., Murillo, O., 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
- Moya, R., Marín, J. D., 2011. Grouping of *Tectona grandis* (Lf) clones using wood color and stiffness. *New Forests*, 42(3), 329-345.
- Nocetti, M., Della Rocca, G., Berti, S., Brunetti, M., Di Lonardo, V., Danti, R., 2015. Genetic growth parameters and morphological traits of canker-resistant cypress clones selected for timber production. *Tree Genetics and Genomes*, 11(4), 1-11.
- Okuyama, T., Yamamoto, H., Wahyud, I., Yusuf Sudo Had, Y., Bhat K.M., 2005. Some wood quality issues in planted teak. In: Quality timber products of teak from sustainable forest management. Proceedings of the international conference on quality timber products of teak from sustainable forest management, 2–5 December. Peechi, India
- Pâques, L.E., Charpentier, J.P., 2015. Perspectives for genetic improvement in heartwood size and extractive content in relation to natural durability and aesthetics in interspecific hybrid larch (*Larix eurolepis*). *European Journal of Forest Research*, 134(5), 857-868.
- Pérez, L.D., 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.
- Pinto, I., Pereira, H., Usenius, A., 2004. Heartwood and sapwood development within maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stems. *Trees* 18(3), 284-294.
- Serrano, R., Moya, R., Berrocal, A., González, G., Córdoba, R., 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.
- Solórzano, S., Moya, R. Chauhan, S., 2012a. Early genetic evaluation of morphology and some wood properties of *Tectona grandis* L. clones. *Silvae Genetica*, 61, 58-65.
- Solórzano, S., Moya, R., & Murillo, O. (2012b). 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.
- Sousa, V. B., Cardoso, S., Quilhó, T., 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.
- Taylor, A.M., Gartner, B.L., Morrell, J.J., 2002. Heartwood Formation and Natural Durability—A Review. *Wood and Fiber Science*, 34(4), 587-611.

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

- Thulasidas, P. K., Bhat, K.M., 2009. Log characteristics and sawn timber recovery of home-garden teak from wet and dry localities of Kerala, India. *Small-Scale Forestry*, 8(1), 15-24.
- Viquez, E., 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.
- Wilkes, J., 1991. Heartwood development and its relationship to growth in *Pinus radiata*. *Wood Science and Technology*, 25(2), 85-90.
- Yang, K.C., Chen, Y.S., Chiu, C., Hazenberg, G., 1994. Formation and vertical distribution of sapwood and heartwood in *Cryptomeria japonica* D. Don. *Trees*, 9(1), 35-40.
- Zhang, X.L., Jiang, L.C., 2015. Inside bark diameter prediction models for dahurian Larch. *Forest Research*, 1, 0-13.

Table 1. Dasometric parameters and age of the *Tectona grandis* Lf fast growth plantations sampled in different places in Costa Rica.

Region	Identification	Age (years)	DBH (cm)	Total tree height (m)	Height to crown start (m)	HWrh (m)
South-Pacific	ER1	13	20.5	22.4	11.3	16.5
South-Pacific	PJ1	3	8.7	9.2	3.4	0.2
North-Pacific	S1	5	18.3	17.3	5.6	7.1
North-Pacific	S4	20	22.5	20.3	9.0	16.2
North-Pacific	PN1	22	26.7	23.3	13.7	19.6
North-Pacific	C3	9	23.0	19.95	9.2	12.6
North-Pacific	C49	9	25.0	20.6	8.4	12.4
North-Pacific	QH2	14	21.4	19.3	9.6	12.6
North-Pacific	QH1	19	29.5	23.4	13.1	19.4
North	PT1	2	9.3	8.7	3.6	1.8
North	PT2	9	18.3	15.5	4.0	7.3
North	PT3	10	24.6	20.3	6.4	14.4
North	SC1	7	10.5	11.7	4.3	1.7
North	SC2	8	12.1	14.1	4.3	4.14
North	SJ2	7	9.4	10.3	3.9	3.6
North	SJ1	9	12.1	9.9	4.2	5.8

Where: DBH: diameter breast height; HWrh: relative maximum heartwood height.

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

Table 2. Correlation coefficients of tree parameters sampled in *Tectona grandis* from fast growth plantations in Costa Rica.

Tree variables	DBH	Total tree height	HWrh	Sampling height	Height of crown	Age
Heartwood maximum height	0.912**	0.955**	0.193*	0.478*	0.817**	0.867**
Sapwood thickness	-0.402*	-0.444*	-0.262*	-0.276*	-0.571*	-0.580*
Heartwood radius	0.659**	0.587*	-0.518**	-0.318*	0.475*	0.550*
Heartwood volume	0.566*	0.482*	-0.437*	-0.311*	0.422*	0.479*
Heartwood percentage	0.679**	0.659**	-0.384*	-0.162*	0.619**	0.666**

Coefficient significance  $p < 0.05$ .

Table 3. Adjusted regression for sapwood thickness and maximum heartwood height prediction models for *Tectona grandis* trees from fast growth plantations in Costa Rica.

	Stand error	R <sup>2</sup> adjusted (%)	FI	Models
SWT	0.50	69.54	-	$SWT = 3.049 + 0.6965 SWT_{2.3} + 0.2891 Hs - 0.114 Ht - 0.05872 Hr$ (1)
HWradius	0.37	-	89.18	$\sqrt{HWradius} = -1.523 + 0.201\sqrt{DBH} + 0.6518\sqrt{HWrb} - 1.058\sqrt{Hs} + 0.487\sqrt{Ht} + 0.2518\sqrt{Hr}$ (2)
H <sub>HWP</sub>	1.48	94.79	-	$H_{HWD} = -3.688 - 1.545 SWT_{2.3} + 0.2802 DBH + 0.7543 Ht$ (3)
HWp	1.17	-	73.49	$\sqrt{HWp} = -1.16 - 1.036\sqrt{SWT_{2.3}} + 1.933\sqrt{HWrb} - 2.083\sqrt{hs} + 1.196\sqrt{Ht} + 0.497\sqrt{Hr}$ (4)
HWvolume	0.12	-	30.91	$\sqrt{HWvolume} = -0.4337 + 0.1172\sqrt{DBH} + 0.0307\sqrt{Hc}$ (5)

Legend: H<sub>HWD</sub>: Maximum heartwood height, HWrh: relative height where the heartwood disappears, Hr: relative sampling height, Hs: height of this sampling, Hc: height of crown or first living branch, DBH: diameter at breast height, HW<sub>percentage</sub>: percentage of heartwood, SWT: sapwood thickness, SWT<sub>2.3</sub>: sapwood thickness at 2.3 m height, HW<sub>diameter</sub>: heartwood diameter, HW<sub>radius</sub>: heartwood radius, HW<sub>volume</sub>: heartwood volume and FI: R<sup>2</sup> in real units for transformed models.

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”

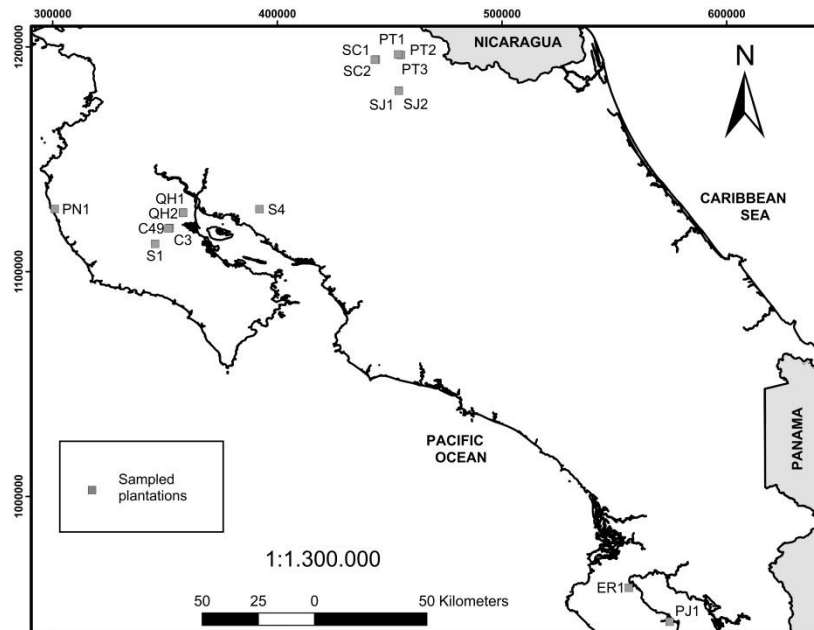


Figure 1. Localization of *Tectona grandis* sampled places of different ages in fast growth plantations in Costa Rica.

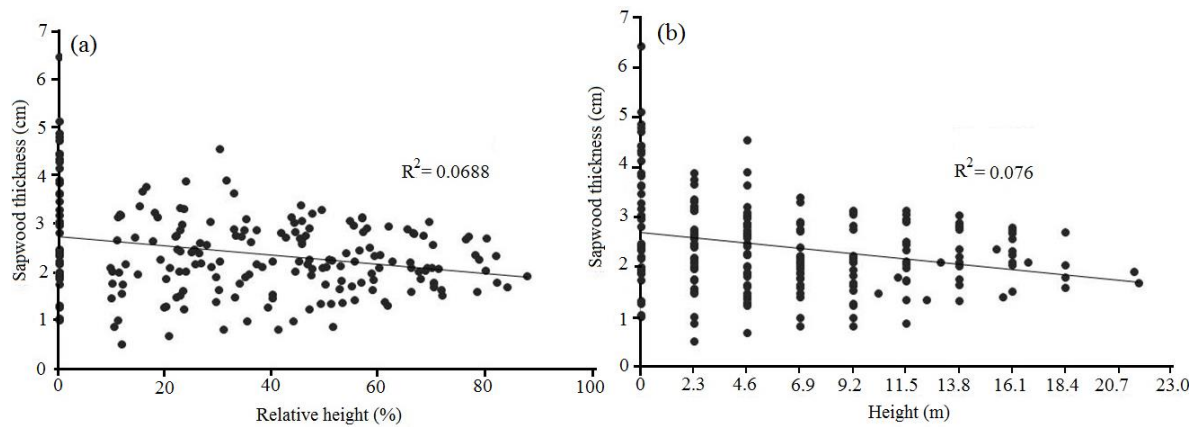


Figure 2. Sapwood variation in relation to relative height (a) and total height (b) in *Tectona grandis* trees from fast growth plantations of different ages in Costa Rica.

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”

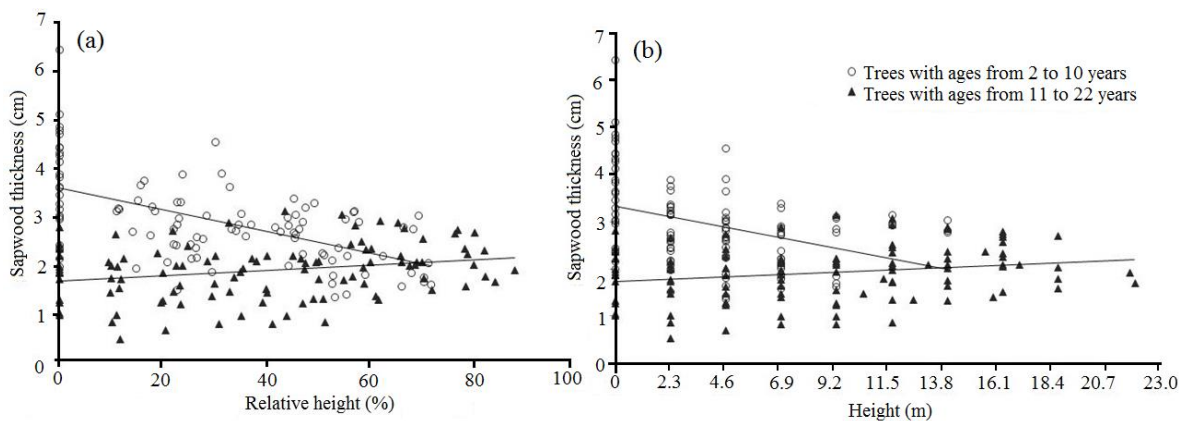


Figure 3. Relation of sapwood thickness with relative height (a) and total height (b) of *Tectona grandis* trees from fast growth plantations of different ages in Costa Rica.

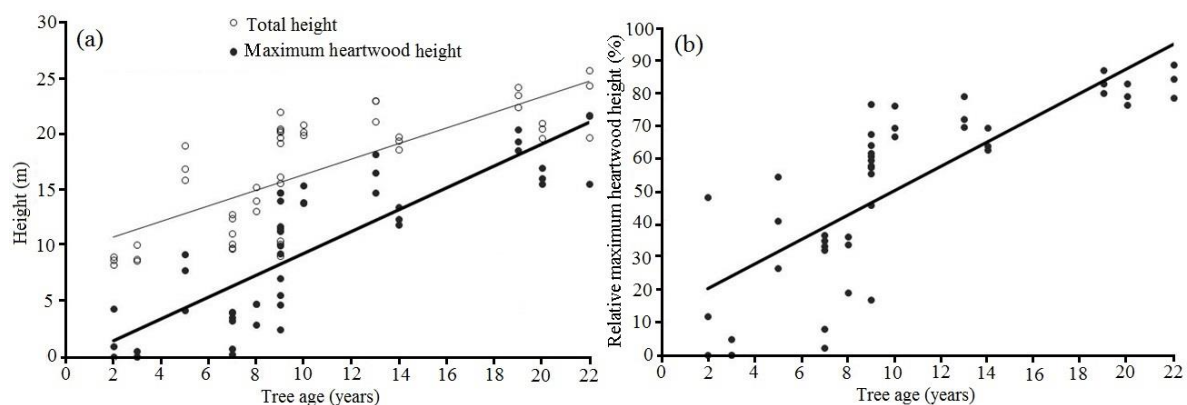


Figure 4. Relationship between the heartwood disappearing height and tree age (a) and relative heartwood disappearing height (b) and age of *Tectona grandis* trees from fast growth plantations of different ages in Costa Rica.

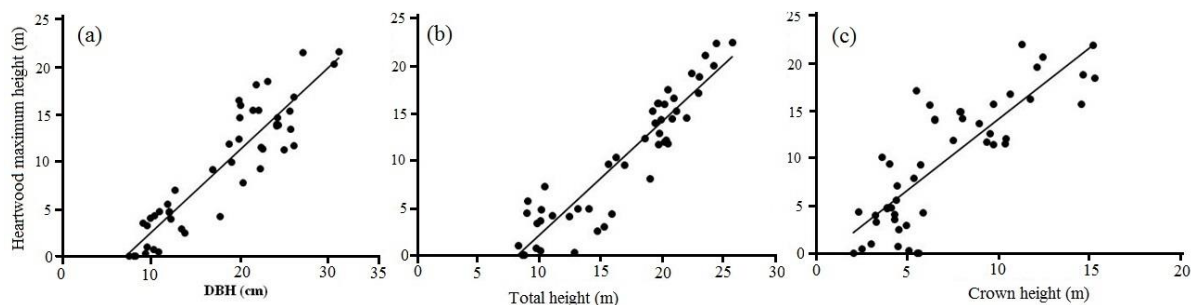


Figure 5. Relationship between HWRh and DBH (a), total tree height (b) and Height of crown (c) of *Tectona grandis* trees from fast growth plantations of different ages in Costa Rica.

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”



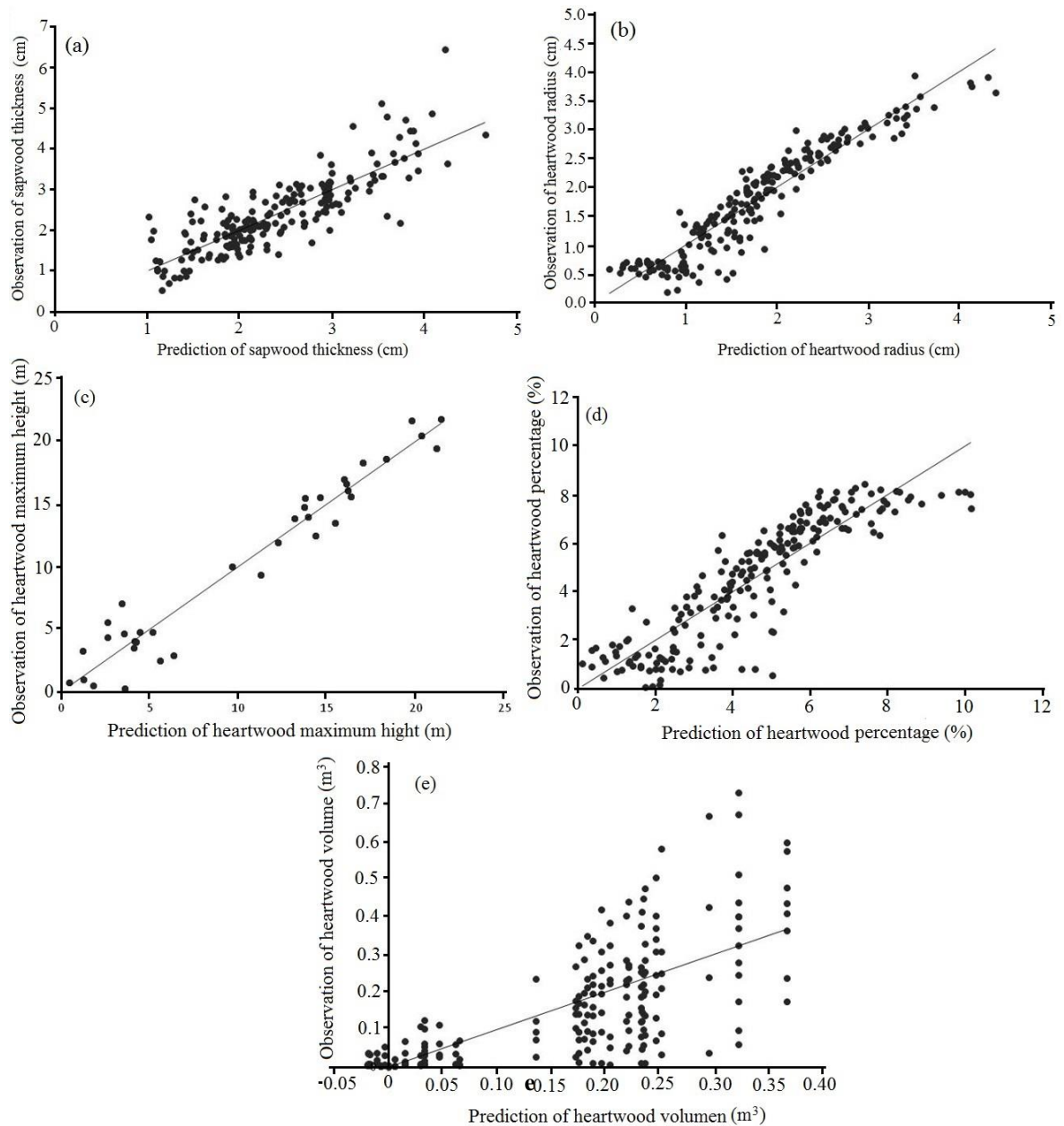


Figure 6. Error distribution for prediction models: SWT (a), HW<sub>radius</sub> (b), MAXIMUM HEARTWOOD HEIGHT (c), HW<sub>percentage</sub> (d) and HW<sub>volume</sub> (e) for *Tectona grandis* trees from fast growth plantations in Costa Rica.

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”

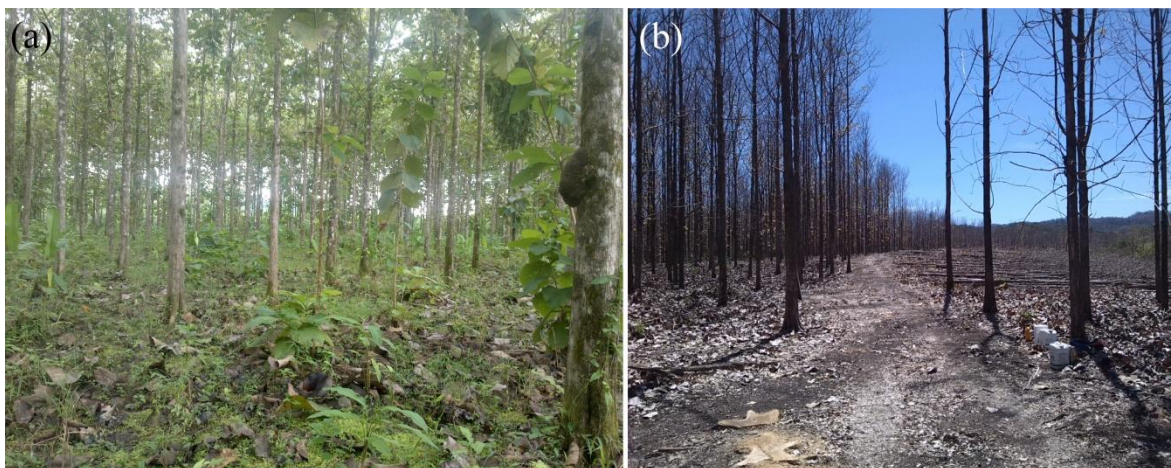


Photo 1: *Tectona grandis* plantation of 9 years growing in wet tropical (a) and dry tropical (b) climatic conditions in Costa Rica.



Photo 2: heartwood formation in *Tectona grandis* trees in basal area of 2 years old (a) and 21 years old (b) growing in Costa Rica.

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”



Photo 3: Variation of heartwood across the trunk in *Tectona grandis* trees of 18 years old (a) and the height at which the heartwood disappears in *Tectona grandis* trees (b).

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”

3. **Artículo 2. Modelos de predicción de la altura máxima, diámetro, volumen y trozas con duramen en árboles de *Tectona grandis* creciendo en plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.**

---

**Modelos de predicción de la altura máxima, diámetro, volumen y trozas con duramen en árboles de *Tectona grandis* creciendo en plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica**

**Róger MOYA\***

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [rmoya@itcr.ac.cr](mailto:rmoya@itcr.ac.cr)

**Alexander BERROCAL**

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [aberrocal@itcr.ac.cr](mailto:aberrocal@itcr.ac.cr)

**Johana GAITAN-ALVAREZ**

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [jgaitan@itcr.ac.cr](mailto:jgaitan@itcr.ac.cr)

**Edgar ORTIZ-MALAVASSI**

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [ortiz@itcr.ac.cr](mailto:ortiz@itcr.ac.cr)

**David FERNÁNDEZ-SÓLIS**

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [davfersolis@yahoo.com](mailto:davfersolis@yahoo.com)

\*Authors correspondence, Email: [rmoya@itcr.ac.cr](mailto:rmoya@itcr.ac.cr)

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

## Modelos de predicción de la altura máxima, diámetro, volumen y trozas con duramen en árboles de *Tectona grandis* creciendo en plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica

### Resumen

La madera de duramen es la parte más importante del árbol en *Tectona grandis* L.f. Aunque existen varios modelos de predicción de volumen total (albura y duramen) en esta especie, no existen modelos de predicción de duramen únicamente. El objetivo del presente trabajo fue desarrollar modelos matemáticos para predecir la altura máxima del duramen (HWh), el diámetro (HW<sub>diameter</sub>), porcentaje (HW<sub>percentage</sub>), volumen y cantidad de trozas comerciales con duramen, de árboles de *T. grandis* de plantaciones de rápido crecimiento, utilizando variables de fácil medición como diámetro a la altura de pecho (DBH), altura total (Ht) y edad. Diferentes modelos fueron utilizados para establecer las ecuaciones de los parámetros del duramen con las variables predictoras. Se muestrearon en total 54 plantaciones en cinco regiones de Costa Rica, seleccionando 3 árboles por plantación. Los modelos seleccionados para predecir el HWh, HW<sub>diameter</sub> y para el volumen de duramen incluyen el DBH y la Ht en los modelos. Para HWh y volumen el modelo propuesto es  $Y = \beta_1 + \beta_2 * Ht + \beta_4 * DBH$  con coeficientes de correlación de  $R = 0.85$  y  $0.75$  respectivamente y la ecuación del perfil del fuste para determinar los diferentes HW<sub>diameter</sub> fue  $\frac{diHW^2}{DBH^2} = -1.56 * \left(\frac{hi}{Ht} - 1\right) + 0.90 * \left(\frac{hi^2}{Ht^2} - 1\right)$  con  $R = 0.96$ . En relación a la cantidad de trozas con duramen (diámetro mínimo de 7 cm) y la cantidad de trozas varía de 1, en árboles de 12 a 14 cm al DBH a 8 en diámetro de 40-45 cm al DBH.

**Palabras Claves:** Duramen, variación vertical, modelo de regresión, volumen, trozas comerciales.

### Introducción

La teca (*Tectona grandis* L.f), es considerada como una de las especies tropicales comercialmente más importante a nivel mundial (FAO, 2013). Es originaria del sureste asiático específicamente de la India, Laos, Myanmar y Tailandia (Gyi & Tint 1998; Pandey & Brown, 2000). Sus plantaciones se han expandido ampliamente a las zonas tropicales de América Latina, Asia, África y Oceanía (Ball et al., 1999 FAO, 2006). La madera de teca posee un alto valor comercial en la fabricación de productos, debido a su alta resistencia mecánica y buenas propiedades físicas, de durabilidad natural y agradable aspecto estético (Sanwo 1990; Kjaer et al., 1999 Thulasidas et al., 2006). Debido a estas propiedades es que esta especie de madera está aumentando el área plantada a nivel mundial (Kollert et al., 2012).

Por otra parte, la presencia de una relativa alta proporción de duramen en los árboles de teca, hacen que sea una especie excelente para la industria del aserrío y elaboración de productos de mayor valor agregado (Hegde et al., 2014). Por tanto, el duramen presente en los árboles de *T. grandis* representa la parte del tronco más valiosa para su comercialización (Lourenço et al., 2015). La sección del duramen del árbol presenta un color característico café

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

oscuro apreciado por el mercado, así como una buena durabilidad y resistencia estructural (Miranda et al 2011; Moya & Pérez, 2008). Debido a la importancia de la madera de duramen en los árboles de teca es que a lo largo de los años muchas investigaciones se han centrado en el estudio de la formación, variación y mediciones de esta madera durante el crecimiento de los árboles (Moya et al., 2014; Miranda et al., 2011; Kumar and Dhillon, 2015; Anish et al., 2015).

El duramen es la parte central del tronco, donde no existen células vivas y las células que lo componen en su mayoría sirven de soporte estructural (Hillis, 2012). La formación de duramen ocurre cuando las células vivas, del parénquima de la zona cambial comienzan a morir, y las sustancias que contienen son utilizadas como energía para alimentar la producción de fenoles y quininas, que protegen al árbol de agentes patógenos y del ataque de insectos, las cuales se sitúan en la parte central (Datta y Kumar, 1987, Kampe and Magel, 2013). En investigaciones previas se ha determinado que la formación de duramen es un proceso para regular la cantidad de albura con el fin de mantener un nivel óptimo (Bamber 1976; Spicer 2005; Taylor et al., 2007) para satisfacer la demanda de soporte estructural y mecánico, transporte de agua, almacenamiento de material de reserva, y la disminución de las demandas de energía para mantener la funciones fisiológicas de albura (Taylor et al., 2007).

La variación y producción de duramen en los arboles va estar en función a factores como la especie, la edad de los árboles, la clase social de los árboles, la posición del árbol, el tipo y propiedades del suelo, la tasa de crecimiento, la altura y dimensiones del árbol (Bamber and Fukazawa 1985; Nawrot et al. 2008; Wang et al. 2010). En teca algunos estudios han demostrado que la formación de duramen está relacionado con la edad de los árboles (Okuyama et al., 2005) y las practicas silviculturales de las plantaciones principalmente (Morataya et al., 1999. Un grupo importante de investigaciones han relacionado el duramen, sea su diámetro o su porcentaje de la sección transversal), con otras variables del árbol, tales como la edad, contenido de algunos nutrientes, altura del árbol entre otras aspectos (Bamber and Fukazawa 1985, Climent et al., 2003; Hillis 2012).

Específicamente en árboles de teca algunos estudios han demostrado que la formación de duramen comienza cuando el árbol tiene entre 4 y 6 años de edad (Moya et al 2014). Estudios llevados a cabo por Solórzano et al (2012a,b) confirman el anterior resultado, ellos encontraron que la proporción de duramen es de 12% en árboles de 4 años en Costa Rica, lo cual concuerda con Trockenbrodt and Josué (1999) en árboles de plantaciones en Malasia. Miranda et al. (2011) Moya (2001) con árboles entre los 50 y 70 años en East Timor y a 5 años de edad en Costa Rica, respectivamente, presentaron el perfil de variación del duramen con la altura del árbol. Finalmente, una destacada investigación es llevada a cabo por García et al., (2011a,b) en árboles de teca entre los 2 y 14 años de edad, donde estableció un modelo de variación del diámetro del duramen con altura total y DBH en las edades antes mencionadas. Más recientemente, Berrocal et al. (2018) hace un descripción de los principales parámetros del duramen (diámetro y porcentaje) en árboles creciendo en plantaciones de diferentes edades y en diferentes alturas en Costa Rica.

Diferentes tipos de modelos estadísticos pueden ser desarrollados para que predigan la producción de duramen utilizando distintas variables (Kokutse et al., 2010). Entre estos modelos se encuentra el de Garay utilizado por García et al (2011a) en árboles de teca, donde se relaciona la altura total de los arboles junto con el DBH para determinar el diámetro

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

### **“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

de duramen a lo largo de la altura del tronco. En otro estudio García (2011b), emplea el modelo de Kozak para calcular el diámetro de duramen y su variación a lo largo del árbol, utilizando altura total, DBH, diferentes alturas de muestreo y diámetros de duramen. De la misma forma Pérez and Kanninen (2003a) proponen modelos lineales y no lineales de estimación de diámetro de duramen de plantaciones de teca en Costa Rica, basados en el diámetro a la altura del pecho (DBH) y la altura total.

Otra variable importante que puede ser utilizada para predecir el duramen, es la edad de los árboles. Por ejemplo Pérez and Kanninen (2005a) con árboles de teca en Costa Rica entre edades de 5 a 47 años desarrollan un modelo polinomial para diámetro del duramen DBH utilizando la edad y DBH. A su vez Viquez and Pérez (2005), evaluaron el efecto de la edad y la densidad de plantaciones de teca de los 2 a los 8 años en el duramen. Otros autores como Okuyama et al., (2005) utilizaron como variable dependiente la edad para describir el duramen, y propusieron dos modelos lineales uno para arboles de teca menores a los 12 años y otro para mayores a esa edad.

Un aspecto importante de destacar es que varios estudios presentan los modelos de variación del volumen de madera en árboles de teca. Entre los que destacan son los llevados a cabo por Tewari et al (2014) en la India, utilizando edades de 11 y 38 años y desarrollando dos tipos de modelos basados uno en la altura total de los árboles de teca y otro en el área basal de la plantación, respectivamente. Nunifu and Murchison (1999) en Ghana utilizando arboles de teca entre 3 y 40 años derivó los volúmenes de teca a partir de altura total y DBH. En tanto que Pérez y Kanninen (2003a) utilizando árboles de teca 5 a 47 años en Costa Rica, desarrollo modelos de predicción del volumen utilizando el DBH, la altura total y la altura de muestreo. Sin embargo, a pesar de estos estudios, los modelos desarrollados son establecidos para el volumen total del árbol y no para el duramen que es la parte comercial más importante (Moya et al., 2014).

Pese a múltiples estudios y modelos realizados a la actualidad y sumado la importancia del duramen en la comercialización de madera de teca, existe un faltante de información necesaria para predecir el desarrollo de duramen en los arboles de teca que se producen en Costa Rica, en diferentes regiones, condiciones climáticas, tipos de suelos y distintos manejos silviculturas. Por lo que el objetivo del presente trabajo es caracterizar y desarrollar modelos matemáticos para predecir la altura máxima del duramen, el diámetro, porcentaje, volumen y cantidad de trozas comerciales del duramen de árboles de *Tectona grandis* creciendo en plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica, utilizando variables de fácil medición como DBH, altura total y edad.

## Metodología

### *Área de estudio*

Se muestrearon en total 54 plantaciones de rápido crecimiento de *Tectona grandis* en diferentes regiones de Costa Rica, las cuales variaban entre los 2 a los 22 años de edad. Las regiones donde se localizaron las plantaciones fueron: (i) Pacífico Norte: con una precipitación anual de 1626.2 mm, con una estación seca entre abril y noviembre, temperatura media de 27.55 °C y humedad relativa promedio de 72.92%. (ii) Pacífico Central con una precipitación

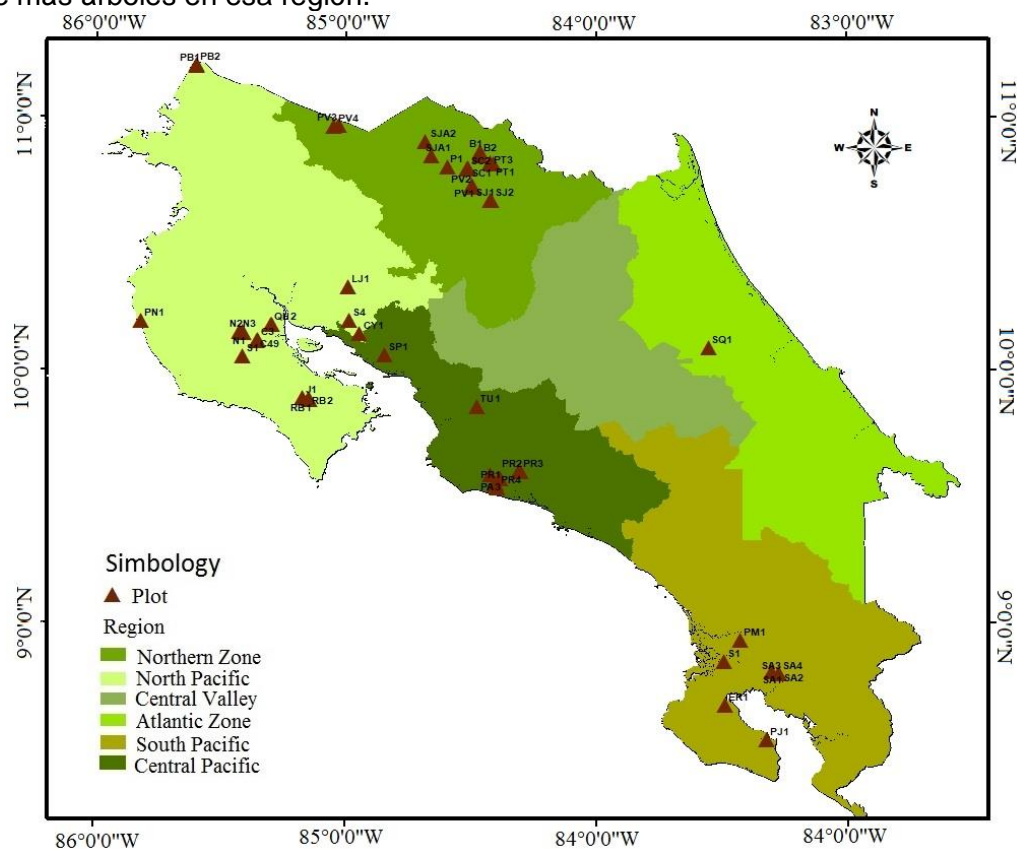
---

### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

anual de 3743 mm, distribuida en los meses de abril a diciembre temperatura media anual de 26.89 °C y humedad relativa de 84.08%. (iii) Pacífico sur: es la región con la mayor cantidad de precipitación anual, con 4453.9 mm distribuida alrededor de todo el año, sin embargo en setiembre y octubre son los meses de mayor precipitación, temperatura promedio de 26.84 °C y humedad relativa de 74.83 %.(iv) Zona Atlántica: presenta una precipitación anual de 3566.6 mm, el régimen de precipitación se mantiene constante durante todo el año siendo el mes más seco en setiembre, temperatura de 26.67 °C y humedad de 85.92. (v) Zona Norte: la distribución de lluvias se presenta entre los meses de mayo a enero con una precipitación anual de 1732 mm, una temperatura de 23.67 y humedad relativa de 85.92 % (Figura 1) (IMN, 2017).

La cantidad de plantaciones muestreadas varía en cada una de las regiones, en el Pacífico Central se muestrearon 16 plantaciones, en Pacífico Norte 12, Pacífico Sur 7, Zona Atlántica 1 y Zona Norte 18 (Figura 1). Es importante hacer notar que en el caso de la zona Atlántica la cantidad de plantaciones muestreadas fue solamente una ya que en esa región la *T. grandis* ha sido plantada en un área bastante reducida y no fue posible obtener permiso de corta de más árboles en esa región.



**Figura 1.** Localización de los puntos de muestreo en plantaciones de rápido crecimiento de *Tectona grandis* de diferentes edades en Costa Rica.

#### Muestreo de plantaciones y árboles

En cada sitio de muestreo se estableció una parcela temporal de 13 m de radio (531 m<sup>2</sup>), las variables a medir fueron: la cantidad de árboles totales (N), diámetro a la altura del pecho (DBH) y altura total (Ht). Posteriormente se seleccionaron tres árboles al azar cerca de

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**



la parcela temporal para realizar el muestreo. Los arboles seleccionados contaban con un fuste de forma recta, ramificación normal y no presentaban síntomas de enfermedades o plagas.

Una vez seleccionados los árboles, se midió el DBH, se cortó y luego se procedió a medir la altura total para cada árbol seleccionado. Seguidamente se cortaron discos de aproximadamente 4 cm de espesor en la base del árbol, y adicional se cortaron discos cada 2.3 m desde la base hasta la altura máxima del duramen (HWh). Durante este proceso, se registró la altura en metros a la que se cortó cada disco, que corresponde a la distancia desde la base del árbol hasta la altura de muestreo ( $h_i$ ).

#### *Mediciones en los discos*

En cada uno de los discos extraídos fueron medido los siguientes parámetros: el diámetro total, diámetro sin corteza y diámetro de duramen ( $HW_{\text{diámetro}}$ ). Estos diámetros fueron determinados tomando en cuenta el promedio de dos mediciones sobre el disco, uno en sentido norte-sur y el otro en sentido oeste-este. También fue necesario determinar el porcentaje de duramen ( $HW_{\text{porcentaje}}$ ) el cual fue calculado como el área de duramen con respecto al área de sección total de la sección transversal del disco expresada en porcentaje.

#### *Modelos de predicción*

Varios modelos de predicción del duramen fueron realizados: (i) un primer modelo fue desarrollado para estimar la HWh, (ii) un segundo modelo fue aplicado para predecir el  $HW_{\text{diámetro}}$  y  $HW_{\text{porcentaje}}$  a diferentes alturas del árbol y (iii) un tercer modelo para estimar el volumen de duramen en un árbol y (iv) finalmente fue estimado la cantidad de trozas comerciales que se pueden extraer de los árboles con diferentes diámetros.

(i) Modelo para estimar Hwh: en el desarrollo de este modelo fue utilizada las mediciones de la HWh en los árboles muestreados. En esta parte primeramente fue presentado gráficamente la relación HWh con la edad, altura total del árbol y el DBH. Seguidamente fueron aplicados diferentes modelos para predecir HWh considerando la región de crecimiento de Costa Rica, edad, Ht y DBH. En estos modelos, HWh es medida en metros (m), edad en años (años), Ht del árbol en metros (m) y el DBH en centímetros (cm).

(ii) Modelo de predicción del  $HW_{\text{diámetro}}$  y  $HW_{\text{porcentaje}}$  a diferentes alturas: para este modelo se utilizaron los datos de  $HW_{\text{diámetro}}$  medido en centímetros (cm) y diámetro total medido en centímetros (cm) a diferentes alturas del árbol medida en metros (m). También fue desarrollado un análisis de perfil de fuste, en donde primeramente se graficó la relación diámetro total/ DBH con respecto a la altura de muestreo ( $h_i$ ) y Ht ( $h_i/\text{DBH}$  vrs  $h_i/\text{Ht}$ ). También se graficó la relación de  $HW_{\text{diámetro}}$  con DBH con la relación de  $h_i$  y Ht ( $h_i HW_{\text{diámetro}}/\text{DBH}$  vrs  $h_i/\text{Ht}$ ). Con estas relaciones se desarrollaron los modelos propuestos por Coffre (1982) y Kozak (Kozak et al., 1969) para perfil de fuste de árboles. En el caso de Coffre ha sido aceptado como un modelo para análisis fustal (Rojo et. al., 2005). Cada uno de los modelos se desarrolló para el diámetro total ( $h_i$ ) a diferentes  $h_i$ , y para  $HW_{\text{diámetro}}$  a diferentes  $h_i$ . Desarrollados estos modelos se predijo el  $HW_{\text{diámetro}}$  y diámetro total a diferentes alturas, así como el  $HW_{\text{porcentaje}}$  a diferentes alturas de los árboles de teca.

(iii) Modelo de predicción del volumen de duramen: para este modelo fue necesario realizar el cálculo de volumen obtenido para cada una de las trozas de los arboles usando la información de  $HW_{\text{diámetro}}$  para luego sumar el total por árbol, el volumen se calculó usando la ecuación 1.

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

$$V = \frac{(g1 + g2)}{2} * LM \quad (1)$$

Donde:

V = Volumen de la troza o árbol (m<sup>3</sup>)

g1 = área de la cara menor de la troza (m<sup>2</sup>)

g2 = Rea de cara mayor de la troza (m<sup>2</sup>)

Lm = largo de la troza (m)

Una vez obtenido el volumen de duramen por árbol, se construyeron gráficos que relacionan el volumen de duramen con respecto a otras variables como edad en años, Ht en m y DBH en cm. Luego se desarrollaron modelos lineales para predecir el volumen de duramen utilizando como variables independientes: la región donde crecen los árboles, la edad, Ht y DBH. La región no presentó significancia con el volumen de duramen porque no se usó como variable predictora.

(iv) Utilizando el modelo de Coffre (1982) para  $HW_{\text{diámetro}}$ , se desarrolló la predicción de trozas comerciales que se pueden obtener en árboles de teca con diferentes Ht y DBH.

#### *Métodos estadísticos*

Primero se comprobó la normalidad y homocedasticidad de todas las variables muestreadas. Posteriormente se desarrollaron los modelos descritos anteriormente, y una vez obtenidos los modelos se seleccionaron los mejores. Los criterios para la selección del mejor modelo fueron:

- (i) el coeficiente de determinación ( $r^2$ ), el cual indica la proporción de la variación total observada en la variable dependiente, que es explicada por el modelo este coeficiente varía entre 1 y 0, y entre más cercano a 1 mejor el modelo (Schlaegel 1981).
- (ii) El error estándar de la estimación (Syx), el cual está en función del número de coeficientes de regresión incluidos en el modelo, el cual a menor valor de error mejor será la estimación del modelo (Draper y Smith 1980).
- (iii) El coeficiente de variación, el cual es el porcentaje de variación de la estimación, y entre menor sea el porcentaje menor será la variación entre la estimación.
- (iv) La distribución residual de los errores de la variable independiente. Se debe comprobar que los residuos no deben estar correlacionado con las variables o que se distribuyan normalmente con media cero, y que cuentan con una varianza uniforme (Alder 1980).
- (v) Por último criterio que se debe seguir para escoger el modelo según autores es el sentido común y buen juicio donde las variables utilizadas sean sencillas de medición (Draper y Smith 1980).

## **Resultados**

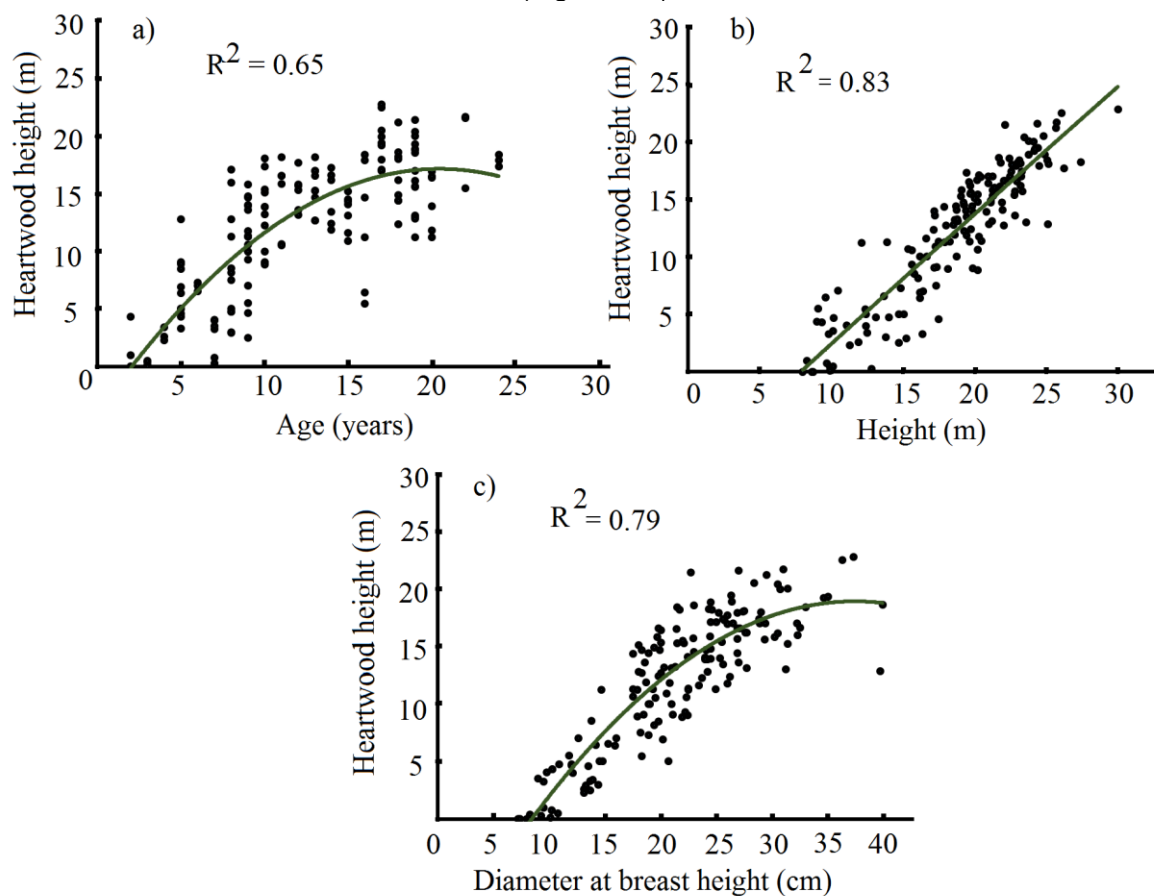
- (i) *Predicción de la altura máxima de duramen*

---

### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

La altura máxima de duramen se relaciona positivamente con la edad de la plantación, altura total y DBH (Figura 2). En el caso de la edad, se observa que la altura máxima a la que llega el duramen aumenta con la edad de los árboles. Sin embargo a partir de los 15 años de edad, el desarrollo de duramen en altura tiende a mantenerse con la edad (Figura 2-a). En tanto que con la altura total, la tendencia es lineal con la altura máxima de duramen (Figura 1-b). En el caso de la relación de la altura máxima de duramen con el DBH se presenta una tendencia lineal hasta un DBH igual a 35 cm y posterior a este diámetro la altura máxima de duramen tiende a ser estable con el DBH (Figura 2-c).



**Figura 2.** (a) Relación de la altura máxima de duramen con la edad, (b) altura total y diámetro a la altura del pecho (DBH) (c), de árboles de *Tectona grandis* provenientes de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

Los modelos matemáticos desarrollados para predecir la altura máxima donde termina el duramen se muestran en la Tabla 1. En ella se observa que la altura donde finaliza el duramen no presentó relación con las regiones donde crece el árbol (Tabla 1-M1), a pesar de que el modelo explica en un 75% la altura (Tabla 1-M1), las regiones no fueron significativas (Tabla 2-M1).

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

**Tabla 1.** Modelos de regresión y sus estadísticos para la altura máxima de duramen de árboles de *Tectona grandis*, en plantaciones de rápido crecimiento de Costa Rica.

Modelo	R <sup>2</sup>	Sxy	F-value	CV
M1. $\beta_1 + \beta_2 * DBH + \beta_3 * z_1 + \beta_4 * z_2 + \beta_5 * z_3 + \beta_6 * z_4$	0.75	2.95	94.38	24.34
M2. $\beta_1 + \beta_2 * DBH$	0.73	3.08	417.50	25.39
M3. $\beta_1 + \beta_2 * Ht$	0.83	2.39	789.49	19.78
M4. $\beta_1 + \beta_2 * Ht + \beta_3 * Edad$	0.88	2.06	565.58	16.96
M5. $\beta_1 + \beta_2 * DBH + \beta_3 * Edad$	0.79	2.77	290.67	22.41
M6. $\beta_1 + \beta_2 * Ht + \beta_3 * Age + \beta_4 * DBH$	0.89	2.00	402.09	16.49
M7. $\beta_1 + \beta_2 * Ht + \beta_4 * DBH$	0.85	2.25	460.88	18.53

Nota:  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  y  $\beta_4$ : coeficiente de correlación. Ht: altura total del árbol. DHB: diámetro a la altura del pecho. R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación. Sxy: error de muestreo. CV: coeficiente de variación.

Otra aspecto que se observa de los modelos probados es que, los mejores modelos con base en los parámetros evaluados, son los que incluyen la edad altura y DBH (Tabla 1 b-g). En el presente estudio fue seleccionado el modelo de predicción M7 ( $Y = -8.37 + 0.83 * Ht + 0.23 * DBH$ ) para describir la altura máxima de duramen, esto por que: (i) altura total y DBH son relativamente fáciles de medir y cumplen con lo establecido en el objetivo de variables fáciles de medir y (ii) no fue incluido la edad en el modelo ya que es una variable de medición no directa en el campo.

**Tabla 2.** Ecuación y significancia de los modelos de regresión para la altura máxima de duramen de árboles de *Tectona grandis* de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

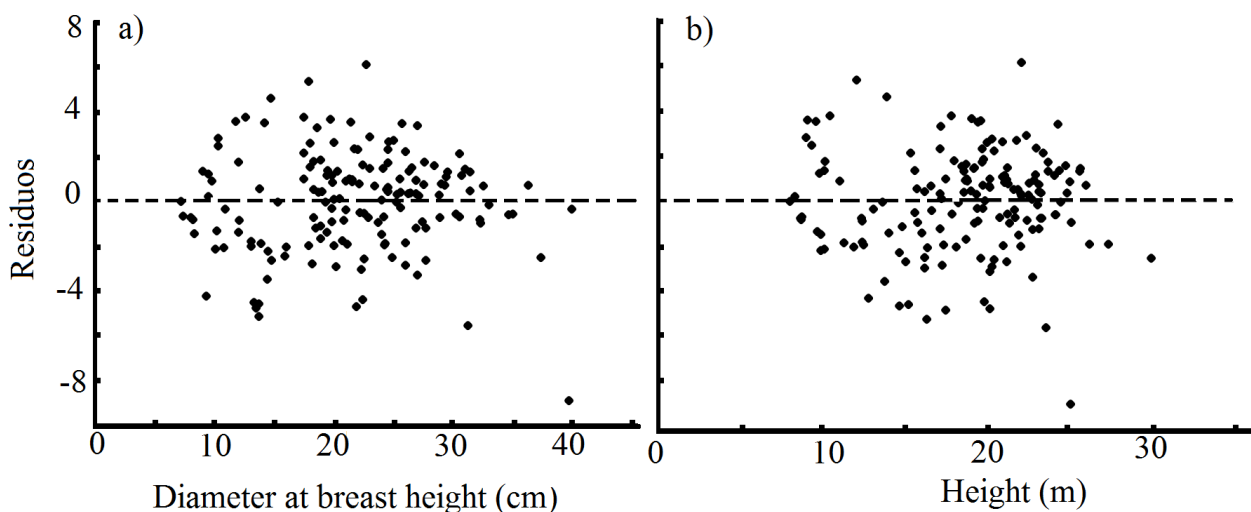
Modelo	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$
M1. $\beta_1 + \beta_2 * DBH + \beta_3 * z_1 + \beta_4 * z_2 + \beta_5 * z_3 + \beta_6 * z_4$	-2,6033**	0,663**	-0,7716 <sup>ns</sup>	1,4505 <sup>ns</sup>	1,7441 <sup>ns</sup>	1,9953 <sup>ns</sup>
M2. $\beta_1 + \beta_2 * DBH$	-3,205**	0,7123**				
M3. $\beta_1 + \beta_2 * Ht$	-8,7676**	1,1232**				
M4. $\beta_1 + \beta_2 * Ht + \beta_3 * Age$	-8,1538**	0,8941**	0,3009**			
M5. $\beta_1 + \beta_2 * DBH + \beta_3 * Age$	-3,4425**	0,5193**	0,3623**			
M6. $\beta_1 + \beta_2 * Ht + \beta_3 * Age + \beta_4 * DBH$	-7,9861**	0,7457**	0,2624**	0,1422**		
M7. $\beta_1 + \beta_2 * Ht + \beta_4 * DBH$	-8,3689**	0,8355**	0,2301**			

Nota:  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  y  $\beta_4$ : coeficientes de correlación. Ht: altura total del árbol. DHB: diámetro a la altura del pecho. \*\*: significativo al 99%. <sup>ns</sup>: no significativo.

Este modelo seleccionado presenta coeficiente de correlación de 0.85, un error de 2.25 y un coeficiente de variación de 18.53%. Al graficar los residuos de este modelo con las dos variables predictoras, la distribución de los errores es aceptable, ya que no se presenta ninguna tendencia y se encuentran completamente al azar (Figura 3 a-b).

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

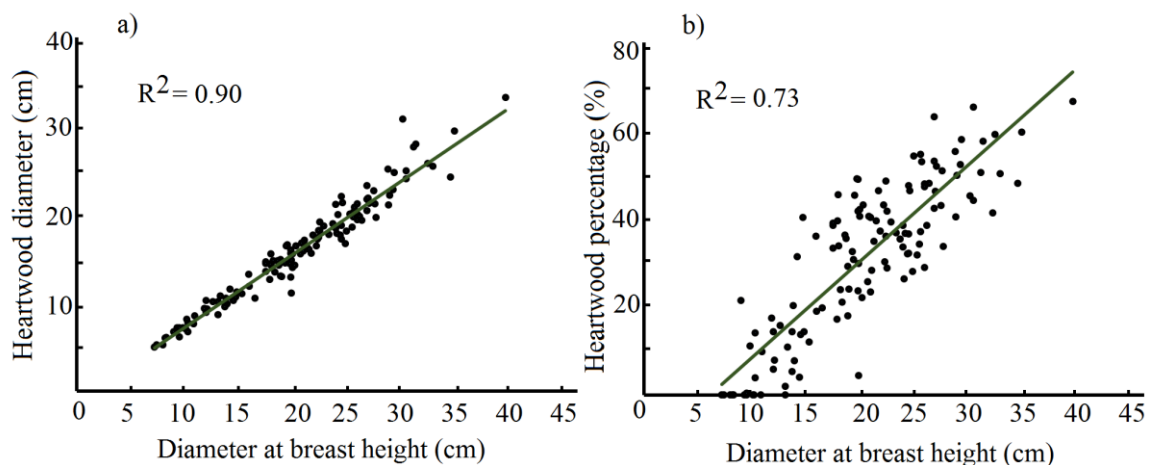
**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**



**Figura 3.** Distribución del error de modelos de regresión para la altura máxima de duramen para las variables diámetro a la altura del pecho (a) y altura total (b) de árboles de *Tectona grandis* de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

(ii) *Predicción del diámetro y porcentaje de duramen*

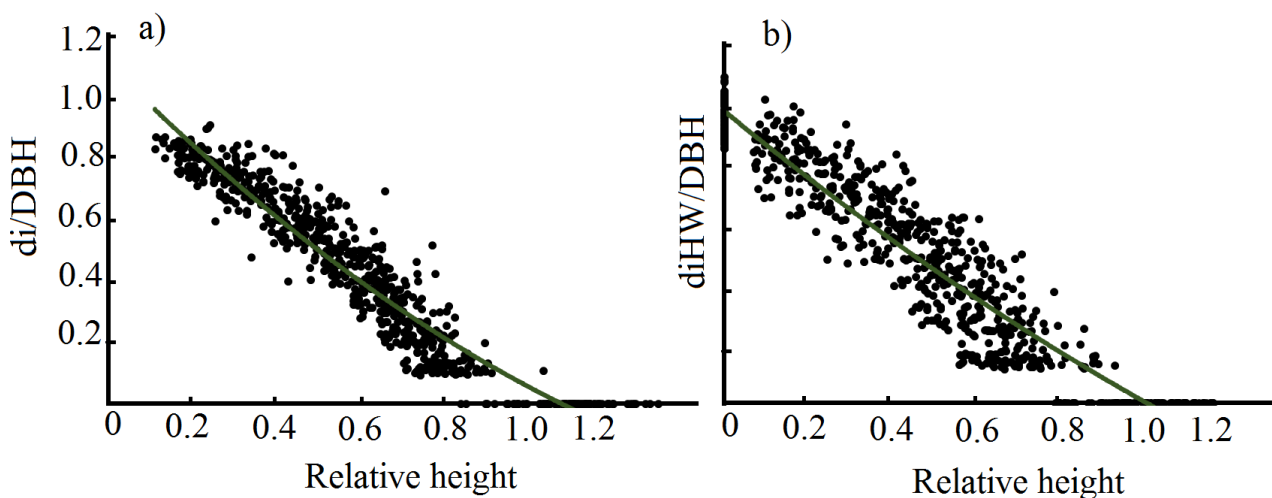
El diámetro del duramen fue correlacionado positivamente y linealmente con el DBH (Figura 4-a). Este mismo comportamiento lo presenta el porcentaje de duramen, al aumentar el DBH aumenta proporcionalmente el porcentaje de duramen en los arboles de teca (Figura 4-b).



**Figura 4.** (a) Relación del diámetro de duramen con el diámetro a la altura del pecho (DBH) y (b) porcentaje de duramen con el diámetro a la altura del pecho (DBH) de árboles de *Tectona grandis* de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

En la primera etapa, para derivar las ecuaciones de volumen y diámetro del duramen, la relación del radio de di/DBH con la relación de  $h_i/H_t$  (Figura 5a) y la relación del radio  $di_{Hw}/DBH$  con la relación  $h_i/H_t$  (Figura 5b) mostró una descendencia lineal y adecuadamente

distribuida, presentando árboles con una misma forma, en ninguna de las relaciones supera el valor de 1.



**Figura 5.** (a) Relación de la proporción del diámetro total del árbol ( $d_i$ ) y el diámetro a la altura del pecho (DBH) con la altura relativa y (b) relación de la proporción del diámetro de duramen ( $d_{iHW}$ ) y el diámetro a la altura del pecho (DBH) con la altura relativa de árboles de *Tectona grandis* de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

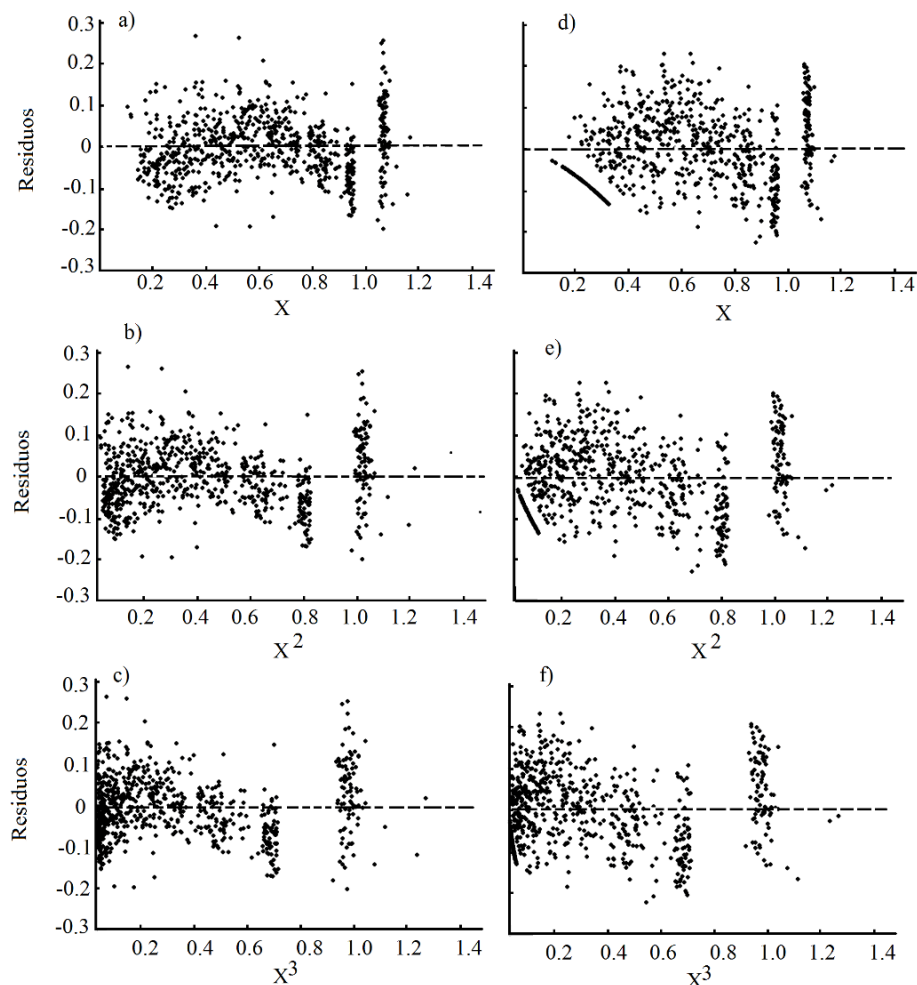
En la segunda etapa, que consiste en construir los modelos de perfil de fuste para la predicción del duramen a diferentes alturas, el modelo de Kozak (Tabla 3-M8) y Coffre (Tabla 3-M9) para la proporción del diámetro total ( $h_i$ ) con el DBH mostró un coeficiente de determinación del 0.95 y 0.99, con errores de 0.13 y 0.07 y coeficientes de variación de 30.39% y 12.35% respectivamente (Tabla 3 M8, M9), siendo mejor el modelo de predicción de Coffre (Tabla 3-M9). En tanto que los modelos de perfil de fuste, para la proporción diámetro de duramen diámetro a la altura del pecho ( $d_{iHW}$ )/DBH, presentaron un coeficiente de determinación de 0.92 y 0.96, un error de 0.09 y 0.09, y un coeficiente de variación de 41.79% y 22.62% respectivamente para Kozak (Tabla 3-M10) y Coffre (Tabla 3-M11).

**Tabla 3.** Modelo de regresión y sus estadísticos para el perfil del fuste usando los modelos de Kozak y Coffre para el diámetro total (A y B) y el diámetro de duramen (C y D) de árboles de *Tectona grandis* de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

Modelo	R <sup>2</sup>	Sxy	F-Value	CV
M8. modelo de Kozak	0.95	0.13	6596.02	30.39
$\frac{di^2}{DBH^2} = -2.13 * \left(\frac{hi}{Ht} - 1\right) + 1.08 * \left(\frac{hi^2}{Ht^2} - 1\right)$				
M9. modelo de Coffre	0.99	0.07	19069.44	12.35
$\frac{di}{DBH} = 1.52 * \left(\frac{Ht-hi}{Ht-1.3}\right) - 1.61 * \left(\frac{Ht-hi}{Ht-1.3}\right)^2 + 1.34 * \left(\frac{Ht-hi}{Ht-1.3}\right)^3$				
M10. modelo de Kozak	0.92	0.09	4329.09	41.79
$\frac{diHW^2}{DBH^2} = -1.56 * \left(\frac{hi}{Ht} - 1\right) + 0.90 * \left(\frac{hi^2}{Ht^2} - 1\right)$				
M11. modelo de Coffre	0.96	0.09	6712.44	22.62
$\frac{diHW}{DBH} = 1.17 * \left(\frac{Ht-hi}{Ht-1.3}\right) + 0.86 * \left(\frac{Ht-hi}{Ht-1.3}\right)^2 - 0.30 * \left(\frac{Ht-hi}{Ht-1.3}\right)^3$				

De los modelos mencionados anteriormente (Tabla 3 M8-M11) se utilizó el de Kozak para diámetro de duramen (Tabla 3-M10) como el mejor. Este modelo obtuvo una distribución de los residuos con la relación  $hi/Ht$  o  $hi^2/Ht^2$  normal de un perfil de fuste (Figura 6 a-b).

Los modelos de Coffre tanto para el diámetro total (Figura 6 a-b-c) como para el diámetro de duramen (Figura 6 d-e-f) fueron los que presentaron mejor ajuste para la descripción del perfil de fuste de árboles de teca, sus residuos muestran un comportamiento normal para este tipo de modelos de perfil de fuste, donde la distribución de los residuos se encuentra al azar en las tres variables de cada uno de los modelos (Figura 6 a-f).



**Figura 6.** Distribución del error del modelo de Coffre para el diámetro total [variable 1 (a), variable 2 (b) y variable 3 (c)], y para el diámetro de duramen variable [1 (d), variables 2 (e) y variable 3 (f)] de árboles de *Tectona grandis* de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

Basado en estos dos modelos de Coffre para diámetro total (Tabla 3-M9) y diámetro de duramen (Tabla 3-M11) se derivaron las curvas presentes en la figura 7, que predicen el diámetro y porcentaje de duramen a diferentes alturas y DBH de árboles de teca (Figura 7).

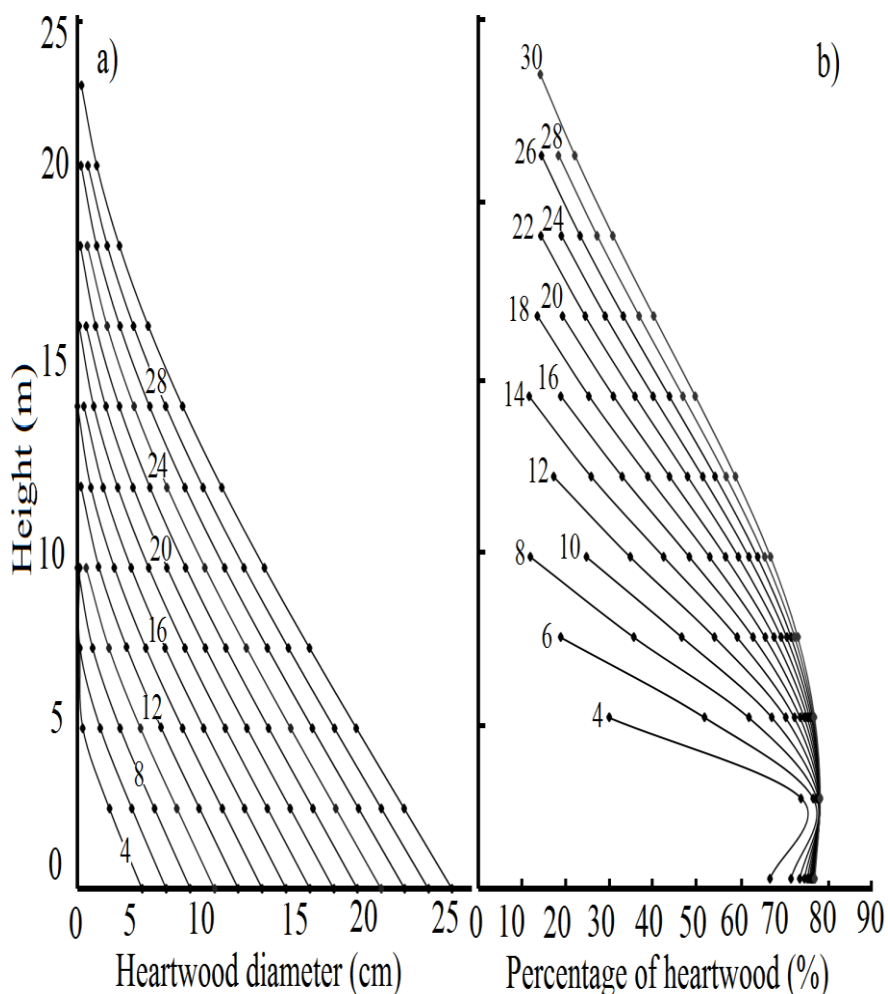
En el caso del diámetro del duramen fueron construidos los perfiles de duramen a diferentes alturas hasta un DBH igual a 30 cm, hasta llegar a su altura máxima donde ya no existe la presencia de duramen (Figura 8-a), utilizando el modelo de Coffre para diámetro de fuste (Tabla 3-M11). En el caso del porcentaje de duramen el perfil de variación a diferentes alturas se derivado del modelo de Coffre tanto para diámetro total (Tabla 3-M9) como para diámetro de duramen (Tabla 3-M11), donde se muestra un comportamiento irregular en la base del árbol, pero luego de 2.3 m de altura hacia la parte superior del árbol sigue la tendencia de disminuir hasta la altura donde desaparece el duramen (Figura 7-b).

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

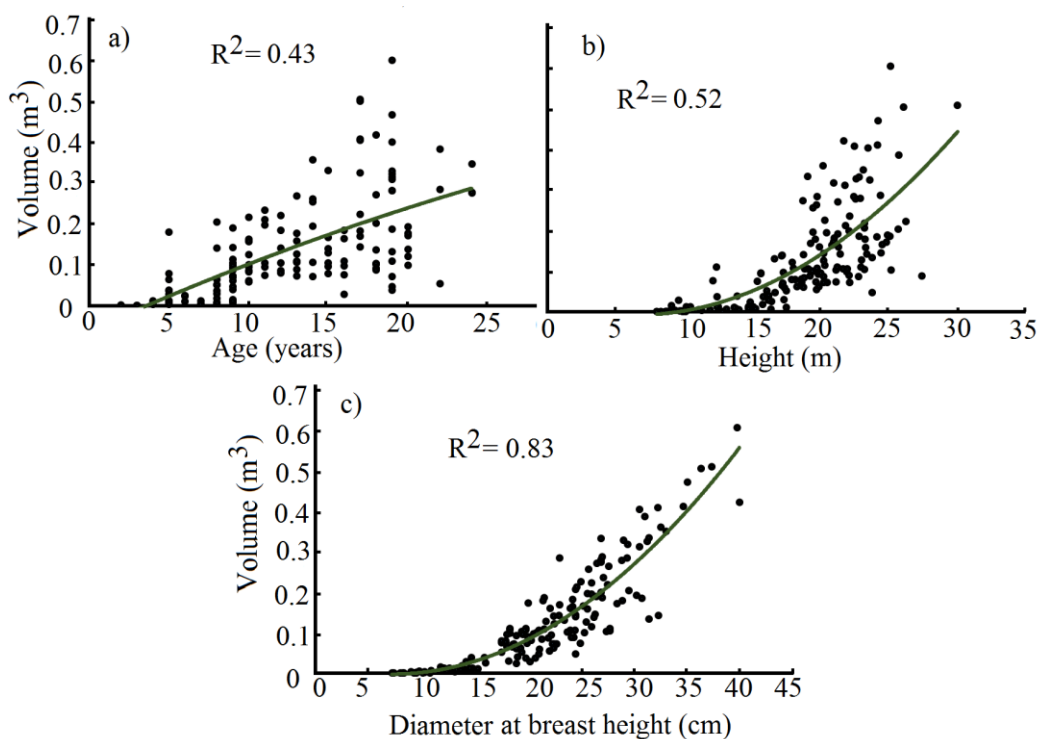




**Figura 7.** (a) Predicción del diámetro de duramen a diferentes alturas de muestreo y DBH usando el modelo de Coffre, (b) y predicción del porcentaje de duramen a diferentes alturas de muestreo y DBH usando el modelo de Coffre para el diámetro y diámetro de duramen, de árboles de *Tectona grandis* de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

(iii) *Predicción del volumen de duramen*

Nuevamente, basado en el modelo de Coffre para HWdiameter (Tabla 3-M11) y los modelos generados para derivar el volumen total de duramen con edad, altura y diferentes DBH (Tabla 4), se logró predecir el volumen de duramen a diferentes alturas, DBH y edad. Primeramente, la relación del volumen del duramen con estas 3 variables, mostró que en el caso de la edad de los árboles, el volumen de duramen aumenta linealmente (Figura 8-a), en el caso de la altura también aumenta, pero no linealmente, el volumen total de duramen (Figura 8-b), y el mismo comportamiento se presenta con el DBH, pero tampoco linealmente (Figura 8-c).



**Figura 8.** Relación del volumen de duramen con la edad (a), altura total (b) y diámetro a la altura del pecho (c), de árboles de *Tectona grandis* de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

Los modelos que describen la relación del volumen de duramen, con variables medidas en la plantación, mostraron nuevamente que la región donde crecen los árboles de teca no influye en el volumen de duramen, mientras DBH, altura total y edad si son variables que deben ser incluidas en los modelos de predicción del volumen (Tabla 4 M12-M17, Tabla 5 M12-M17).

**Tabla 4.** Modelos de regresión y sus estadísticos para el volumen de duramen de árboles de *Tectona grandis* de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

Modelo	R <sup>2</sup>	Sxy	F-Value	CV (%)
M12. $Y = \beta_1 + \beta_2 * DBH$	0.75	0.06	469.37	47.05
M13. $Y = \beta_1 + \beta_2 * Ht$	0.49	0.09	149.62	67.24
M14. $Y = \beta_1 + \beta_2 * Age + \beta_3 * DBH$	0.81	0.08	332.84	62.23
M15. $Y = \beta_1 + \beta_2 * Age + \beta_3 * Ht$	0.55	0.08	96.87	62.96
M16. $Y = \beta_1 + \beta_2 * Ht + \beta_3 * DBH$	0.75	0.06	239.33	46.74
M17. $Y = \beta_1 + \beta_2 * Age + \beta_3 * Ht + \beta_4 * DBH$	0.76	0.06	168.67	45.79

Nota:  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  y  $\beta_4$ : coeficientes de correlación. Ht: altura total del árbol. DHB: diámetro a la altura del pecho. R2: coeficiente de determinación. Sxy: error de muestreo. CV: coeficiente de variación.

El modelo que mejor predice el volumen de duramen es el que incluye el DBH y edad, ya que presenta coeficiente de determinación de 0.81 (Tabla 4-M14). Sin embargo, la edad no

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

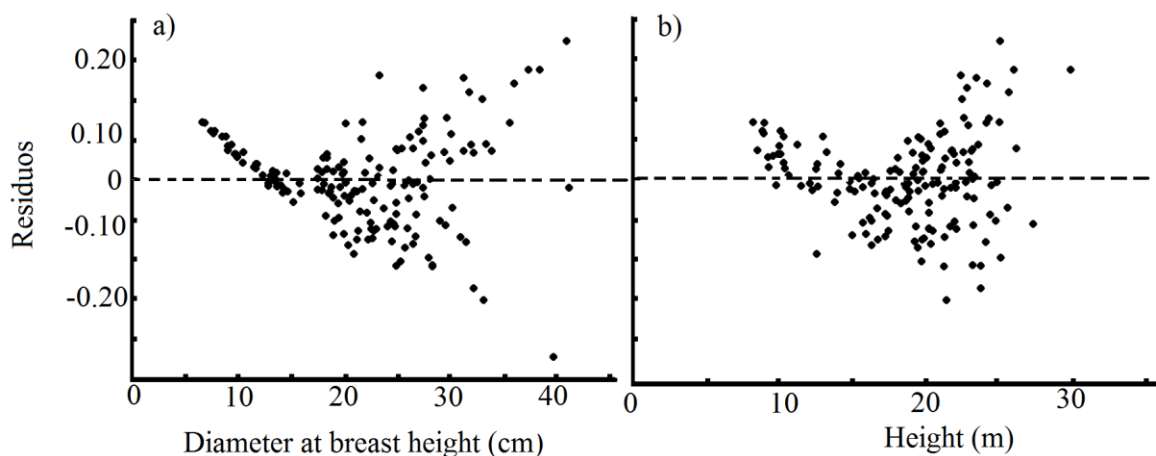
es una variable de medición directa en la plantación campo, por lo que el modelo que se seleccionó fue el que incluye la altura total y DBH con variables independientes, el cual posee un  $R^2$  terminación de 0.75, un error de 0.06 y un coeficiente de variación de 46.74% (Tabla 4-M16). La significancia para una de las variables así como los coeficientes de la ecuación se presentan en la Tabla 5, M16.

**Tabla 5.** Ecuación y significancia de los modelos de regresión para el volumen de duramen de árboles de *Tectona grandis* de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

Modelo	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	$\beta 4$
M12. $Y = \beta 1 + \beta 2 * DBH$	-0,1906**	0,0148**		
M13. $Y = \beta 1 + \beta 2 * Ht$	-0,1990**	0,0176**		
M14. $Y = \beta 1 + \beta 2 * Age + \beta 3 * DBH$	-0,2526**	-0,0005**	0,0236**	
M15. $Y = \beta 1 + \beta 2 * Age + \beta 3 * Ht$	-0,1837**	0,0075**	0,0119**	
M16. $Y = \beta 1 + \beta 2 * Ht + \beta 3 * DBH$	-0,1700**	-0,0033**	0,0167**	
M17. $Y = \beta 1 + \beta 2 * Age + \beta 3 * Ht + \beta 4 * DBH$	-0,1653**	0,0033**	-0,0044**	0,0156**

Nota:  $\beta 1$ ,  $\beta 2$ ,  $\beta 3$  y  $\beta 4$ : coeficientes de correlación. Ht: altura total del árbol. DHB: diámetro a la altura del pecho.  $R^2$ : coeficiente de determinación. Sxy: error de muestreo. CV: coeficiente de correlación.

La distribución de los errores de este modelo, para ambas variables dependientes, no muestra ninguna tendencia y los residuos se distribuyen completamente al azar (Figura 9 a-b).



**Figura 9.** Distribución del error del modelo de regresión para el volumen de duramen de las variables diámetro a la altura de pecho (a) y altura total (b) de árboles de *Tectona grandis* de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

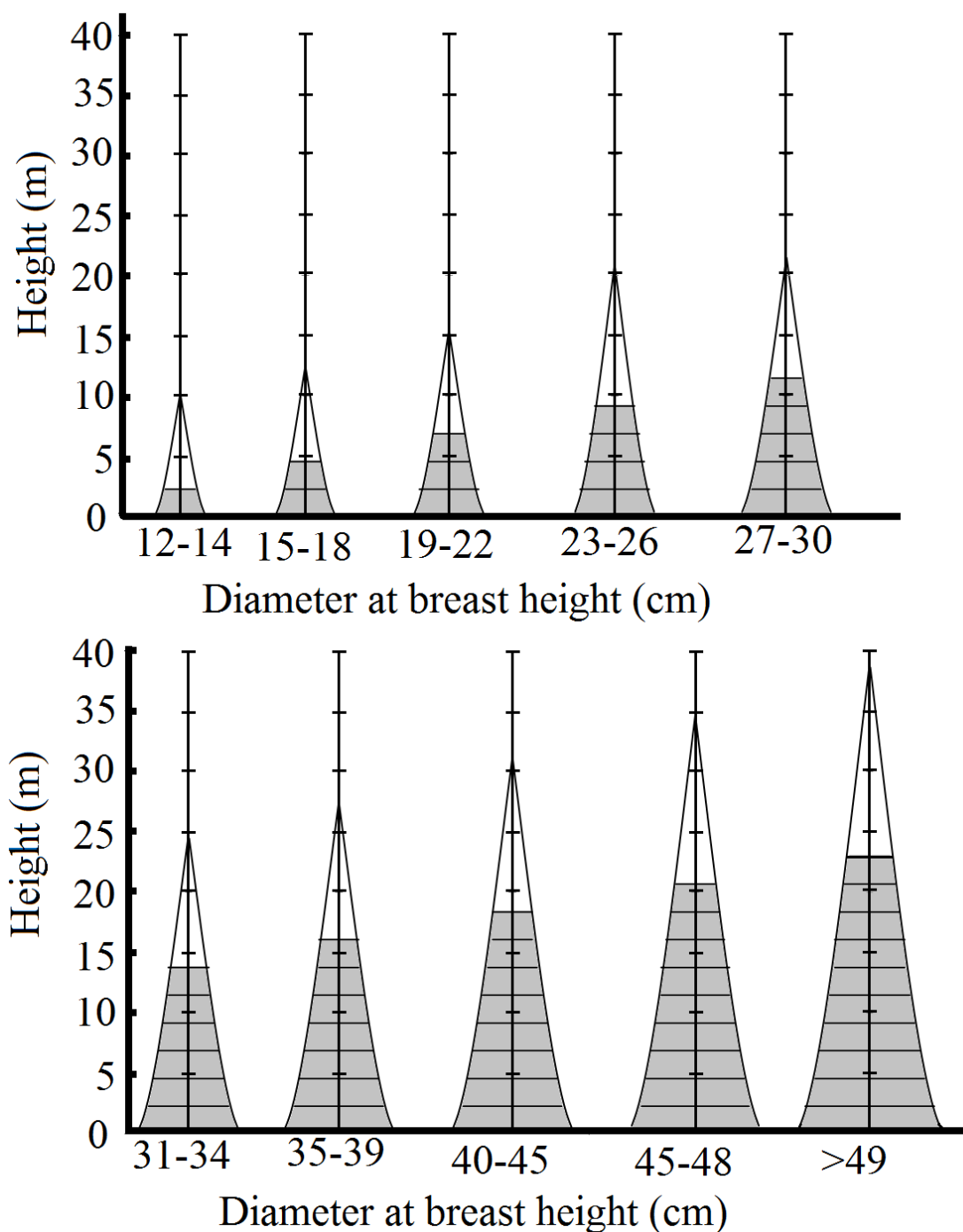
En la tabla 6 se presenta la tabla de volúmenes de duramen para arboles de teca con una variación del DBH entre los 12 y 30 cm, y alturas de 5.6 a 23.9 m (Tabla 6), los cuales fueron derivados del modelo lineal descrito en la tabla 5 y 6 (M16). A su vez utilizando nuevamente el modelo de Coffre para diámetro de duramen (Tabla 3-M11) permite determinar

la distribución de las trozas comerciales (diámetro de duramen mínimo de 7 cm) para diferentes diámetro de DBH (Figura 10).

**Tabla 6.** Volúmenes (m<sup>3</sup>) obtenidos con diferentes alturas y diámetros a la altura del pecho usando un modelo de regresión lineal para árboles de *Tectona grandis* de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

Altura (m)	Diámetro a la altura del pecho (cm)									
	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
5,6	0.012	0.046	0.079	0.113	0.146	0.180	0.213	0.246	0.280	0.313
7,5	0.006	0.039	0.073	0.106	0.140	0.173	0.207	0.240	0.274	0.307
9,2	0.000	0.034	0.067	0.101	0.134	0.167	0.201	0.234	0.268	0.301
10,8		0.028	0.062	0.095	0.129	0.162	0.196	0.229	0.263	0.296
12,4		0.023	0.057	0.090	0.124	0.157	0.191	0.224	0.258	0.291
13,8			0.052	0.085	0.119	0.152	0.186	0.219	0.253	0.286
15,2			0.047	0.081	0.114	0.148	0.181	0.215	0.248	0.282
16,5				0.076	0.110	0.143	0.177	0.210	0.244	0.277
17,8				0.072	0.105	0.139	0.172	0.206	0.239	0.273
19,1					0.101	0.135	0.168	0.202	0.235	0.269
20,3					0.097	0.131	0.164	0.198	0.231	0.265
21,5						0.127	0.160	0.194	0.227	0.261
22,7							0.156	0.190	0.223	0.257
23,9							0.152	0.186	0.219	0.253

Como es de esperar entre más pequeña sea la clase diamétrica menor va ser la cantidad de trozas comerciales, mientras que a DBH altos y alturas mayores la cantidad de trozas comerciales aumenta (Figura 10). También es posible de determinar que ya se obtiene una troza que puede ser comercializada en el mercado internacional cuando el árbol presenta un DBH de 12 cm (Figura 10) y que por cada 3 cm de aumento en el DBH del árbol, se aumenta una troza comercial en la parte alta del árbol



**Figura 10.** Representación de trozas comerciales con madera de duramen en árboles con diferentes diámetros a la altura del pecho y altura total, usando el modelo de Coffre para diámetros de duramen de árboles de *Tectona grandis* de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

## Análisis de Resultados

### (i) Predicción de la altura máxima de duramen

El incremento de HWh con la edad, Ht y DBH (Figura 2 a-c) en los árboles de teca de plantaciones de rápido crecimiento concuerdan con los resultados obtenidos en por Yang et al (1994) para *Cryptomeria japonica*, y por Gominho y Pereira (2000), Gominho et al. (2001) en *Eucaliptus globulus* y *Eucalyptus urograndis* quién indica que Hwh puede alcanzar 60 a 75% de la altura total del árbol y la variación se puede presentar por sitio. Así mismo Pinto et al. (2004), encontraron en *Pinus pinaster* este mismo comportamiento que se presenta en *T. grandis*, relación con la Ht, edad y DBH. Así mismo, los resultados obtenidos con las especies *Pseudotsuga menziesii* (Cardoso and Pereira, 2017), *Pinus sylvestries* (Flæte & Høibø, 2009) y *Acacia melanoxylon* (Igartúa et al., 2017) también concuerda con los resultados obtenidos en este estudio para *T. grandis*. Por otra parte Climent et al., (2003) en *Pinus canariensis* encontró un coeficiente altamente correlacionado (0.87) entre HWh y Ht, valor similar al encontrado en los árboles de teca, que fue de 0.83 (Figura 2).

Está claramente establecido que el duramen se presenta de una forma cónica en los árboles (Climent et al., 2003), tal y como se obtuvo en los árboles de este estudio (Figura 2 and 10), pero HWh se ve también influenciado por las condiciones de manejo, DBH, el sitio y el desarrollo de la copa (Wilkes, 1991, Yang et al., 1994). Este resultado demuestra lo reportado por Yang et al (1994) donde indica que las relaciones entre duramen y edad del árbol, Ht y DBH son parámetros importantes para la determinación del espesor de duramen.

Aunque se reportan varios estudios, donde muestran el modelo para estimar la Ht de los árboles de teca, como por ejemplo el reportado por Akindede (1991) para árboles de plantaciones de 20 años de edad en Nigeria, o los desarrollados por Upadhyay et al. (2005) para predecir la altura total y altura dominante de árboles de teca en la India entre edades de 4 a 10 años, no existen modelos que determinen específicamente HWh en árboles de teca, como el desarrollado en el presente estudio, que presenta por primera vez diferentes modelos para predecir HWh en los arboles de teca basados en Ht, edad de los árboles y DBH (Tabla 2 M7).

Aunque muchas investigaciones en otras especies han correlacionado la HWh basadas Ht, edad del árbol o DBH (Gominho y Pereira 2000, Gominho et al. 2001, Pinto et al., 2004, Cardoso and Pereira, 2017, Flæte & Høibø, 2009, Igartúa et al., 2017, Climent et al., 2003), pocos trabajos han desarrollado modelos para predecir HWh basados en estas variables, como los presentados en este estudio, que muestra la importancia de estos tres factores en la formación del duramen. No obstante para efectos de los árboles de *T. grandis*, y por una mayor facilidad fue seleccionado el modelo 7 (Tabla 2).

### (ii) Predicción del diámetro de duramen

La correlación encontrada entre  $HW_{\text{diameter}}$  y  $HW_{\text{percentage}}$  (Figura 4 a-b) concuerda con otras investigaciones que se han realizado en teca como la de Pérez and Kanninen (2003a), con árboles en Costa Rica entre la edad de 5 y 87 años, donde proponen un modelo de regresión logarítmico entre DBH y el  $HW_{\text{percentage}}$ . Este mismo modelo también lo propuso Kokutse et al., (2004), en árboles de teca en Tongo entre los 6 y 70 años de edad, un aspecto importante de destacar es que aunque la determinación del  $HW_{\text{diameter}}$  y  $HW_{\text{percentage}}$  con la

edad del árbol o la edad ha sido estudiada ampliamente (Pérez and Kanninen, 2003a,b 2005a,b), pocas estudios han relacionado estos parámetros a diferentes alturas del fuste de teca (García et al. 2011a,b; Miranda et al. 2011; Moya 2001).

El trabajo más destacado y concordante con las modelos de predicción del duramen, para los árboles de plantaciones forestales en Costa Rica, es los modelos de predicción realizado por García et al. (2011a,b) para el duramen de teca en plantaciones de rápido crecimiento en Brasil en edades de 3 a 12 años. Los autores incluyeron el diámetro a la altura del pecho (DBH) y la altura total del árbol (H) en su modelo. En el estudio desarrollado por García et al. (2011a), los modelos Garay, Demaerschalk y Omerod fueron desarrollados. De acuerdo a los autores el modelo de Garay fue el que mejor predice el  $HW_{\text{diámetro}}$  en los árboles de teca. Dicho modelo también presenta una similitud al modelo Kozak seleccionado en este estudio para predecir  $HW_{\text{diámetro}}$  (Tabla 3 M8-M11). Sin embargo al comparar el  $HW_{\text{diámetro}}$  en las diferentes alturas del estudio de García et al. (Figura 2, 2011a) determinado con el modelo de Garay contra el  $HW_{\text{diámetro}}$  a diferentes alturas del presente estudio con el modelo de Kozak (Figura 7a), se tiene que los  $HW_{\text{diámetro}}$  determinados por el modelo Garay, son de menor valor el que  $HW_{\text{diámetro}}$  determinado por el modelo de Kozak. Las diferencias probablemente son atribuidas al rango de edades utilizada en cada uno de los estudios, por ejemplo García et al. (2011a) utilizó árboles con edades de 2-a 10 años, en tanto que el presente estudio se utiliza un rango de edades más amplias, de 2 a 22 años. Los árboles de edades tempranas como el estudio de García et al. (2011a) se presentan porcentaje de duramen más bajos que se tienen cuando se estudian árboles de mayor edad (Moya et al., 20014), atribuyendo diferencias en la predicción del duramen en ambos estudios.

Diferentes modelos fueron evaluados para predecir el  $HW_{\text{diámetro}}$  a diferentes alturas, específicamente modelos de Kozak et al., (1969), y Coffre (1982) (Tabla 3). En la literatura se señalan distintos modelos para describir los cambios diamétricos que se presentan desde la base del árbol hasta la parte más alta del fuste utilizados en distintas especies, como por ejemplo los estudios de Kozak et al. (1969), Bruce et al. (1968), Goulding y Murray (1976), Coffre (1982), Amidon (1984), Lowell (1986) y Real (1989). Específicamente en teca el estudio de García et al., (2011a,b). Aunque ambos pueden ser utilizados acorde con los parámetros establecidos para seleccionar el modelo el que mejor ajusta son los de Coffre (Tabla 3 M9, M11), esto porque son lo que presentan un  $r^2$  más cercano a 1, un error de muestreo menor y un coeficiente de variación menor y se podrían aplicar en árboles creciendo en condiciones de las plantaciones de rápido crecimiento.

### (iii) Predicción del volumen de duramen

El volumen de duramen en el árbol se relaciona positivamente con la edad, Ht y DBH (Figura 8 a, b, c). Este resultado concuerda con otros estudios llevados a cabo en *T. grandis* por Bhat (1995) y Kjaer et al., (1999) en árboles de 8 y 17 años respectivamente, solo que estos autores relacionan el volumen de duramen con el DBH. Por otra parte, aunque García et al., (2011a,b) y Moya (2001) no establecieron modelos de predicción para el volumen de duramen, ellos si establecieron una correlación con la Ht del árbol. Otros estudios específicos, relaciona una de las 3 variables con el volumen de duramen, por ejemplo Kokutse et al., (2004) estudio árboles de teca creciendo en Nigeria; también encontraron, al igual que el presente estudio, que el volumen de duramen se correlaciona significativamente con la edad.

---

## INFORME FINAL DE PROYECTO

### “Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”



Pero resultados contradictorios al presente estudio son los reportados por Moya and Pérez (2008) y Kokutse et al. (2009) quienes no encontraron una correlación entre el volumen de duramen con la Ht del árbol en la plantación.

La literatura señala varios modelos de predicción de volumen utilizando variables como la Ht y DBH (Pérez and Kanninen, 2003b, Tewari and Mariswamy, 2013) sin embargo, la mayoría de los modelos utilizan principalmente el DBH y en muy limitadas ocasiones la Ht. En el caso del presente estudio indica que el modelo desarrollado para predecir el volumen (Tabla 4, Tabla 5 M16) mejora con la precisión en la inclusión de la Ht. Un aspecto importante a destacar de los modelos desarrollados, no sólo para el volumen de duramen si no para  $HW_{\text{diameter}}$  y  $HW_{\text{percentage}}$ , es que aunque estos fueron derivados de árboles/plantaciones creciendo en las condiciones climáticas de Costa Rica, sí es posible aplicar estos modelos a las plantaciones de las condiciones de crecimiento de todo el país. Lo anterior porque dichos modelos, además de representar la variabilidad de los sitios, se pueden aplicar a diferentes espaciamientos, condiciones de manejo, procedencia y edades del árbol. Así mismo estos modelos son de gran utilidad para desarrollar las tablas de volumen que son presentadas en la Tabla 6, determinando la cantidad de trozas con duramen que pueden ser comercializadas en el mercado internacional para las condiciones de crecimiento de los árboles de diferentes edades y DBH en Costa Rica.

Hoy en día, en Costa Rica se pueden encontrar tablas de volumen, como la desarrollada por Bermejo et al., (2004) en plantaciones de teca entre los 2 y 6 años de edad en la región del Pacífico Norte de Costa Rica o bien la tablas de volumen presentadas por Pérez y Kanninen (2003b) para la totalidad de Costa Rica y para edades que puede variar de 8 a 46 años. Sin embargo, una limitante que presentan esas tablas de volumen es que no cuantifican el duramen presente en los árboles de teca, aspecto importante ya que en su mayoría las trozas son categorizadas por esta parte del árbol para el mercado internacional (Moya et al., 2014, Camino and Morales, 2013, Arias et al., 2013). Por tanto en el caso de querer desarrollar estimaciones de volumen y trozas con duramen es posible utilizar los modelos propuesto (Tabla 4 M16) y distribución de las trozas (Figura 10) para tener una mayor precisión en las estimaciones de estas variables

En lo referente a la cantidad de trozas posibles de comercializar en el mercado internacional y en el caso de la madera de teca, la comercialización de teca a nivel mundial está dada por la cantidad de duramen que contengan las troza (Camino and Morales, 2013).

El mercado internacional solo permite comercializar las trozas que contengan un diámetro mínimo de duramen estipulado por el comprador que en este caso es aproximadamente 7 cm, así como el largo de la troza (Arias et al., 2013, Ugalde et al., 2013). Entonces los modelos desarrollados para predecir  $HW_{\text{diameter}}$ , nos permite la predicción de trozas comerciales según diferentes categorías diamétricas y alturas de árboles de teca (Figura 10). Finalmente, otro aspecto que puede ser derivado de la predicción de la cantidad de trozas comerciales es que por un aumento 3,5 cm en el DBH, aumenta una troza comercial en la parte alta del árbol (Figura 10), esto porque las trozas comerciales presentan unidades en diámetro de 2,5 cm.

## Conclusiones

---

### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

1. A pesar de la variación observada, tanto dentro de las parcelas como entre los árboles muestreados, los resultados del presente estudio mostraron que el diámetro de duramen y el volumen de duramen pueden ser altamente predichos en *Tectona grandis* a partir de las variables de DBH y de Ht.
2. Los modelos que se puedan aplicar en *Tectona grandis* para predecir el HWh fueron:  
 $Y \text{ (m)} = -8.37 + 0.83 \cdot Ht + 0.23 \cdot DBH$ , para  $HW_{\text{diámetro}}$  a cualquier altura fue  $diHW/DBH = 1.17 \cdot ((Ht - hi)/(Ht - 1.3)) + 0.86 \cdot ((Ht - hi)/(Ht - 1.3))^2 - 0.30 \cdot ((Ht - hi)/(Ht - 1.3))^3$  y para el volumen de duramen fue  $Y \text{ (m}^3\text{)} = -0.17 + -0.003 \cdot Ht + 0.017 \cdot DBH$ , basados en los criterios de selección donde presentan valores de  $R^2$  de 0.85, 0.96 y 0.75, respectivamente.

## Referencias

- Akindede, S. O. (1991). Development of a site index equation for teak plantations in southwestern Nigeria. *Journal of Tropical Forest Science*, 162-169.
- Alder, D. (1980). Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos (No. CIDAB-SD391-F6e-22/2). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Amidon, E. L. (1984). A general taper functional form to predict bole volume for five mixed-conifer species in California. *Forest Science*, 30(1), 166-171.
- Anish, M.C., Anoop, E.V., Vishnu, R., Sreejith, B., 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.
- Arias, U., Luis Alberto Monteuuis, O., Prada, J. A., Litz, R. E., Rodríguez, O., Mora, R. F., ... & ME Mesén, F. (2013). Teak: new trends in silviculture, commercialization and wood utilization (No. 634.97396 U26). *International Forestry and Agroforestry (INFOA)*, Cartago (Costa Rica).
- Ball, J. B., Pandey, D., & Hirai, S. (1999, January). Global overview of teak plantations. In *Regional seminar on site, technology and productivity of teak plantations*. Chiang Mai, Thailand (Vol. 2629, p. 1134).
- Bamber, R. K. (1976). Heartwood, its function and formation. *Wood Science and Technology*, 10(1), 1-8.
- Bamber, R. K., & Fukazawa, K. (1985, September). Sapwood and heartwood: a review. In *Forestry abstracts* (Vol. 46, No. 9, pp. 567-580).
- Bermejo, I., Canellas, I., & San Miguel, A. (2004). Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 189(1), 97-110.
- Berrocal, et al., 2018. Development of heartwood, sapwood, bark, pith, specific gravity and dynamic modulus of elasticity of teak (*Tectona grandis*) in fast-growth plantations in Costa Rica.
- Bhat, K. M. (1995). A note on heartwood proportion and wood density of 8-year-old teak. *Indian Forester*, 121(6), 514-517.
- Bruce, D., Curtis, R. O., & Vancoevering, C. (1968). Development of a system of taper and volume Tables for red alder. *Forest Science*, 14(3), 339-350.

- Cardoso, S., & 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.
- Camino, R. D., & Morales, J. P. (2013). Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades. Turrialba: CATIE.
- Climent, J., Chambel, M. R., Gil, L., & 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.
- Coffre, M. (1982). Modelos fustales (Doctoral dissertation, Tesis Ing. For. Universidad Austral De Chile). Facultad de Ingeniería Forestal. 44 pp.
- Datta, S. K., & Kumar, A. (1987). Histochemical studies of the transition from sapwood to heartwood in *Tectona grandis*. *IAWA Journal*, 8(4), 363-368.
- Draper, N. R., & Smith, H. (1998). Wiley series in probability and statistics. *Applied Regression Analysis*, Third Edition, 707-713.
- FAO (2013) Natural teak forests decline, while planted teak forests increase. News article. Food and Agricultural Organisation of United Nations. <http://www.fao.org/news/story/en/item/129569/icode/>. Accessed 20 October 2017
- FAO, 2006. Global planted forest thematic study: results and analysis, In: Del Lungo J.B. and Carle J. (Eds.), *Planted Forests and trees: Working paper 38*, Rome.
- Flæte, P. O., & Høibø, O. (2009). Models for predicting vertical profiles of heartwood diameter in mature Scots pine. *Canadian journal of forest research*, 39(3), 527-536.
- García H, Marques da Silva ML, Bedra DH, Fardin L, Takizana FH (2011a) Estimation of inside-bark and heartwood diameter for *Tectona grandis* Linn. trees using artificial neural networks. *Eur J For Res* 130:263–269
- García H, Rodrigues de Oliveira R, Monte MA, Fardin L, Mazon de Alcantara A, Marques da Silva ML, Vinícius R (2011b) Taper models of heartwood of *Tectona grandis* L.f. *Sci For* 39(89):53–59 (in Portuguese)
- Gominho, J., Figueira, J., Rodríguez, J.C., Pereira, H.. 2001. Within-tree variation of heartwood, extractives and wood density in the eucalypt hybrid urograndis (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*). *Wood and Fiber Science*, 33(1), 3-8.
- Gominho, J., Pereira, H., 2000. Variability of heartwood content in plantation-grown *Eucalyptus globulus* Labill. *Wood and Fiber Science*, 32(2), 189-195.
- Goulding, C. J., & Murray, J. C. (1976). Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. *NZJ For. Sci*, 5(3), 313-322.
- Gyi, K. K., & Tint, K. (1998). Management status of natural teak forests. RAP Publication (FAO).
- Hegde, H.T., Kalkoor, M.A., Jha, S.K., 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.
- Hillis, W. E. (2012). *Heartwood and tree exudates* (Vol. 4). Springer Science & Business Media.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica). 2017. Datos Climáticos. Disponible en <https://www.imn.ac.cr/web/imn/inicio> recuperado el 07 noviembre, 2017.
- Igartúa, D. V., Moreno, K., & Monteoliva, S. E. (2017). *Acacia melanoxylon* in Argentina: heartwood content and its relationship with site, growth and age of the trees. *Forest Systems*, 26(1), 007.

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

- Kampe, and Magel, E., 2013. New insights into heartwood and heartwood formation. In J. Fromm (ed.), Cellular Aspects of Wood Formation, Plant Cell Monographs 20, DOI 10.1007/978-3-642-36491-4\_3, # Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013
- Kjaer, E. D., Kajornsrichon, S., & Lauridsen, E. B. (1999). Heartwood, calcium and silica content in five provenances of teak (*Tectona grandis* L.). *Silvae genetica*, 48(1), 1.
- Kokutse, A. D., Adjonou, K., Kokou, K., & Gbeassor, M. (2009). Comparative performance of Tanzanian teak versus local teak planted in Togo. *Bois et Forêts des Tropiques*, (302), 43-52.
- Kokutse, A. D., Bailleres, H., Stokes, A., & Kokou, K. (2004). Proportion and quality of heartwood in Togolese teak (*Tectona grandis* Lf). *Forest Ecology and Management*, 189(1), 37-48.
- Kokutse, A. D., Stokes, A., Kokutse, N. K., & Kokou, K. (2010). Which factors most influence heartwood distribution and radial growth in plantation teak?. *Annals of forest science*, 67(4), 407.
- Kollert, W., & Cherubini, L. (2012). Planted Forests and Trees Working Paper Series. Teak resources and market assessment 2010 (*Tectona grandis* Linn. F.). Forestry department FAO.
- Kozak, A., Munro, D. D., & Smith, J. H. G. (1969). Taper functions and their application in forest inventory. *The Forestry Chronicle*, 45(4), 278-283.
- Kumar, A., 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*, 5(4), 338-344.
- Lourenço, A., Neiva, D. M., Gominho, J., Marques, A. V., & 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.
- Lowell, K. E. (1986). A flexible polynomial taper equation and its suitability for estimating stem profiles and volumes of fertilized and unfertilized Radiata pine trees. *Australian forest research*, 16(2), 165-174.
- Miranda, I., Sousa, V., & 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.
- Morataya, R., Galloway, G., Berninger, F., Kanninen, M., 1999. Foliage biomass—sapwood area and volume relationships of *Tectona grandis* L.f. and *Gmelina arborea* Roxb.: silvicultural implications. *For. Ecol. Manage.* 113, 231–236.
- Moya R (2001) Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from Buen Precio Company. *Las Maderas de Plantaciones forestales*, ITCR, vol 1, pp 1–8 (in Spanish)
- Moya, R., & 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.
- Moya, R., Bond, B., Quesada-Pineda, H. (2014). A review of heartwood properties of *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations. *Wood Science and Technology* 48(2): 411-433
- Nawrot M, Pazdrowski W, Szymanski M (2008) Dynamics of heartwood formation and axial and radial distribution of sapwood and heartwood in stems of European larch (*Larix decidua* Mill.). *J For Sci* 9:409–417
- Nunifu, T. K., & Murchison, H. G. (1999). Provisional yield models of teak (*Tectona grandis* Linn F.) plantations in northern Ghana. *Forest Ecology and management*, 120(1), 171-178.

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

- Okuyama T, Yamamoto H, Wahyud I, Yusuf Sudo Had Y, Bhat KM (2005) Some wood quality issues in planted teak. In: Quality timber products of teak from sustainable forest management. Proceedings Wood Sci Technol (2014) 48:411–433 431
- Pandey, D., & Brown, C. (2000). Teak: a global overview. UNASYLVA-FAO-, 3-13.
- Pérez, D. (2008). Growth and volume equations developed from stem analysis for *Tectona grandis* in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science*, 66-75.
- Pérez, D., & Kanninen, M. (2005a). 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.
- Pérez, D., & Kanninen, M. (2005b). Stand growth scenarios for *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and management*, 210(1), 425-441.
- Pérez-Cordero, L. D., & Kanninen, M. (2003a). Heartwood, sapwood and bark content, and wood dry density of young and mature teak (*Tectona grandis*) trees grown in Costa Rica. Contenido de duramen, albura y corteza, y densidad de la madera seca de árboles de teca jóvenes y maduros (*Tectona grandis*) cultivados en Costa Rica. *Silva Fennica*., 37(1), 45-54.
- Pérez-Cordero, L. D., & Kanninen, M. (2003b). Provisional equations for estimating total and merchantable volume of *Tectona grandis* trees in Costa Rica. *Forests, Trees and Livelihoods*, 13(4), 345-359.
- Pinto, I., Pereira, H., Usenius, A., 2004. Heartwood and sapwood development within maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stems. *Trees* 18(3), 284-294.
- Real, P. L., Moore, J. A., & Newberry, J. D. (1989). Principal components analysis of tree stem profiles. *Canadian Journal of Forest Research*, 19(12), 1538-1542.
- Rojó, A., Perales, X., Sánchez-Rodríguez, F., Álvarez-González, J. G., & Von Gadow, K. (2005). Stem taper functions for maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Galicia (Northwestern Spain). *European Journal of Forest Research*, 124(3), 177-186.
- Sanwo SK (1990) The relationship between rate of growth and strength in plantation grown teak (*Tectona grandis* L.f.). *J Trop For Res* 2: 9-13
- Schlaegel, B. E. (1981, June). Testing, reporting, and using biomass estimation models. In *Southern Forest Biomass Workshop* (Vol. 1, pp. 95-112).
- Solórzano S, Moya R, Chauhan S (2012a) Early genetic evaluation of morphology and some wood properties of *Tectona grandis* L clones. *Silvae genetica* 61: 58-65.
- Solórzano, S., Moya, R., & Murillo, O. (2012b). 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
- Spicer R (2005) Senescence in secondary xylem: heartwood formation as an active developmental program. In: Holbrook NM, Zwieniecki MA (eds) *Vascular transport in plants*. Elsevier Academic, Amsterdam. doi:10.1016/B978-012088457-5/50024-1
- Taylor, A. M., Gartner, B. L., & Morrell, J. J. (2007). Heartwood formation and natural durability—a review. *Wood and Fiber Science*, 34(4), 587-611.
- Tewari, V. P., Álvarez-González, J. G., & García, O. (2014). Developing a dynamic growth model for teak plantations in India. *Forest Ecosystems*, 1(1), 9.
- Tewari, V. P., & Mariswamy, K. M. (2013). Heartwood, sapwood and bark content of teak trees grown in Karnataka, India. *Journal of forestry research*, 24(4), 721-725.
- Thulasidas, P. K., Bhat, K. M., & Okuyama, T. (2006). Heartwood colour variation in home garden teak (*Tectona grandis*) from wet and dry localities of Kerala, India. *Journal of Tropical Forest Science*, 51-54.

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

- Trockenbrodt, M., & Josue, J. (1999). Wood properties and utilisation potential of plantation teak (*Tectona grandis*) in Malaysia. *Journal of Tropical Forest Products*, 5, 58-70.
- Upadhyay, A., Eid, T., & Sankhayan, P. L. (2005). Construction of site index equations for even aged stands of *Tectona grandis* (teak) from permanent plot data in India. *Forest ecology and management*, 212(1), 14-22.
- Viquez, E., & 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.
- Wang, X., Wang, C., Zhang, Q., & Quan, X. (2010). Heartwood and sapwood allometry of seven
- Wilkes, J., 1991. Heartwood development and its relationship to growth in *Pinus radiata*. *Wood Science and Technology*, 25(2), 85-90. Chinese temperate tree species. *Annals of Forest Science*, 67(4), 410.
- Yang, K. C., Chen, Y. S., Chiu, C., & Hazenberg, G. (1994). Formation and vertical distribution of sapwood and heartwood in *Cryptomeria japonica* D. Don. *Trees-Structure and Function*, 9(1), 35-40.

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

4. **Artículo 3. Development of heartwood, sapwood, bark, pith, specific gravity and dynamic modulus of elasticity of teak (*Tectona grandis*) in fast-growth plantations in Costa Rica.**
- 

**Development of heartwood, sapwood, bark, pith, specific gravity and dynamic modulus of elasticity of teak (*Tectona grandis*) in fast-growth plantations in Costa Rica**

**Alexander BERROCAL**

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [aberrocal@itcr.ac.cr](mailto:aberrocal@itcr.ac.cr)

**David FERNÁNDEZ-SÓLIS**

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [davfersolis@yahoo.com](mailto:davfersolis@yahoo.com)

**Johana GAITAN-ALVAREZ**

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [jgaitan@itcr.ac.cr](mailto:jgaitan@itcr.ac.cr)

**Edgar ORTIZ-MALAVASSI**

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [ortiz@itcr.ac.cr](mailto:ortiz@itcr.ac.cr)

**Róger MOYA\***

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [rmoya@itcr.ac.cr](mailto:rmoya@itcr.ac.cr)

\*Authors correspondence, Email: [rmoya@itcr.ac.cr](mailto:rmoya@itcr.ac.cr)

---

**INFORME FINAL DE PROYECTO**

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

## Development of heartwood, sapwood, bark, pith, specific gravity and dynamic modulus of elasticity of teak (*Tectona grandis*) in fast-growth plantations in Costa Rica

**Short title:** Morphological characteristic in teak trees.

### Abstract

The development of height and diameter in trees in fast growing teak plantations in Costa Rica is known. Less known is the development of the patterns of heartwood, bark, sapwood and pith. The aim of the present work is to determine the behaviour of these morphological variables, as well as the specific gravity (SG) and dynamic modulus of elasticity (MOEd) of fast growing teak (*Tectona grandis*) trees in different regions of Costa Rica. Fifty five plantations from 5 regions were sampled by choosing 3 trees per plantation. Each one of the variables studied was modelled with the age and site at different tree heights. The region where the plantations grew showed no effect on the diameter at breast height (DBH), total height, heartwood and pith diameter and bark and sapwood thickness. The age and stand density showed significant statistical correlation with diameter at breast height and total height of tree. The heartwood starts to develop from 4 years of age and its proportion increases with age. The proportion of bark remains constant along the tree, while the percentage of bark increases in old trees and at greater heights. The pith diameter and the MOEd measured for the standing tree showed no correlation with age, while the SG presented a positive correlation with respect to the age.

Keywords: growth, dasometric parameters, morphology, tree development.

### Introduction

Teak (*Tectona grandis* Linn.f.) is native to India, Laos, Myanmar and Thailand (Gyi and Tint 1998). Teak wood is durable and has good aesthetic quality (Thulasidas et al. 2006) which makes it valuable in the international market (Kollert and Cherubini 2012), reason why plantations of this species have expanded in tropical zones of Latin America, Asia, Africa and Oceania (FAO 2006). According to estimations, approximately 4.35 million hectares of teak have been planted in 52 different countries (Kollert and Cherubini 2012).

The cycles of teak plantations vary from 15 to 30 years (Moya et al. 2014), contrary to the concept applied in the previous century in Asian countries, where rotations of 70 years were used (Moya et al. 2014). As a consequence, the trees present great proportion of juvenile wood and low proportion of heartwood, with clearer colour than the colour of wood from trees in natural forests; the wood is less durable and the marketable volume from plantations is lower compared to the volume of wood from trees from natural forests (Moya and Marín 2011; Kollert and Cherubini 2012; Moya et al. 2014).

The heartwood appears with the aging of the tree and it is controlled by diverse physiological processes, environmental conditions, soil fertility and genetic composition of the tree (Kampe and Magel 2013; Moya et al. 2014). In general, a high proportion of heartwood and low proportion of sapwood make trees excellent for the sawlog industry and market

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**



development (Hegde et al. 2014). Because of the relevance of these two aspects of heartwood, much research has focused in the study of its formation, measurement and variation during different growth stages, particularly in teak trees (Miranda et al. 2011; Moya et al. 2014; Anish et al. 2015; Kumar and Dhillon 2015).

Models have been developed that describe the relationship between the heartwood of teak trees and variables such as diameter at breast height (DBH) and tree height (Ht) (García et al. 2011a and 2011b). There are also models that relate the diameter and percentage of heartwood with the age by utilizing the DBH as a reference (Pérez and Kanninen 2003; Kokutse et al. 2004). Models for the formation of heartwood (diameter and percentage) at different tree heights have also been developed (Trockenbrodt and Josue 1999; Bhat et al. 2001; Pérez and Kanninen 2003). However, despite these important studies, research is yet to be conducted on the formation of the heartwood and other tree parts such as bark, pith and sapwood thickness in trees from fast-growth plantations at different ages, Ht and stand density (Moya et al. 2014).

Moya et al. (2014), in a recent revision of the formation of heartwood in fast-growth teak plantations, suggest that heartwood formation starts when the tree is between 4 and 6 years old. This suggestion is supported by several studies, among them, Solórzano et al. (2012b) in 4-year-old teak trees, who found 12% proportion of heartwood at the base of the trees. Likewise, Moya et al. (2014) indicate that the thickness of the sapwood is not related to age, DBH and site conditions, and it ranges between 2 and 5 cm. In addition, the studies conducted by Trockenbrodt and Josue (1999) and Moya (2001) confirm that sapwood thickness is not related with DBH nor with Ht.

Another wood property worth evaluating due to its influence on other properties is specific gravity (SG) (Sinha et al. 2017). This parameter shows the relationship between density of the mass and a specific volume, referenced by the density of the water (Ross 2010). The specific gravity of fast growing trees shows no clear tendency, sometimes increasing, decreasing or remaining stable with age, tree height, site, etc., and continues to be considered an intrinsic characteristic of each species (Zobel and Van; Buijtenen 1989; Moya et al. 2015; Tenorio et al. 2016). The relationship of specific gravity with other silvicultural variables such as management, genetics, region and altitude are not clearly established, since the value of SG results from the interaction of all the mentioned factors (Zobel and Van Buijtenes 1989).

The wood properties, such as SG, are affected by climate and soil type (Cutter et al. 2007), which in turn affect heartwood formation, physical and mechanical properties and the chemical compositions of the trees in fast-growth teak plantations (Bhat et al. 2001; Pérez and Kanninen 2003; Kokutse et al. 2004; Bhat et al. 2005; Thulasidas and Bhat 2007).

A number of studies have shown that the variation of the SG of trees of fast-growth teak plantations in Costa Rica depends on the fertility of the soil (Alvarado and Fallas 2004; Moya et al. 2009), age of the trees (Moya and Marín 2011), different clonal trees (Moya and Marín 2011; Moya et al. 2013). Conversely, other studies by Moya and Perez (2008) found that the properties of the soil do not influence the physical and chemical properties of teak. Perez and Kanninen (2005), on the other hand, concluded that the SG does not relate to the site conditions where the trees grow. An important aspect of these studies is that they are specific for these conditions, not for a behaviour by age or Ht of the tree, so as to show the variation of the trees under these two conditions in Costa Rica.

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

Despite being a small-sized country, Costa Rica has a significant area reforested with teak. The soils in Costa Rica are variable, as is their fertility (Bermejo et al. 2004). Climate conditions are varied; precipitation, in particular, is changeable from one to another close-by place (Clark et al. 2010). Another aspect of teak plantations in Costa Rica is that it is possible to commercialize the wood since very early ages (4-5 years) up to its rotation (18-25 years) (ONF 2015).

Despite the important area of teak plantations in Costa Rica, which have been established in sites with variable climatic and fertility conditions, and are commercialized since early ages, there is lack of information on the development of the heartwood and other morphological parameters of the trees of these fast-growth plantations. Therefore, the objective of the present work is to study the behaviour of the diameter, Ht, diameter of the heartwood, thickness of the sapwood, bark and pith, percentage of heartwood, sapwood, pith and bark, together with the SG and dynamic modulus of elasticity of trees produced in fast-growth teak plantations in Costa Rica, at different ages and in different regions.

## Methodology

### Study area

Fiftyfive fast-growth plantations of *Tectona grandis* (teak) were sampled in different regions of Costa Rica: the North Pacific, South Pacific, Central Pacific, Atlantic and Northern Zone, the different plantations sampled were located in these regions as we can see in Figure 1. The plantations sampled presented different ages and plantation density. The age of plantation varied from 2 to 22 years.

[Figure 1]

### Plantation characterization and tree morphological characteristics

Total height and the diameter at breast height (DBH) were measured in each sampled plots. Each temporary sample plot had a 3 m-radius (531 m<sup>2</sup>) temporary plot, in which all trees were measured by their DBH and total tree height. Density of the plantations were determinate with the data plot, where the amount of trees obtained in the temporary plot (531 m<sup>2</sup>) were extrapolated to one hectare (10000 m<sup>2</sup>).

### Sampling and tree variables measured

From each plantation, three trees near to the temporary plot were randomly selected and cut. Felled trees had a straight trunk, normal branching, and no disease or pest symptoms, in total, one hundred sixty five trees were sampled. Diameter at breast height (DBH) was measured in each sampled tree, and total tree height was recorded having the tree on the ground. Then, a disc approximately of 4 cm thick was cut at the base of the tree and additional discs were taken every 2.3 m from the base to the treetop. During this process, the height in meters at which each disk was cut—which corresponds to the distance from the base of the tree to the height of this sampling—was recorded.

### Measurements the discs

Mean diameter, diameter without bark, heartwood diameter (HW<sub>diameter</sub>) and pith diameter (Pith<sub>diameter</sub>), were measured on each disc, using two cross-sectional lines drawn in

two directions (north-south and east-west). The differences in color determined the sapwood-heartwood diameters, and concentric circles draw in the discs allowed to calculate their diameters and areas, including disc area, as well as heartwood and pith area. Bark content was determined from the difference between total area and area without bark.

### **Data analysis**

The following parameters were determined from the measurements on the discs: relative sampling height, heartwood diameter ( $HW_{\text{diameter}}$ ), sapwood thickness ( $SW_{\text{thickness}}$ ), bark thickness ( $Bark_{\text{thickness}}$ ), pith diameter ( $Pith_{\text{diameter}}$ ), and the percentages of those variables heartwood percentage ( $HW_{\text{percentage}}$ ), sapwood percentage ( $SW_{\text{percentage}}$ ), bark percentage ( $Bark_{\text{percentage}}$ ) and pith percentage ( $Pith_{\text{percentage}}$ ).  $SW_{\text{thickness}}$  was determined by the difference between the disc diameter without bark and  $HW_{\text{diameter}}$  and divided in two. Where there was no presence of heartwood,  $SW_{\text{thickness}}$  was estimated as the difference between the disc diameter without bark and the mean of the  $Pith_{\text{diameter}}$ , divided in half. The percentages were, calculated as the area of each variable with respect to the disc cross-section area and expressed as a percentage.

The dynamic elastic modulus in green lumber (MOEd) was derived from Equation 2, with the measure of the ultrasound velocity in each disc without bark, the velocity was measured in two directions north-south and east-west, it was used a SYLVATESTDUO ultrasound equipment with 22 kHz transducers. Then the weight and volume were determined for this sample using the water displacement method specified by standard ASTM D-2395-02 (ASTM 2003a).

$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

$$MOEd = V^2 \times d \times 10^{-6} \quad (2)$$

Where:  $V$  = ultrasound velocity in  $m \text{ s}^{-1}$ ,  $L$ = sample length in meters,  $T$ = time required by ultrasound pulse propagation to travel from one end of the board to the other in  $\mu\text{s}$ ,  $MOEd$ = dynamic elastic modulus in GPa and  $D$ = wood density in  $m^{-3}$ .

Specific gravity (SG) was calculated with the measure of using a 3 cm-wide block cut along the center, from north-south (including the pith), of each disc and divided into two subsamples (cut into half). The weight and volume of both diametral subsamples were determined when green according to standard ASTM D-2395-02 (ASTM 2003a) and then the samples were kiln dried at 105°C for 24 hours to determine the weight and volume of dry wood. The green and kiln-dried weight and volume were used to calculate SG using the standard ASTM D-143-94 (ASTM 2003b).

### **Statistical methods**

First, it was checked the normality and homoscedasticity of all variables measured, then different model to see the behavior of the variables with the age, plantation density and region were studied. Different linear and quadratic regression models were carried out. The first models were developed for the plot data, in which independent variables such as age, region, age\*region interaction and density were used. However, the region and the region interaction with age did not present any significance, so they were not studied. Therefore, age and plantation density independent variables were used for DBH and total height variables (Table 1). The second's models were for all trees but using only the measurements obtained

at a height of 2.50 m, the independent variable used was age, since region does not present significance; these models were carried out for all variables studied (Table 2). Finally, a surface analysis was performed as graphical support to different polynomial correlations, aiming at interpreting the most important variable interaction with dendrograms, using different age and different height of the tree as independent variable.

Statistical parameters such as coefficient of determination, standard error, F-value and coefficient of variation were used to describe the models developed. In addition, residuals errors were plotted with the independent variable, to see the tendency and behavior of these errors. The models were obtained using Excel and Statistica software.

## Results

### ***Teak morphology in Costa Rica***

DBH and Ht variation with respect to age adjusted better with the linear regression models (Table 2). In addition, the DBH and Ht showed no relationship with the region or site of the plantations, but are significantly correlated not only to the age, but also to the density of the stand where the tree is growing (Table 1). The model statistics showing the relationship indicate that the variable DBH is explained in 64% by age and stand density, with 3.64 model error and a coefficient of variation of 16%, while the Ht is explained in 57% by age and the stand density, with 3.24 model error and a coefficient of variation of 17% (Table 1). Figure 2 shows the graphical representation of the behaviour of the DBH and Ht with the two correlated variables. The remainders of both models, for age and for stand density were acceptable, since they do not present any pattern but develop completely randomized (Figure 2c).

[Table 1]

[Figure 2]

### ***Heartwood variation in trees in fast-growth teak plantations***

The models developed for diameter variation and percentage of heartwood ( $HW_{\text{diameter}}$  and  $HW_{\text{percentage}}$ ) showed no relationship with the region where the tree grows. The  $HW_{\text{diameter}}$  and  $HW_{\text{percentage}}$  at 2.50 m is explained only by the age in 60% and 65% respectively (Table 2), with errors for  $HW_{\text{diameter}}$  of 4.07 and a coefficient of variation of 38%, and for  $HW_{\text{percentage}}$  the error was of 10.93 and a coefficient of variation of 33% (Table 2). The tendency of both variables was to increase as the age of the tree increased (Figure 3a-b). The remainders of both models are acceptable, since they show no tendency and are completely randomized (Figure 3c-d).

[Table 2]

[Figure 3]

As regards to the variation of  $HW_{\text{diameter}}$  and  $HW_{\text{percentage}}$  with age and at different heights, Figure 4 shows the model and its graphic behavior. The variation for both variables is governed by the model  $Z = a + b \cdot \text{age} + c \cdot \text{height} + d \cdot \text{age}^2 + e \cdot \text{age} \cdot \text{height} + f \cdot \text{height}^2$  (a, b, c, d, e and f are regression coefficients). Concerning the behaviour of both variables of the heartwood at the different heights of the tree, the highest values are observed in the oldest

trees and in the lower parts of the tree, while young trees present the lowest  $HW_{\text{diameter}}$  and  $HW_{\text{percentage}}$ . In fact, at the age of 4, a small diameter was observed in the heartwood in the lower part of the tree. Absence of heartwood with increasing tree height was also observed at the different ages, i.e., at the age of 8 the heartwood disappears approximately at 8 meters height, while in older trees, around 20 years, the height at which the heartwood disappears is 16 to 18 meters (Figure 4).

[Figure 4]

### **Sapwood variation in trees in fast-growth teak plantations**

As with heartwood, the models developed for the variation of the variables of sapwood ( $SW_{\text{thickness}}$  and  $SW_{\text{percentage}}$ ) showed no relationship with the region where the tree grew. However, both variables (thickness and percentage) showed low or moderate correlation with the age (Table 2). The  $SW_{\text{thickness}}$  presented coefficient of determination of 0.25, with an error of 0.65 and coefficient of variation of 24 % (Table 2), while in  $SW_{\text{percentage}}$ , the coefficient of determination, error and coefficient of variation augmented (Table 2). The coefficient of determination was of 59%, error 9.74 and coefficient of variation of 22% (Table 2). For this last correlation, as the age increased,  $SW_{\text{percentage}}$  decreased (Figure 5a). The remainders for this model showed adequate distribution (Figure 5b).

[Figure 5]

The correlation of SW with different heights showed low or no tendency with age and Ht, since for the same age and height different SW values were obtained (Figure 6a). However,  $SW_{\text{percentage}}$  showed a distinctive tendency to decrease as the height and age increased (Figure 6b). This variation could be modeled by the equation  $Z = a + b \cdot \text{age} + c \cdot \text{height} + d \cdot \text{age}^2 + e \cdot \text{age} \cdot \text{height} + f \cdot \text{height}^2$  (a, b, c, d, e and f are coefficients of regression).

[Figure 6]

### **Bark variation in teak trees in fast-growth teak plantations**

The models developed for the variation of the parameters of the bark ( $Bark_{\text{thickness}}$  and  $Bark_{\text{percentage}}$ ) showed no correlation with the region where the tree grows. The age did not influence  $Bark_{\text{thickness}}$  at 2.50 m height, since the coefficient of determination was 0.18, with an error of 0.28, while for  $Bark_{\text{percentage}}$  the correlation observed was greater, the coefficient of determination increased to 0.34, 0.28 error and a coefficient of variation of 19% (Table 2). This last correlation is inversely proportional since with increasing age, the  $Bark_{\text{percentage}}$  decreased (Figure 7a). The remainders in this model show adequate distribution (Figure 7b).

The behaviour of these two variables at different heights differ (Figure 8). In the case of  $Bark_{\text{thickness}}$ , two variation patterns were observed: Thick  $Bark_{\text{thickness}}$  (1.1. to 1.7 cm) in trees over 16 years old in the lower section of the trees and thinner  $Bark_{\text{thickness}}$ , less than 1.0 cm in the higher sections of the tree and in young trees below 12 years of age (Figure 8a). As for  $Bark_{\text{percentage}}$ , the values were low at low heights, increasing as the tree height increased. However, the  $Bark_{\text{percentage}}$  decreased as the tree age increased (Figure 8b). This variation again is explained by the equation  $Z = a + b \cdot \text{age} + c \cdot \text{height} + d \cdot \text{age}^2 + e \cdot \text{age} \cdot \text{height} + f \cdot \text{height}^2$  (a, b, c, d, e and f are coefficients of regression).

[Figure 7]

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

[Figure 8]

### ***Pith variation in trees in fast-growth teak plantations***

The models developed for the variation of the pith parameters ( $Pith_{diameter}$  and  $Pith_{percentage}$ ) showed no relationship with the region where the tree grows. Similarly, in the case of the  $Pith_{diameter}$  it did not present any relationship with the age, which was evident in the low coefficient of determination (Table 2). However, the  $Pith_{percentage}$  showed correlation with the age of the tree, the coefficient of determination being 0.39, 0.30 error and coefficient of variation at 73% (Table 2).  $Pith_{percentage}$  decreased as age increased (Figure 9a). The remainders of the model showed no tendency and were completely randomized (Figure 9b).

[Figure 9]

As for the variation of the  $Pith_{diameter}$  with age at different tree heights, it increased slightly with increasing tree age and height. However, above 8m height,  $Pith_{thickness}$  tended to decrease (Figure 10a). At different tree heights,  $Pith_{percentage}$  was greater in smaller trees, although as the heights increased  $Pith_{percentage}$  also increased (Figure 10b). The variation of  $Pith_{thickness}$  and  $Pith_{percentage}$  can be explained by the equation  $Z = a + b \cdot \text{age} + c \cdot \text{height} + d \cdot \text{age}^2 + e \cdot \text{age} \cdot \text{height} + f \cdot \text{height}^2$  (a, b, c, d, e and f are regression coefficients).

[Figure 10]

### ***Specific gravity and dynamic module of elasticity in trees in fast-growth plantations***

The models developed for the variation of SG and MOEd showed no correlation with the region where the tree grows. SG measured at 2.5 m height was correlated in 23% with age, with 0.06 error and a coefficient of determination of 11% (Table 2). The errors of the model produced were accepted since they were totally randomized, showing no tendency whatsoever (Figure 11b). This physical property increased as the tree aged (Figure 11a). As for the second variable MOEd, no correlation with age was observed (Figure 11c), since the coefficient of determination was 0.01 (Table 2), although the errors were randomized showing no tendency (Figure 11d).

[Figure 11]

As for the variation of SG and MOEd at different heights and ages of the tree, SG increased with increasing age and height (Figure 12a). This correlation indicates that high values of SG are present in older trees at heights above 12 m (Figure 12a). MOEd, on the other hand, showed values under 0.9 GPa at heights under 8m in the different ages, while at heights above 12 m, the MOEd tended to increase as the height and age of the tree augmented (Figure 12b). This variation of SG and MOEd with age and height can be modelled by the equation  $Z = a + b \cdot \text{age} + c \cdot \text{height} + d \cdot \text{age}^2 + e \cdot \text{age} \cdot \text{height} + f \cdot \text{height}^2$  (a, b, c, d, e and f are regression coefficients).

[Figure 12]

## Discussion

### ***Teak morphology in Costa Rica***

The correlation found between height and DBH with age showed lack of significance with the region where the teak plantations grew (Table 2), agreeing with studies by Perez and Kanninen (2005) for trees planted in Costa Rica at different ages. The variability in the correlation height-diameter within and among regions is due to adaptation or just a passive response to an environmental gradient, such as light, altitude, slope, aspect or proximity to the coastal line in some species. In other studies however strong correlations have been observed between DBH-height and stand density (Huang et al. 2000), which is supported on the fact that height depends on one of two fundamental trade-offs, involving shifts with tree height in dry-mass allocational allometry or photosynthetic hydraulic limitation (Givnish et al. 2014). Therefore, in the case of height development in teak, it may be necessary to include other variables for the sake of precision of the model DBH-height, such as quality of the site, type of soil, among others.

In models of plantations for timber production, it is common that height, DBH and stand density have influence on volume production (Sumida 2015), as was found in the case of teak trees growing in plantations in Costa Rica (Figure 2 a-b). The influence of the stand density on height is due to higher competition for nutrients and minerals necessary for tree growth (Monserud and Sterba 1996; Perez and Kanninen. 2005). Kanninen et al. (2004), simulated different scenarios of density in teak plantations in Costa Rica, finding that the DBH would change in plantations with high or low stand densities, thus agreeing with the present study (Table 1).

### ***Heartwood variation in trees in fast-growth teak plantations***

$HW_{\text{diameter}}$  and  $HW_{\text{percentage}}$  showed that the heartwood started to develop approximately at 4 years, coinciding with Solórzano et al. (2012a, 2012b) and Trockenbrodt and Josue (1999) in teak produced in Costa Rica and Malaysia, respectively. With regard to the increment of  $HW_{\text{diameter}}$  and  $HW_{\text{percentage}}$  with age (Figure 3 a-b) and decrease with the height of the tree (Figure 4 a-b), it also coincides with other studies (Moya 2001; Perez and Kanninen 2005; Miranda et al. 2011; Garcia et al. 2011a, 2011b). Heartwood formation results from the death of the parenchyma and accumulation of substances (extractives) in the inner part of the tree, and is regulated by the physiological behavior of the enzymes in the sapwood, which in turn is regulated by growth conditions (Taylor et al. 2002). Knowledge about heartwood formation is scarce in tropical species (Taylor et al. 2002) and very limited for trees growing in fast growth conditions (Moya et al. 2014), making it difficult to explain the reasons for the unchanging heartwood percentage relative to the age or height of the tree (Figure 3 a-b, Figure 4 a-b).

### ***Sapwood variation in trees in fast-growth teak plantations***

$SW_{\text{thickness}}$  showed no correlation with the age of the trees (Table 2). Some authors (Trockenbrodt and Josue 1999), agree with this result. However,  $SW_{\text{percentage}}$  was correlated with age (Table 2; Figure 5-a), agreeing with results found by Thulasidas and Bhat (2009) and Bhat (2000) in teak planted in India. As for the decrease of  $SW_{\text{percentage}}$  as tree height increased, and its increment under 12 m height in older trees, this coincides with studies by Pérez and Kanninen (2003) in teak trees from plantations in Costa Rica of ages between 5 and 47 years. On the other hand, Moya (2001) found constant values of sapwood thickness as



the height of teak trees of 5 to 9 years of age increased, concluding that the annual increment of heartwood diameter coincides with the annual increment of DBH, consequently, sapwood diameter remains constant (in general, the last 4 growth rings), therefore, at greater heights the proportion of sapwood tends to diminish.

Sapwood is the part of the tree that contains living cells that carry out the transpiration and it contains energy reserves (starch) (Taylor et al. 2007). The main functions of the sapwood are to carry water from the base to the crown of the tree and contain energy reserves (Gartner 1995). Nevertheless, maintaining these cells is also costly for the tree in terms of energy (Ryan et al. 1995). As a result, the tree regulates its physiological processes during the first years in order to maintain the sapwood, avoiding heartwood formation while the tree invests in reaching greater height quickly (Taylor et al. 2007). Once it reaches considerable height, the excess sapwood after meeting the foliar demand is turned into heartwood in order to diminish the energy demand (Taylor et al. 2002). Therefore, in juveniles sapwood is more abundant than in adult trees (Figure 5 a, Figure 6 a-b).

### ***Bark variation in trees in fast-growth tree plantations***

$Bark_{thickness}$  showed no correlation with the age of the trees at 2.5 m (Table 2). However,  $Bark_{percentage}$  showed a positive correlation with age (Table 2, Figure 7a). This same behaviour was reported by Pérez and Kanninen (2003) and Prasad and Mariswamy (2013) in teak trees planted in Costa Rica with ages between 5 and 47 years and in trees in teak plantations in Karnatak (India) with ages between 11 and 36, respectively. However, Pérez and Kanninen (2003) indicate that in trees over 30 years old, the  $Bark_{percentage}$  stabilizes at 20%, although this behaviour cannot be confirmed in this work since the maximum age studied was 22. Wilson and Witkowski (2003) explain that in mature trees greater bark thickness is needed to protect tissue specialized in conduction.

The decrease of the  $Bark_{percentage}$  with the Ht (Figure 8b) coincides with the study conducted by Moya and Muñoz (2010) and Tenorio et al. (2016) for several fast-growth species in Costa Rica. Bark development depends on two lateral meristems: the vascular cambium, which forms the phloem, and the phellogen (cork cambium) in each periderm, which forms phellogen to the inside and phellem (cork) to the outside (Stängle et al. 2017). These functions decrease with the height of the tree (Graves et al. 2014), resulting in diminished bark thickness.

### ***Pith variation in trees in fast-growth teak plantations***

$Pith_{diameter}$  showed no correlation with the age of the tree (Table 2), although it tended to diminish significantly as the tree aged (Table 2, Figure 9 a). Archer (1986) suggests that stress of growth in the tree is reflected in the age and it increases as the diameter increases, producing greater compression on the pith. This strength can produce diameter reduction of the pith as the tree ages, as was observed in trees in teak plantations in Costa Rica, particularly in the lower section of the tree (Moya et al. 2008).

The change in these two variables,  $Pith_{diameter}$  and  $Pith_{percentage}$ , at different heights and ages showed a particular behaviour, increasing under 12 m while decreasing above 12 m height,  $Pith_{diameter}$  in particular. This situation occurs in all ages (Figure 10 a-b). This same tendency was described by Moya et al. (2008) in *Gmelina arborea* trees between 8 and 14 years planted in different sites in Costa Rica. Research has shown that the presence of high

percentages of pith diminish the quantity and quality of wood from teak sawlogs (Moya et al. 2014). Therefore, the increase of  $Pith_{diameter}$  and  $Pith_{percentage}$  in teak trees is inconvenient.

### **Specific gravity and dynamic modulus of elasticity in trees in fast-growth teak plantations**

SG presented a positive correlation with respect to age (Figure 11 a) but not with respect to Ht (Figure 12 a). A correlation of the values of SG is reported, since SG tended to increase close to the pith and decrease near the bark (Jayawarda and Amarasekere 2009; Sinha et al. 2014; Sinha et al. 2017), as shown in this and other studies on teak trees conducted in Costa Rica (Moya and Perez 2008; Solórzano et al. 2012a, 2012b). In general, for many species, increase in basic density occurs with tree age or in bark-pith direction (Zobel and Van Buitenen 1989). This change occurs by tree aging, since modifications on the woody cells were produced (Woodcock and Shier 2002; Wiemann and Williamson 2007). On the other hand, the diminution of SG with height is not clearly established currently, since the behaviour among species is significantly variable (Zobel and Van Buitenen 1989).

Instead, MOE showed no correlation with the age at 2.5 m (Figure 11 b), however, studies at different heights of the tree found high values of MOE at the base of the tree (Figure 12 b). Montes et al. 2017 agrees with the present study in that MOE does not correlate with the age of the trees, since it depends on the wave propagation, determined by the anatomic structure of the wood (Giroud et al. 2017), which in turn depends on such factors as climate, type of soil, genetics and management of the plantation (Thulasidas et al. 2006; Moya et al. 2009; Moya and Berrocal 2010).

### **Conclusions**

The diameter at breast height, total height, heartwood and sapwood diameter, sapwood and bark thickness of the teak trees showed no correlation with the region where the plantations studied are located in Costa Rica. However, age and density of the plantation showed significant statistical relationship with the DBH and total height. The measurements of the heartwood ( $HW_{diameter}$  and  $HW_{percentage}$  parameters) determined that the heartwood started to grow at the age of 4, continuing in ascent with respect to age, concentrating specially in the lowest sections of the tree. The  $SW_{thickness}$  remained constant along the tree, while at early ages the  $SW_{percentage}$  will be greater than in adult stages.

The bark, as a component of protection for the tree showed high  $Bark_{percentage}$  values, particularly at the base of the trees.  $Pith_{diameter}$  showed no relationship with the age of the trees, while  $Pith_{percentage}$  decreased with the growth of the tree. The SG presented a positive correlation with respect to age, given by tree aging and accumulation of heartwood cells in adult trees. For MOE no correlation with age and height of the tree was determined.

### **Acknowledgements**

The authors wish to thank the *Vicerrectoría de Investigación y Extensión at the Instituto Tecnológico de Costa Rica* and all companies for the providing raw material and other assistance in carrying out this study.

### **Rereferences**

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

- Alvarado A, Fallas JL. 2004. La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis* Lf) en suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 28(1).
- Anish MC, Anoop EV, Vishnu R, Sreejith B, Jijeesh CM. 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 Acad Wood Sci*. 12(1): 81-88.
- Archer RR. 1986. *Growth Stresses and Strains in Trees*. Springer-Verlag, New York. pp. 150-151.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 2003a: Standard test methods for specific gravity of wood and wood-base materials. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.10., Philadelphia. USA (ASTM D 2395-02).
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 2003b: Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.10., Philadelphia. USA (ASTM D-143 Reproved 2000).
- Bermejo I, Canellas I, San Miguel A. 2004. Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. *Forest ecol manag*. 189(1): 97-110.
- Bhat KM. 2000. Timber quality of teak from managed tropical plantations with special reference to Indian plantations. *Bois For Trop*. 263(1): 6–15
- Bhat KM, Priya PB, Rugmini P. 2001. Characterisation of juvenile wood in teak. *Wood Sci Technol*. 34(6): 517-532.
- Bhat KM, Thulasidas PK, Florence EM, Jayaraman K. 2005. Wood durability of home-garden teak against brown-rot and white-rot fungi. *Trees*. 19(6): 654.
- Clark DB, Clark DA, Oberbauer SF. 2010. Annual wood production in a tropical rain forest in NE Costa Rica linked to climatic variation but not to increasing CO<sub>2</sub>. *Glob Change Biol*. 16(2): 747-759.
- Cutter BE, Coggeshall MV, Phelps JE, Stokke DD. 2007. Impacts of forest management activities on selected hardwood wood quality attributes: a review. *Wood fiber sci*. 36(1): 84-97.
- FAO, 2006. Global planted forest thematic study: results and analysis, In: Del Lungo J.B. and Carle J. (Eds.), *Planted Forests and trees: Working paper 38*, Rome.
- García H, Marques da Silva ML, Bedra DH, Fardin L, Takizana FH. 2011a Estimation of inside-bark and heartwood diameter for *Tectona grandis* Linn. trees using artificial neural networks. *Eur J For Res*. 130:263–269
- García H, Rodrigues de Oliveira R, Monte MA, Fardin L, Mazon de Alcantara A, Marques da Silva ML, Vinícius R. 2011b. Taper models of heartwood of *Tectona grandis* L.f. *Sci For* 39(89):53–59
- Gartner BL. 1995. *Plant stems: physiology and functional morphology*. Academic Press.
- Giroud G, Bégin J, Defo M, Ung CH. 2017. Regional variation in wood density and modulus of elasticity of Quebec's main boreal tree species. *Forest Ecol Manag*. 400: 289-299.
- Givnish TJ, Wong SC, Stuart-William H, Holloway-Phillips M, Farquhar GD. 2014. Determinants of maximum tree height in Eucalyptus species along a rainfall gradient in Victoria, Australia. *Ecology*. 95(11): 2991-3007.
- Graves SJ, Rifai SW, Putz FE. 2014. Outer bark thickness decreases more with height on stems of fire-resistant than fire-sensitive Floridian oaks (*Quercus spp.*; Fagaceae). *Am J bot*. 101(12): 2183-2188.
- Gyi KK, Tint K. 1998. *Management status of natural teak forests*. RAP Publication (FAO).

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

- Hegde HT, Kalkoor MA, Jha SK, Thakur NS. 2014. Evaluation of variation in Physical properties of wood among some Tropical Tree Species of South India. *Indian Forester*. 140(1): 70-75.
- Huang, Price D, Titus SJ. 2000. Development of ecoregion-based height–diameter models for white spruce in boreal forests. *Forest Ecol Manag*. 129(1): 125-141.
- Jayawardana DN, Amarasekera HS. 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.
- Kampe A, Magel E. 2013. New insights into heartwood and heartwood formation. In *Cellular Aspects of Wood Formation* (pp. 71-95). Springer Berlin Heidelberg.
- Kanninen M, Pérez D, Montero M, Viquez E. 2004. Intensity and timing of the first thinning of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica: results of a thinning trial. *Forest Ecol Manag*. 203(1): 89-99.
- Kokutse AD, Bailleres H, Stokes A, Kokou K. 2004. Proportion and quality of heartwood in Togolese teak (*Tectona grandis* Lf). *Forest Ecol Manag*. 189(1): 37-48.
- Kollert W, Cherubini L. 2012. Teak resources and market assessment 2010. FAO Planted Forests and Trees Working Paper FP/47/E, Rome.
- Kumar A, Dhillon GPS. 2015. Variation of sapwood and heartwood content in half-sib progenies of *Eucalyptus tereticornis* Sm. *Indian J Natural Products and Resources*. 5(4): 338-344.
- Miranda I, Sousa V, Pereira H. 2011. Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. *J Wood Sci*. 57(3): 171-178.
- Monserud RA, Sterba H. 1996. A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria. *Forest ecol manag*. 80(1-3): 57-80.
- Montes CS, Weber JC, Garcia RA, Silva DA, Muñoz GI. 2017. Variation in growth, wood stiffness and density, and correlations between growth and wood stiffness and density in five tree and shrub species in the Sahelian and Sudanian ecozones of Mali. *Trees*. 31(3): 833-849
- Moya R. 2001. Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from Buen Precio Company. *Las maderas de plantaciones forestales*. ITCR, 1, 1-8.
- Moya R, 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. *Ann Forest Sci*. 67: 109.
- Moya R, Marín JD. 2011. Grouping of *Tectona grandis* (Lf) clones using wood color and stiffness. *New forests*. 42(3): 329-345.
- Moya R, Muñoz F. 2010. Physical and mechanical properties of eight fast-growing plantation species in Costa Rica. *J Trop Forest Sci*. 317-328.
- Moya R, Pérez D. 2008. Effects of physical and chemical soil properties on physical wood characteristics of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *J Trop Forest Sci*. 248-257.
- Moya R, Alvarado-Calvo. 2012. Variation of wood color parameters of *Tectona grandis* and its relationship with physical environmental factors. *Ann Forest Sci*. 69 (8): 947-959.
- Moya R, Araya L, Vilchez B. 2008. Variation in the pith parameter of *Gmelina arborea* trees from fast growth plantations in Costa Rica. *Ann forest Sci*. 65(6): 1.
- Moya R, Berrocal A, Serrano JR, Tomazello Filho M. 2009. Variación radial de la anatomía, densidad y durabilidad de la madera de teca (*Tectona grandis*) procedente de dos calidades de sitio y dos regiones climáticas de Costa Rica. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*. 18(2): 119-131.
- Moya R, Bond B, Quesada H. 2014. A review of heartwood properties of *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations. *Wood sci tech*. 48(2): 411-433.

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

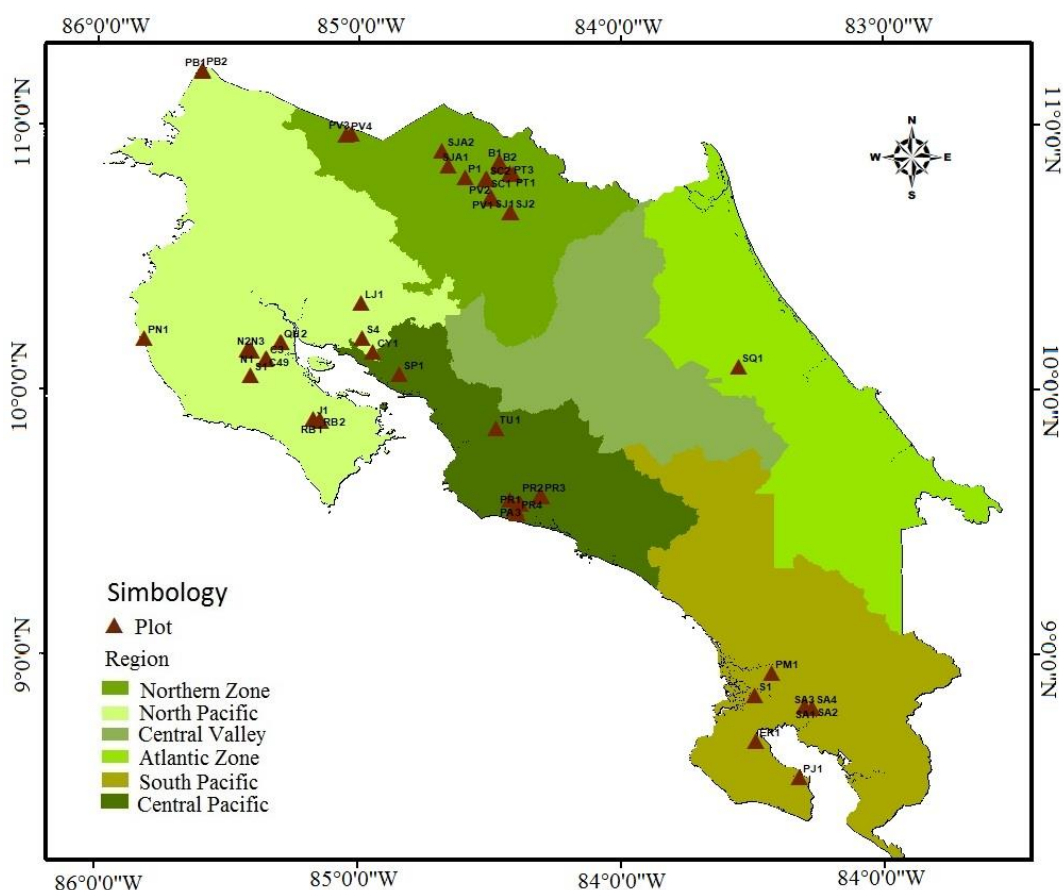
- Moya R, Marín JD, Murillo-Gamboa O, Leandro-Zúñiga L. 2013. Wood physical properties, color, decay resistance and stiffness in *Tectona grandis* clones with evidence of genetic control. Propiedades físicas, color, resistencia a la descomposición y la rigidez de la madera de clones de *Tectona grandis* con evidencia de control genético. *Silvae Genet.* 62(3): 142-152.
- Moya R, Salas C, Berrocal A, Valverde JC. 2015. Evaluation of chemical compositions, air-dry, preservation and workability of eight fastgrowing plantation species in Costa Rica. *Madera y Bosques.* 21.
- ONF (Oficina Nacional Forestal). 2015. Usos y aportes de la madera en Costa Rica, Estadísticas 2014. San Jose, Costa Rica.
- Pérez D, & 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 Fenn.* 39(2): 217-225.
- Pérez LD, Kanninen M. 2003. Heartwood, sapwood and bark content, and wood dry density of young and mature teak (*Tectona grandis*) trees grown in Costa Rica. Contenido de duramen, albura y corteza, y densidad de la madera seca de árboles de teca jóvenes y maduros (*Tectona grandis*) cultivados en Costa Rica. *Silva Fenn.* 37(1): 45-54.
- Prasad V, Mariswamy. 2013. Heartwood, sapwood and bark content of teak trees grown in Karnataka, India. *J Forestry res.* 24 (4): 721 – 725
- Ross, R. J. 2010. Wood handbook: Wood as an engineering material, Cap 4: Moisture relations and physical properties of wood.
- Ryan MG, Gower ST, Hubbard RM, Waring RH, Gholz HL, Cropper WP, Running SW. 1995. Woody tissue maintenance respiration of four conifers in contrasting climates. *Oecologia.* 101(2): 133-140.
- Sinha SK, Rao RV, Rathore TS, Borgaonkar HP. 2017. Growth ring structure and specific gravity variation in juvenile and mature wood of natural-grown teak (*Tectona grandis* Lf). In *Wood is Good* (pp. 105-115). Springer, Singapore.
- Sinha SK, Vijendra Rao R, Rathore TS, Borgaonkar HP. 2014. Effect of growth rate and latewood content on basic density of wood from 120-to 154-year-old natural-grown teak (*Tectona grandis* L. f.). *Int Res J Biol Sci.* 3: 66-72.
- Solórzano S, Moya R, Chauhan S. 2012a. Early genetic evaluation of morphology and some wood properties of *Tectona grandis* L clones. *Silvae gen.* 61: 58-65.
- Solórzano S, Moya R, Murillo O. 2012b. Early prediction of basic density, shrinking, presence of growth stress, and dynamic elastic modulus based on the morphological tree parameters of *Tectona grandis*. *J wood sci.* 58(4): 290-299
- Stängle SM, Sauter UH, Dormann CF. 2017. Comparison of models for estimating bark thickness of *Picea abies* in southwest Germany: the role of tree, stand, and environmental factors. *Ann Forest Sci.* 74(1): 16.
- Sumida A. 2015. The diameter growth–height growth relationship as related to the diameter–height relationship. *Tree physiology.* 35(10): 1031-1034.
- Taylor AM, Gartner BL, Morrell JJ. 2002. Heartwood Formation and Natural Durability—A Review. *Wood Fiber Sci.* 34(4): 587-611.
- Taylor AM, Gartner BL, Morrell JJ. 2007. Heartwood formation and natural durability—a review. *Wood fiber sci.* 34(4): 587-611.
- Tenorio C, Moya R, Salas C, Berrocal A. 2016. Evaluation of wood properties from six native species of forest plantations in Costa Rica. *Bosque.* 37(1).
- Thulasidas PK, Bhat KM. 2007. Chemical extractive compounds determining the brown-rot decay resistance of teak wood. *Eur J Wood Prod.* 65(2): 121-124.
- Thulasidas PK, Bhat KM, Okuyama T. 2006. Heartwood colour variation in home garden teak (*Tectona grandis*) from wet and dry localities of Kerala, India. *J Trop Forest Sci.* 51-54.

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

- Trockenbrodt M, Josue J. 1999. Wood properties and utilisation potential of plantation teak (*Tectona grandis*) in Malaysia. *J Trop Forest Prod.* 5: 58-70.
- Wiemann MC, Williamson GB. 2007. Extreme radial changes in wood specific gravity in some tropical pioneers. *Wood Fiber sci.* 20(3): 344-349.
- Wilson BG, Witkowski ETF 2003. Seed banks, bark thickness and change in age and size structure (1978–1999) of the African savanna tree, *Burkea Aafricana*. *Plant Ecol.* 167:151-162
- Woodcock D, Shier A. 2002. Wood specific gravity and its radial variations: the many ways to make a tree. *Trees-Structure and Function.* 16(6): 437-443.
- Zobel B, Van Buijtenen JP. 1989. Wood variation, its causes and control. Springer-Verlag, Berlin. 363 p.



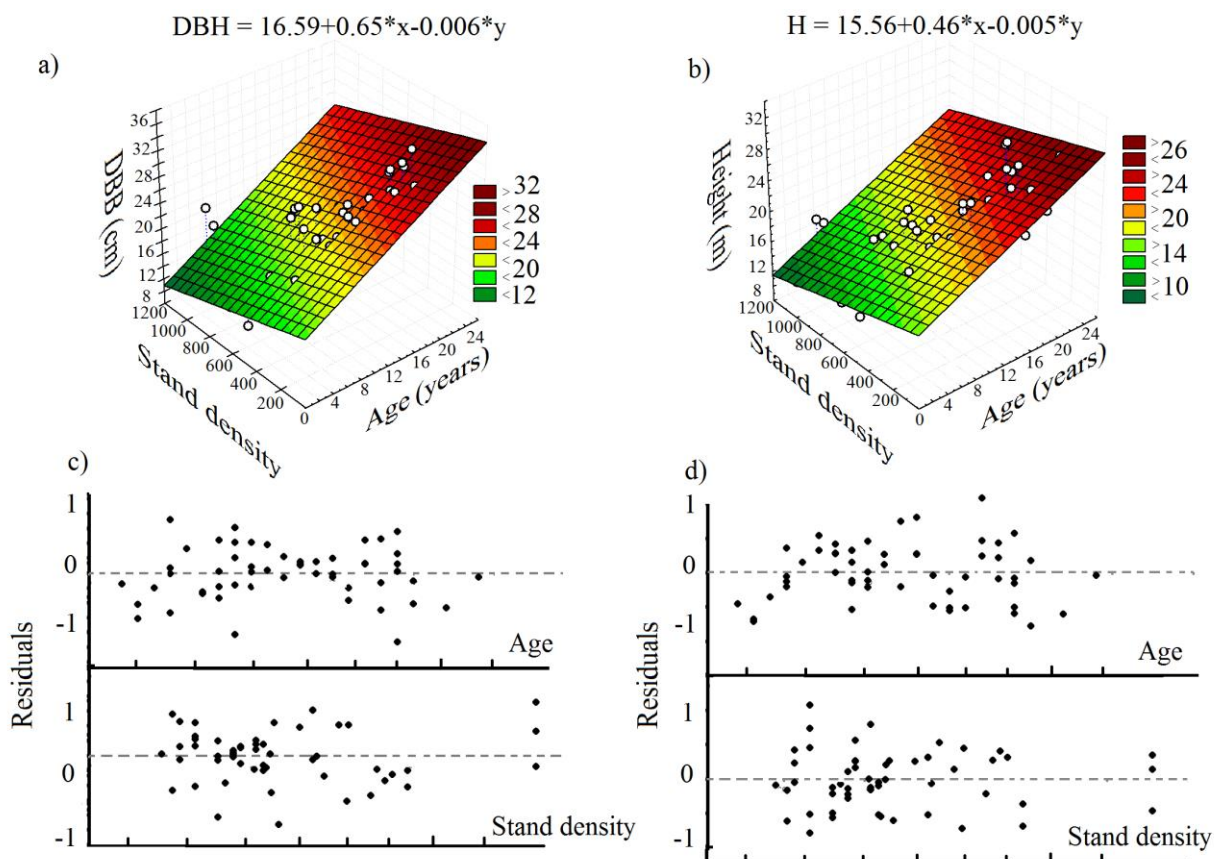
**Fig. 1** Localization of *Tectona grandis* sampled plots of different ages in fast growth plantations in Costa Rica.

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

**Table 1** Regression models and statistics for diameter at breast height and total height in *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations in Costa Rica.

Variable	Model	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Sxy	F-value	CV
DBH	$Y = 16.59 + 0.65 * \text{Age} - 0.006 * N$	0.64	0.63	3.64	45.29	16.93
Height	$Y = 18.22 + 0.46 * \text{Age} - 0.006 * N$	0.57	0.56	3.24	34.13	17.29



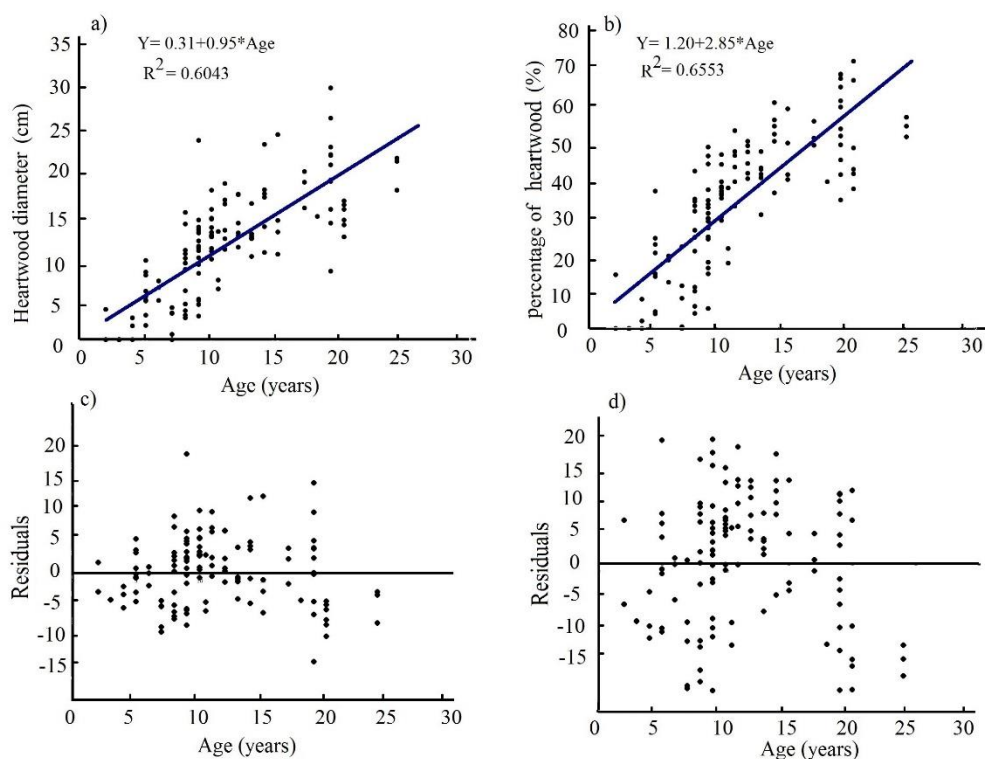
**Fig. 2** Relationship of diameter at breast height with stand density and age (a), relationship of total height with stand density and age (b), error distribution of the diameter at breast height model (c) and residual distribution of the total height model (d) in *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations in Costa Rica.

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”

**Table 2** Regression models and statistics for heartwood, sapwood, bark, pith, specific gravity and dynamic modulus of elasticity in *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations in Costa Rica.

Variable	Model	R2	R2 ajustado	Sxy	F-value	CV
Heartwood diameter	$Y = 0.31 + 0.95 * \text{Age}$	0.60	0.60	4.07	192.41	38.01
Percentage of Heartwood	$Y = 1.21 + 2.85 * \text{Age}$	0.65	0.65	10.93	239.58	33.79
Sapwood thickness	$Y = 3.49 - 0.07 * \text{Age}$	0.26	0.25	0.65	44.35	24.34
Percentage of sapwood	$Y = 68.32 - 2.22 * \text{Age}$	0.59	0.59	9.74	183.25	22.11
Bark thickness	$Y = 0.82 + 0.02 * \text{Age}$	0.18	0.17	0.28	27.48	25.57
Percentage of bark	$Y = 30.48 - 0.63 * \text{Age}$	0.34	0.34	4.61	65.59	19.54
Pith thickness	$Y = 0.99 - 0.004 * \text{Age}$	0.01	0.01	0.25	1.02	26.46
Percentage of pith	$Y = 0.92 - 0.05 * \text{Age}$	0.39	0.39	0.30	83.05	73.30
Specific gravity	$Y = 0.43 + 0.01 * \text{Age}$	0.23	0.23	0.06	39.64	11.76
MOE	$Y = 0.72 + 0.01 * \text{Age}$	0.01	0.01	0.26	1.14	32.43



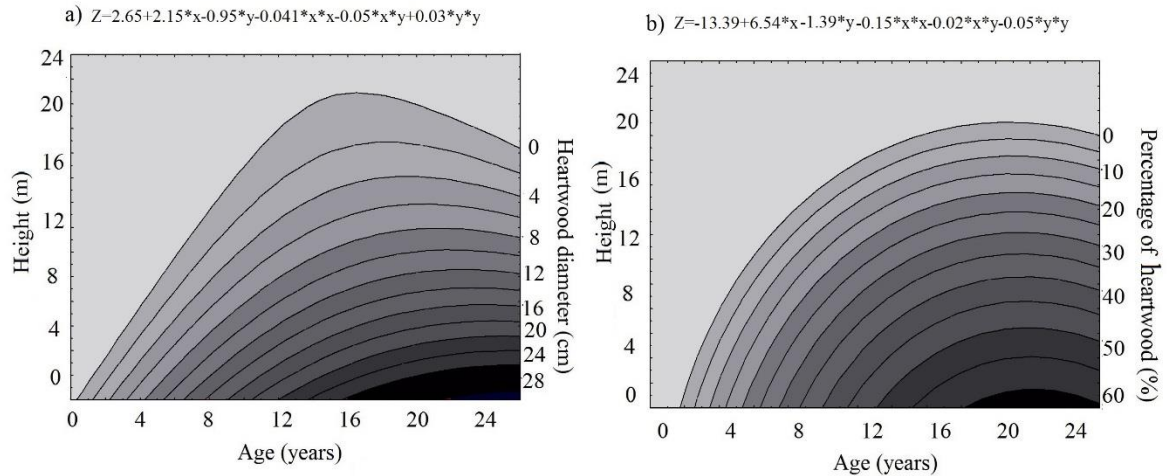
**Fig. 3** Relationship of the heartwood diameter with age (a), relationship of the percentage of heartwood with age (b), error distribution of the heartwood diameter model (c), residuals

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

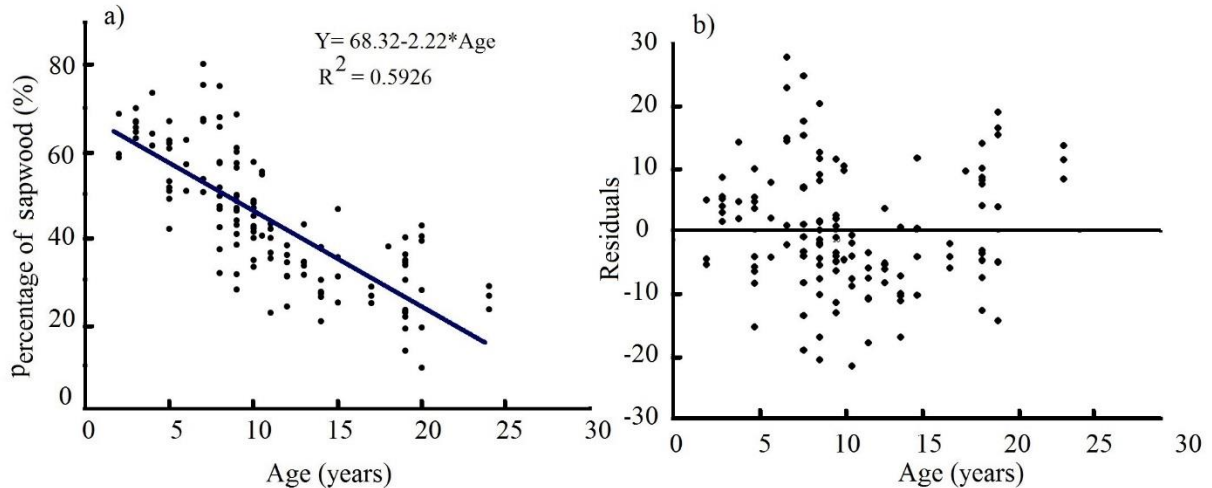
“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”



distribution of percentage of heartwood model (d) at 2.50m height in *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations in Costa Rica.



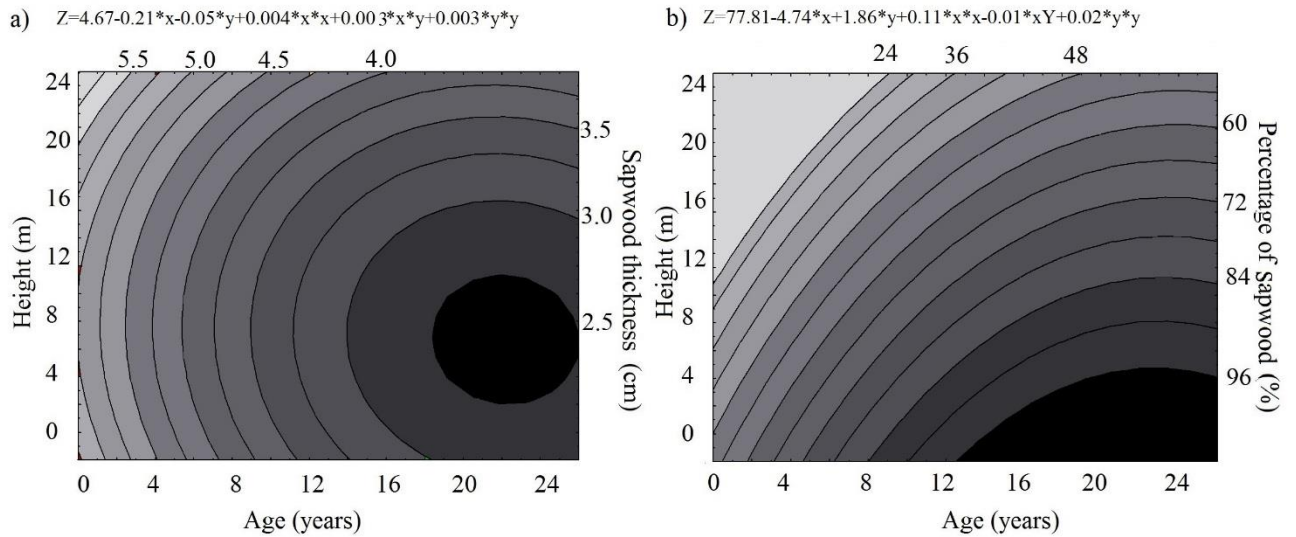
**Fig. 4** Relationship of the heartwood diameter with age at different heights (a) and relationship of the percentage of diameter with age at different heights (b) in *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations in Costa Rica.



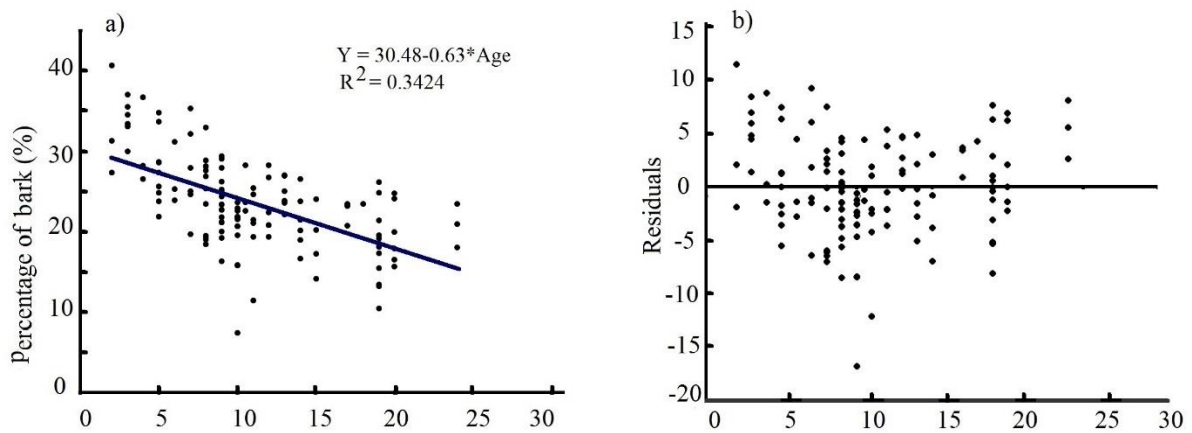
**Fig. 5** Relationship of the percentage of sapwood with age (a) and residual distribution of the percentage of sapwood thickness model (b), at 2.50 m height in *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations in Costa Rica.

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”



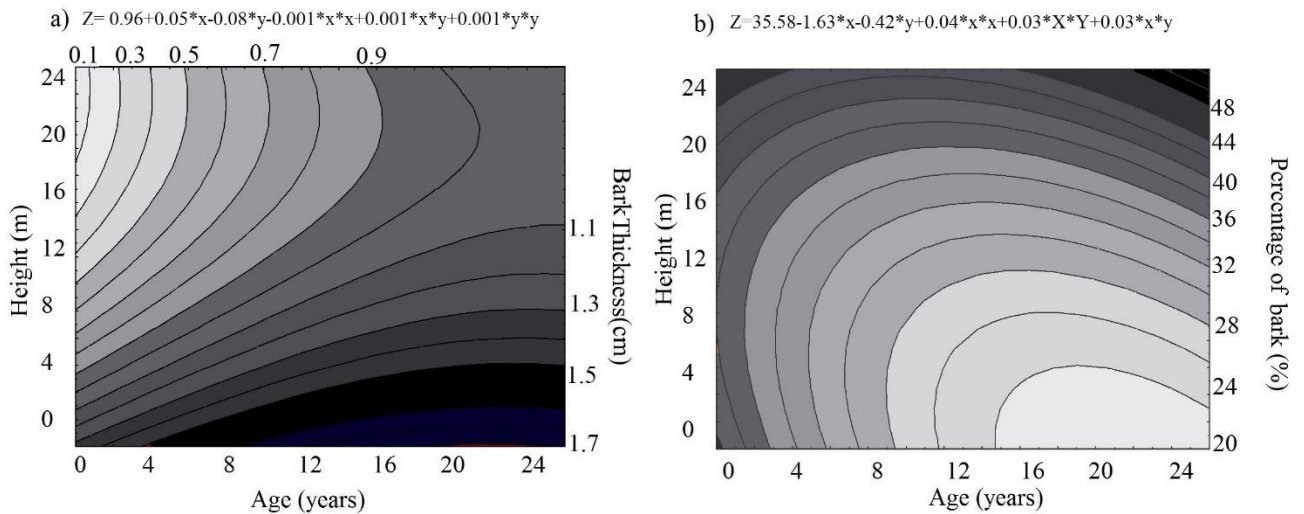
**Fig. 6** Relationship of the Sapwood thickness with age at different heights (a) and relationship of the percentage of sapwood with age at different heights (b) in *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations in Costa Rica.



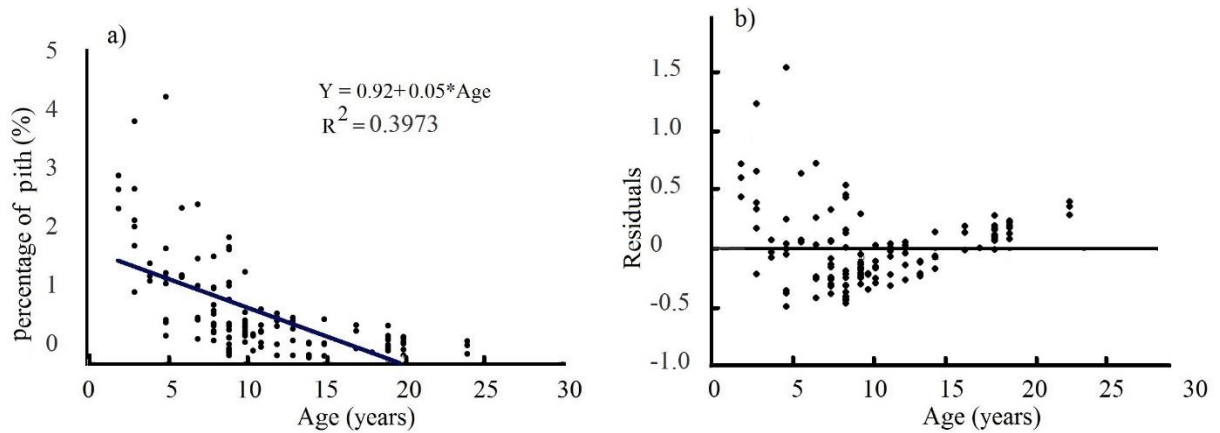
**Fig. 7** Relationship of the percentage of bark with age (a) and residual distribution of the percentage of bark model (b), at 2.50 height in *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations in Costa Rica.

INFORME FINAL DE PROYECTO

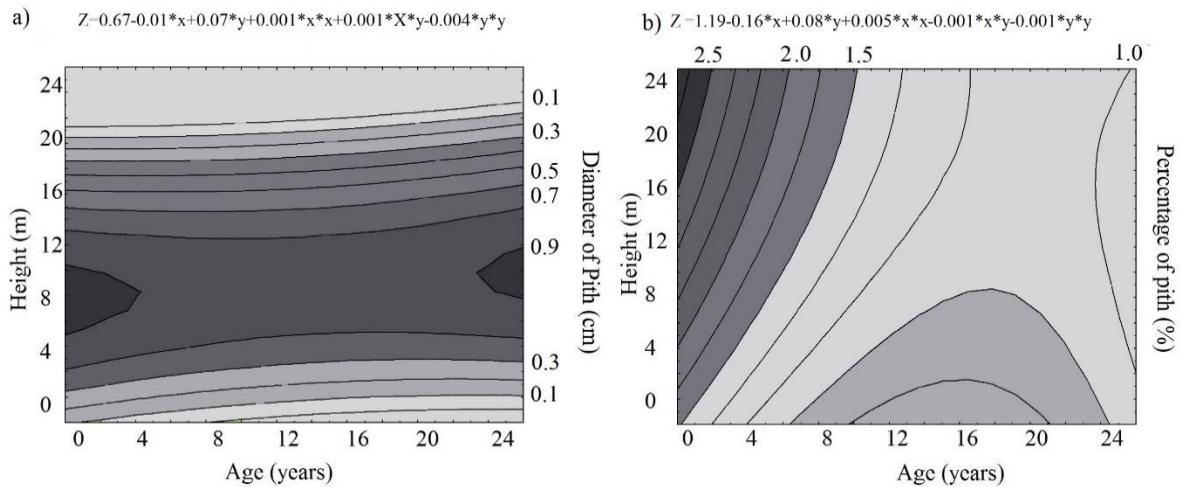
“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”



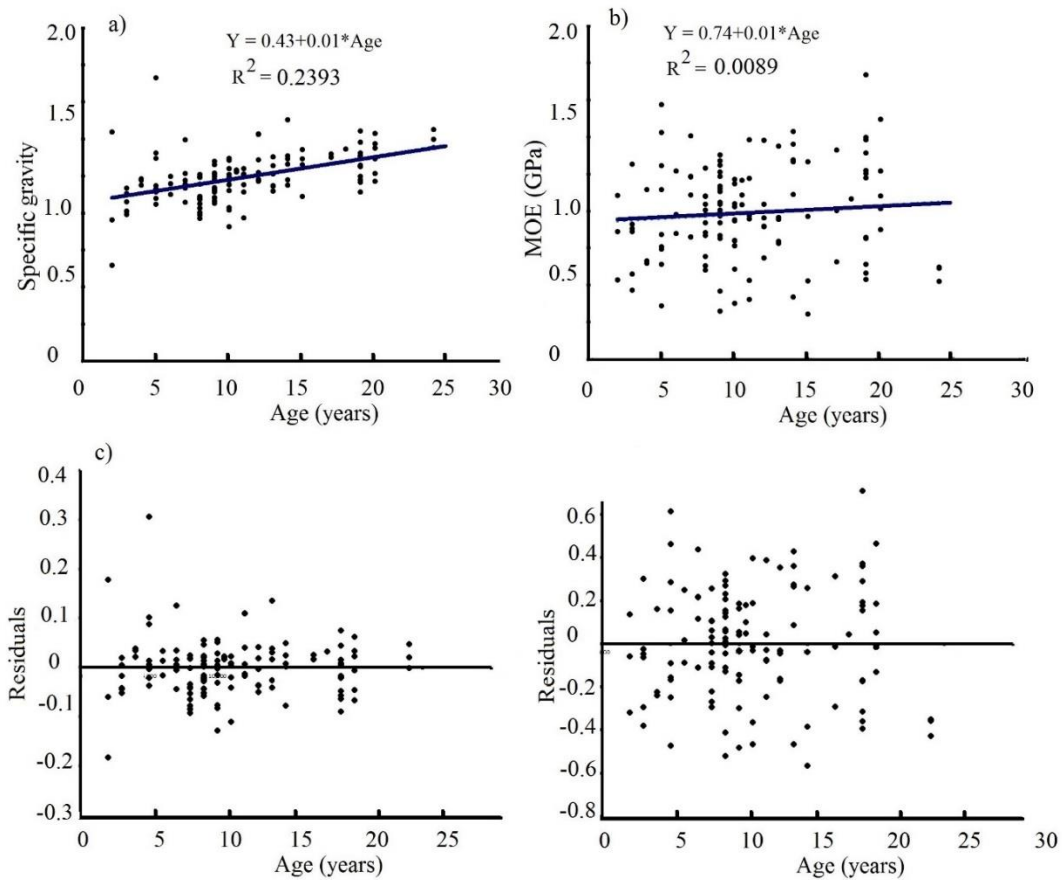
**Fig. 8** Relationship of the Bark thickness with age at different heights (a), relationship of the percentage of bark with age at different heights (b) in *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations in Costa Rica.



**Fig 9** Relationship of the percentage of pith with age (a), residual distribution model of the percentage of pith (b), at 2.50 height in *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations in Costa Rica.



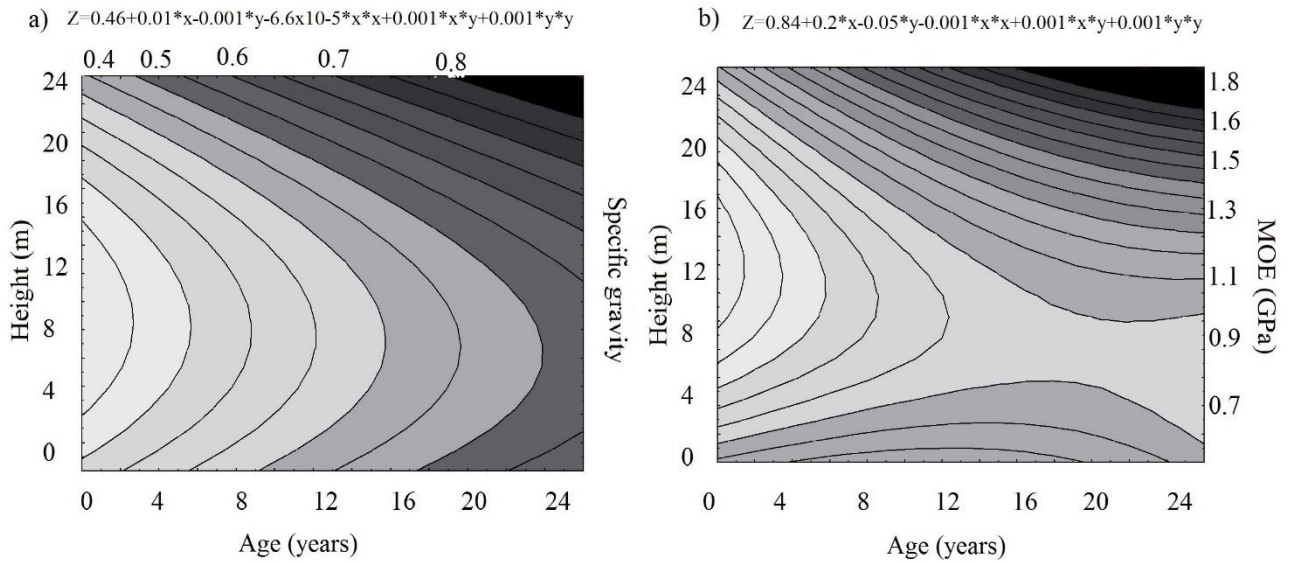
**Fig. 10** Relationship of the Pith diameter with age at different heights (a) and relationship of the percentage of pith with age at different heights (b) in *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations in Costa Rica.



**Fig. 11** Relationship of the specific gravity with age (a), relationship of the MOE with age (b), residual distribution of the specific gravity model (c) and error distribution of MOE model (d) at 2.50 m height in *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations in Costa Rica.

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”



**Fig. 12** Relationship of the specific gravity with age at different heights (a) and relationship of the MOEd with age at different heights (b) in *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations in Costa Rica.

**Artículo 4. Evaluación del perfil de densidad de la madera usando densitometría de rayos-X en árboles de *Tectona grandis* creciendo en plantaciones de rápido crecimiento: variación con la edad del árbol, entre y dentro de anillos anuales, límite de los anillos anuales y límite entre albura y duramen.**

---

**Evaluación del perfil de densidad de la madera usando densitometría de rayos-X en árboles de *Tectona grandis* creciendo en plantaciones de rápido crecimiento: variación con la edad del árbol, entre y dentro de anillos anuales, límite de los anillos anuales y límite entre albura y duramen**

**Johana GAITAN-ALVAREZ**

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [jgaitan@itcr.ac.cr](mailto:jgaitan@itcr.ac.cr)

**Alexander BERROCAL**

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [aberrocal@itcr.ac.cr](mailto:aberrocal@itcr.ac.cr)

**Róger MOYA\***

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [rmoya@itcr.ac.cr](mailto:rmoya@itcr.ac.cr)

**David FERNÁNDEZ-SÓLIS**

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Email: [davfersolis@yahoo.com](mailto:davfersolis@yahoo.com)

\*Authors correspondence, Email: [rmoya@itcr.ac.cr](mailto:rmoya@itcr.ac.cr)

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

**Evaluación del perfil de densidad de la madera usando densitometría de rayos-X en árboles de *Tectona grandis* creciendo en plantaciones de rápido crecimiento: variación con la edad del árbol, entre y dentro de anillos anuales, límite de los anillos anuales y límite entre albura y duramen.**

**Resumen**

*Tectona grandis* es una especie tropical, que puede ser utilizada en estudios dendrocronológicos ya que marca los anillos de crecimiento. Además ha sido plantada en muchos países tropicales en proyectos de reforestación comercial, por lo que los árboles en estas condiciones de crecimiento tendrán un potencial para ser utilizado en estudio de dendrocronológicos. En el presente estudio se determinó el perfil de densidad de la madera, por medio de densitometría de rayos-X para establecer la variabilidad entre y dentro del anillo, la marcación del anillo anual y el límite entre albura y duramen en árboles de plantaciones de rápido crecimiento. En el estudio se encontró que el perfil de densidad de la madera muestra un comportamiento creciente de la densidad con respecto a la edad del árbol. En la marcación de los anillos de crecimiento se establecieron 5 tipos de perfiles de densidad a través del anillo anual. Además se encontró que los árboles con edades inferiores a 8 años o en la parte interna de los árboles el perfil de densidad de la madera no mostró adecuadamente el límite del anillo de crecimiento, por lo que en esta condición se debe complementar la identificación de los anillos con una preparación visual. En árboles adultos, el perfil de densidad de la madera si mostró la marcación de los anillos de crecimiento, no obstante si se acompaña con una identificación visual es más acertada la marcación de los anillos. Entonces el estudio dendrocronológicos de estos árboles debe ser una combinación de densitometría rayos-X con una identificación visual. En relación con el límite entre albura y duramen, el perfil de densidad de la madera mostró un descenso de la densidad de la madera en esta sección, sin embargo no es una técnica apropiada para su uso como indicador de esta zona, debido a la variabilidad existente.

Palabras clave: Dendrocronología, variación de la densidad, anillo anual de crecimiento, especies tropicales, anillo de los árboles, teca.

## Introducción

La teca (*Tectona grandis* L.f), es una de las especies tropicales comercialmente más importante a nivel mundial (FAO, 2013). Es originaria de los bosques del sureste asiático específicamente la India, Laos, Myanmar y Tailandia (Pandey y Brown, 2000). Dada la importancia de esta especie es que las plantaciones comerciales de la teca se han ido expandiendo ampliamente a diferentes zonas tropicales de América Latina, Asia, África y Oceanía (Ladrach, 2009; Kollert y Cherubini, 2012). Las plantaciones comerciales han sido establecidas en regiones que varían desde los 100° longitud oeste a 180° longitud este y con una latitud desde 23° norte hasta 40° latitud sur (Bebarta, 1999), a diferencia del área natural de crecimiento, que ocurre entre latitudes 25° y 9 ° norte (Tewari, 1999). Los sitios disponibles para un crecimiento vigoroso de la teca fueron confinados a zonas tropicales alrededor del Ecuador bajo los 1000 metros de altitud, con una precipitación anual de 1 500 mm, suelos fértiles, profundos y bien drenados (Tewari, 1999). Sin embargo los sitios donde fue introducida tienen diferentes condiciones ecológicas comparado con su hábitat natural en Asia, principalmente aquellos relacionados con la geografía (altitud y fertilidad de suelos) y la precipitación (De Camino et al., 2002; Kollert y Cherubini, 2012).

Es importante recalcar que el concepto de árboles de rápido crecimiento en teca fue introducido en 1950 por los británicos en la India para el propósito de desarrollar un manejo forestal sustentable del área natural de teca de ese país. El manejo implica la remoción de árboles cada 30 años y una cosecha final entre 120-150 años (Pandey y Brown, 2001). Sin embargo ese concepto es muy diferente actualmente, porque los árboles de teca que están creciendo en mucho países tropicales alrededor del mundo tienen entre 2-30 años (Kollert y Cherubini, 2012, Moya et al., 2014). Después de los años 80 las plantaciones comerciales establecidas en América Latina, África y Asia, disminuyeron el espaciamiento a 3 x 3 m, la inclusión de clones (Kallister y Collis, 2008) y la alta intensidad de manejo en las plantaciones de teca, verdaderamente generaron condiciones de rápido crecimiento (Kollert y Cherubini, 2012).

Una propiedad ampliamente estudiada en teca es la densidad, ya que este parámetro es una medida indirecta de otras propiedades (Sinha et al., 2017); las cuales se relacionan con la anatomía de la madera (Zobel y Van Buitjen 1989). La densidad de teca se caracteriza por ser muy variable, en especial en la madera proveniente de plantaciones de rápido crecimiento (Moya et al., 2014). Por lo que las variaciones del perfil de densidad en este tipo

---

### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**



de árboles deben ser adecuadamente establecidos para las diferentes condiciones de crecimiento en las nuevas áreas de reforestación.

La densidad de la madera está afectada por otros múltiples factores. Un número considerable de estudios ha mostrado que la variación de la densidad de los árboles de teca de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica depende de la fertilidad del suelo (Moya et al., 2009), edad de los árboles (Moya y Marín, 2011), diferencia entre clones (Moya y Marín, 2011; Moya et al., 2013). Perez y Kanninen (2003), por otra parte, se concluyó que la densidad de la Madera no está relacionada con las condiciones de sitio donde crece el árbol. Recientemente Berrocal et al. (2018) mostraron la variación en la densidad de la madera en diferentes condiciones de Costa Rica. Sin embargo, es importante recalcar que muchos de los estudios de la variación de densidad están basados en la determinación de la densidad por métodos tradicionales como la determinación de la masa y el volumen.

Más recientemente se han establecido perfiles de densidad utilizando técnicas como la densitometría de rayos-X para establecer la variación con la edad del árbol, entre y dentro de los anillos anuales, el límite de los anillos y el límite entre albura y duramen (Jacquin et al., 2017) y con múltiples aplicaciones, entre los que destaca el estudio dendrocronológico (Schöngart et al., 2017). En el caso de árboles de *T. grandis* tiene un gran potencial debido a que es una especie que marca los anillos de crecimiento (Jacoby y D'Arrigo, 1990; Sinha et al., 2011).

La madera de *T. grandis* se caracteriza por ser una madera de anillos porosos a semi-porosos, donde los anillos de crecimiento se distinguen bien gracias al tamaño del poro y en algunas casos a la formación de una banda de parénquima aparentemente marginal, que pueden ser distinguidos con la ayuda de los perfiles de densidad (Deepak et al., 2010; Nocetti et al., 2011). Una amplia descripción de la anatomía del anillos de crecimiento en teca y sus efectos en la marcación de los anillos con densitometría de rayos-X fue dado por Nocetti et al. (2011). Dichos autores indican que la teca tiene anillos porosos, pero en ocasiones el anillo poroso puede no ser bien desarrollado, generando un anillo semi-poroso o madera de porosidad difusa. La primera parte del anillo en madera con anillos porosos, generalmente contiene una banda angosta de abundantes vasos con lúmenes grandes y por lo tanto es la parte de menor densidad del anillo. Entonces, la abundancia y el área del lumen de los vasos disminuyen más o menos gradualmente a un valor mínimo hacia el final del anillo, junto con un aumento de densidad. Pero en madera con anillos semi-porosos y porosidad difusa la

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

menor cantidad de poros en relación con la madera con anillos porosos, produce que la densidad no decaiga y la marcación del anillo es menos evidente (Nocetti et al., 2011).

La importancia de establecer los anillos de crecimientos, por ejemplo por densitometría de rayos-X, en árboles de teca en Asia, ha demostrado que los anillos de crecimiento brindan mucha información valiosa sobre dendroclimatología (Shah et al., 2007; Ram et al., 2008; Deb et al., 2017). Esto porque la morfología de los anillos de crecimiento, dependen principalmente de la precipitación y de la humedad de los suelos (Pumijumnong, 2013). En teca existe una gran cantidad de aplicaciones del establecimiento de los anillos de crecimiento. Por ejemplo D'Arrigo et al. (2008) con la ayuda de los anillos de los árboles creciendo en Java (Indonesia), estableció nueve cronologías entre 1759-2006 y estableció los periodos de sequía en dicha región.

Por su lado, Buckley et al. (2007) estableció una cronología de 448 años en teca de Thai; nuevamente utilizando la variabilidad de la morfología de los anillos de crecimiento, demostró que existieron dos periodos de sequía importantes en la época de los 1700's en el mencionado país. También diferentes investigaciones (Palaki et al., 2015; Buajan et al., 2016; Muangsong et al., 2016; Sangram et al., 2016), confirman la importancia de los anillos de crecimiento en teca de Thai y la influencia que tiene en estos los factores ambientales como humedad del suelo, precipitación y la temperatura del ambiente. Sin embargo, los anteriores estudios como puede ser observado están basados en árboles de edades sobre 100 años, lo que queda la incertidumbre si puede ser aplicado estudios de dendrocronológicos obtenidos de árboles jóvenes creciendo en regiones/continentes donde ha sido utilizada para la reforestación comercial.

La formación de los anillos de crecimiento, su composición anatómica y la variación de la densidad en especies tropicales, como *T. grandis*, es más complejo que en la especies de clima temperado, esto debido a que estos no son tan marcados (Pumijumnong, 2013) por no existir una uniformidad en la estructura anatómica (Moya y Tomezello, 2007). En estas regiones la formación de los anillos es influenciado por los niveles de precipitación, la fenología de la especie y la periodicidad de la actividad cambial (Worbes, 2010; Brienen et al., 2016). Y cuando estas condiciones, en el caso de los arboles desarrollados en plantaciones de rápido crecimiento, la formación de los anillos se le agregan factores como el manejo de las plantaciones, las actividades silvícolas para mejorar el crecimiento de los árboles edades muy cortas si se compara con los árboles de las regiones naturales, lo que

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

repercute en que el perfil de densidad de la madera varíe a diferentes edades o bien entre y dentro de los anillos anuales.

En Costa Rica, como en otros países donde se ha plantado la teca se han utilizado una gran diversidad de sitios y regiones, los cuales presentan variedad en condiciones climáticas y topográficas (Moya y Perez, 2008; Moya et al., 2014), por lo que es posible que se presente una gran variedad de perfiles de densidad de la madera en la sección transversal del árbol o por edad del árbol, variabilidad en el perfil de densidad de la madera entre y dentro de los anillos anuales, en la marcación de los anillos y en el límite entre albura y duramen. Además, los árboles desarrollados en plantaciones de rápido crecimiento carecen de información acerca de la formación de anillos de crecimiento y el perfil de densidad de la madera en especial en árboles en los primeros años de crecimiento.

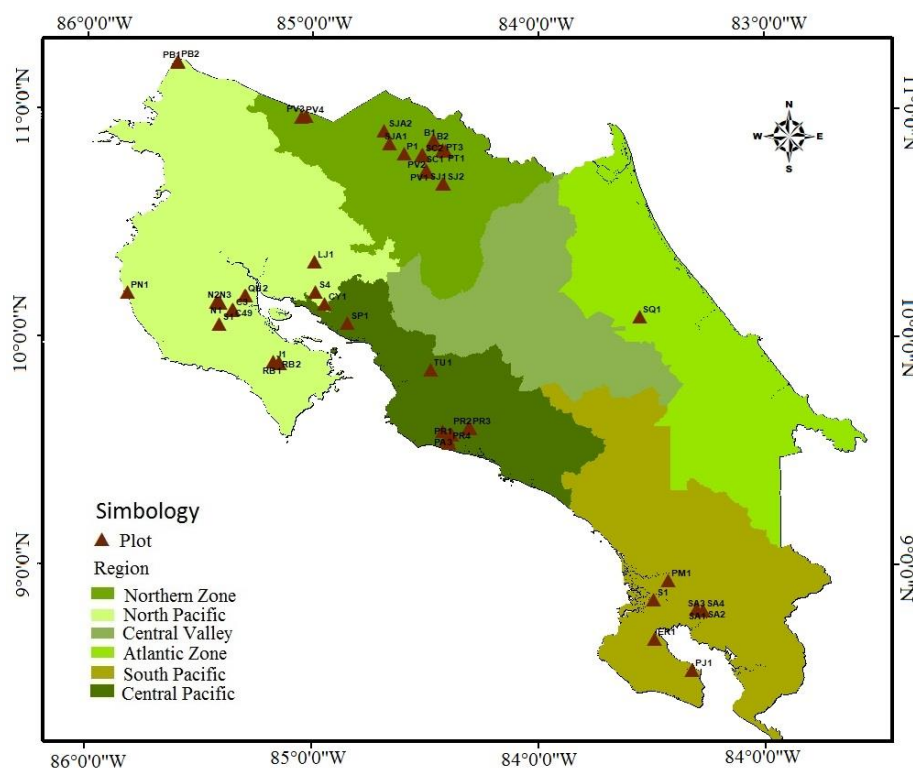
## **Metodología**

### *Área de estudio*

Se muestrearon en total 54 plantaciones de rápido crecimiento de *Tectona grandis* en diferentes regiones de Costa Rica, las cuales variaban entre los 2 a los 22 años de edad. Las regiones donde se localizaron las plantaciones fueron: (i) Pacífico Norte: con una precipitación anual de 1626.2 mm, con una estación seca entre abril y noviembre, temperatura media de 27.55 °C y humedad relativa promedio de 72.92%. (ii) Pacífico Central con una precipitación anual de 3743 mm, distribuida en los meses de abril a diciembre temperatura media anual de 26.89 °C y humedad relativa de 84.08%. (iii) Pacífico sur: es la región con la mayor cantidad de precipitación anual, con 4453.9 mm distribuida alrededor de todo el año, sin embargo en setiembre y octubre son los meses de mayor precipitación, temperatura promedio de 26.84 °C y humedad relativa de 74.83 %. (iv) Zona Atlántica: presenta una precipitación anual de 3566.6 mm, el régimen de precipitación se mantiene constante durante todo el año siendo el mes más seco en setiembre, temperatura de 26.67 °C y humedad de 85.92. (v) Zona Norte: la distribución de lluvias se presenta entre los meses de mayo a enero con una precipitación anual de 1732 mm, una temperatura de 23.67 y humedad relativa de 85.92 % (Figura 1) (IMN, 2017).

La cantidad de plantaciones muestreadas varía en cada una de las regiones, en el Pacífico Central se muestrearon 16 plantaciones, en Pacífico Norte 12, Pacífico Sur 7, Zona

Atlántica 1 y Zona Norte 18 (Figura 1). Es importante hacer notar que en el caso de la zona Atlántica la cantidad de plantaciones muestreadas fue solamente una ya que en esa región la *T. grandis* ha sido plantada en un área bastante reducida y no fue posible obtener permiso de corta de más árboles en esa región.



**Figura 1.** Localización de los puntos de muestreo en plantaciones de rápido crecimiento de *Tectona grandis* de diferentes edades en Costa Rica.

#### Muestreo de plantaciones y árboles

En cada sitio de muestreo se estableció una parcela temporal de 13 m de radio (531 m<sup>2</sup>), las variables a medir fueron: la cantidad de árboles totales (N), diámetro a la altura del pecho (DBH) y altura total (Ht). Posteriormente se seleccionaron tres árboles al azar cerca de la parcela temporal para realizar el muestreo. Los árboles seleccionados contaban con un fuste de forma recta, ramificación normal y no presentaban síntomas de enfermedades o plagas.

Una vez seleccionados los árboles, se midió el DBH, se cortó y luego se procedió a medir la altura total para cada árbol seleccionado. Seguidamente se cortaron discos de aproximadamente 4 cm de espesor en la base del árbol, y adicional se cortaron discos cada 2.3 m desde la base hasta la altura máxima del duramen (HWh). Durante este proceso, se

---

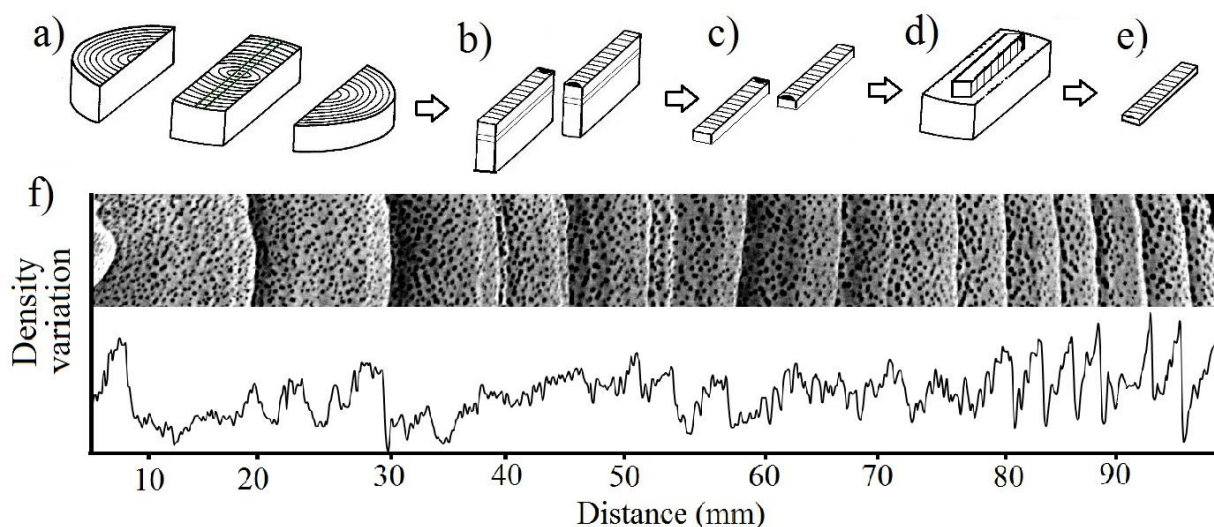
#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

registró la altura en metros a la que se cortó cada disco, que corresponde a la distancia desde la base del árbol hasta la altura de muestreo ( $h_i$ ).

#### *Preparación de las muestras para las mediciones de densitometría.*

Para cada uno de los discos se cortó primero una barra de 4 cm de ancho en dirección norte-sur (Figura 2a), luego una muestra de 1 cm de ancho en la misma dirección pasando por la medula del árbol (Figura 2b). Una vez obtenida esta muestra se separó en la médula, obteniendo una sub-muestra norte y una sub-muestra sur (Figura 2b). Cada una de las secciones se cortó a un espesor de 1 cm (Figura 2c). Las secciones de 1 cm x 1 cm se pegaron en sentido radial en otra pieza de madera, la cual sirvió como soporte (Figura 2d). Posteriormente la probeta fue cortada con una sierra circular doble, para extraer la muestra de 2 mm que sirviera para el análisis de densitometría de rayos-X (Figura 2e).



**Figura 2.** Muestra delgada para exposición a los rayos-X obtenida de la sección transversal de una sección del tallo de árboles de *Tectona grandis* (a-e) y gráfico de dispersión entre la densidad y la distancia desde la médula con una fotografía de rayos-X (f).

#### *Medición de la densitometría de rayos-X.*

La medición de la densidad por densitometría de rayos-X se realizó en las direcciones transversales (Figura 2e). La muestra delgada de teca se acondicionó hasta un contenido de humedad del 12% (temperatura a 22 ° C y 66% de humedad relativa). Cada muestra delgada se colocó en el soporte incluido en el equipo de rayos-X, donde la fuente de rayos X corrió longitudinalmente a través de la muestra. Así, la fotografía de rayos-X fue obtenida y se

determinó el perfil de densidad. La exposición de las muestras se realizó utilizando un escáner de rayos X, marca Quintek Measurement Systems Inc., modelo QTRS-01X. Las condiciones de exposición se realizaron a una tensión de 7 kV en el tubo y las lecturas de densidad se llevaron a cabo durante 1 s cada 40  $\mu\text{m}$ .

*Densidad promedio y variación de la densidad calculada por densitometría de rayos-X.*

Primeramente, la densidad real promedio de la muestra delgada fue determinada previamente midiendo su peso, longitud y diámetro (Ecuación 1). Posteriormente, se usó la densitometría de rayos-X para determinar la densidad promedio de muestra delgada (Ecuación 2). Los valores de densidad calculados con el equipo de rayos-X fueron corregidos con el factor de corrección (Ecuación 3), que se calcula por la diferencia entre la densidad promedio de todas las mediciones obtenidas por densitometría (Ecuación 2) y la densidad promedio actual de la muestra delgada.

$$\text{Densidad actual} = \frac{\text{Peso de la muestra delgada (kg)}}{\text{Largo de la muestra delgada (m)} * \text{peso(m)} * \text{espesor(m)}} \quad (1)$$

$$\text{Densidad promedio por densitometría} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2)$$

$$\text{Factor de correction} = \text{Densidad promedio por densitometría} - \text{Densidad actual} \quad (3)$$

Donde: x: valor de densidad para cada medición, n: número de mediciones de la muestra delgada y i representa cada medición. El factor de corrección fue determinado para cada muestra delgada.

Una vez que el factor de corrección fue establecido para cada muestra delgada, se aplicó a cada valor de evaluación de densitometría (Ecuación 4). La corrección se aplicó a los valores de las direcciones transversales de cada muestra delgada. Una vez que fue calculada la densidad corregida, se calculó la densidad promedio (Ecuación 2) y su desviación estándar (Ecuación 5), con el fin de calcular el coeficiente de variación (Ecuación 6) para cada muestra

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

delgada. Walker y Dobb's (2007) propusieron la metodología que calcula la variación de densidad en madera mediante el uso de las lecturas de densitometría de rayos-X, y fue la que se utilizó para calcular el coeficiente de variación mediante densitometría.

$$\text{Densidad corregida}_i = \text{Densidad}_i - \text{Factor de corrección} \quad (4)$$

$$\text{Desviación estándar} = \sqrt{\frac{\sum(\text{Densidad corregida}_i - \text{Densidad corregida promedio}_i)^2}{n - 1}} \quad (5)$$

$$\text{Coeficiente de variación (\%)} = \frac{\text{Desviación estándar}}{\text{Densidad promedio corregida}_i} * 100 \quad (6)$$

Donde: densidad corregida representa el valor de densidad corregida en cada medición  $i$ th y densidad representa el valor de densitometría para cada medición  $i$ th.

#### *Perfil de densidad de la médula a la corteza.*

Las observaciones obtenidas, mediante la densitometría de rayos-X, fueron graficadas con los datos de distancia desde la médula y los valores de densidad. Los perfiles de variación de la densidad previamente corregidos se detallaron minuciosamente con el fin de obtener patrones de variación a lo largo de toda la densitometría. En estos patrones de variación fue identificada principalmente la variación de la densidad y específicamente la marcación de los anillos de crecimiento en las diferentes edades de los árboles, con la finalidad de establecer si existe una marcación de los anillos con la edad de árbol. La marcación en el perfil de rayos-X se evidenció por un aumento de la densidad al final del anillo, observándose un pico en el perfil de densidad.

#### *Marcación de anillos anuales y clasificación.*

Fotografías de rayos-X fueron obtenidas para todas las muestras delgadas. Las fotografías de rayos-X fueron tomadas con un equipo Hewlett Packard, modelo Faxitron LX-60 con una distancia de 12 cm entre la fuente de rayos-X y las muestras. Las condiciones de exposición fueron de 15 segundos a una tensión de 30 KV dentro del tubo. Para evaluar el marcado anual de los anillos, se crearon gráficos x-y a partir de la densitometría de rayos-X

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

para mostrar los perfiles de densidad y sobre este perfil se ubicó la fotografía de rayos-X de la muestra delgada. Luego, con el perfil de densidad y la fotografía de los rayos-X es posible observar el límite anual del anillo (Figura 2 f). Una vez marcados los anillos se procedió a clasificar el perfil de densidad en el anillo anual. Luego, cinco perfiles de densidad fueron catalogados y una vez obtenidos los patrones se procedió a clasificar todos los anillos presente en todos los perfiles de densidad.

#### *Límite de albura y duramen en el perfil de densidad.*

Una fotografía a color para cada muestra delgada (Figura 2g) fue tomada. Luego, para este perfil fotográfico y de densidad de cada árbol y cada altura fue establecido el límite de madera de albura y duramen. De esta forma puede establecerse si el perfil de densidad obtenido de la densitometría de rayos-X puede usarse para establecer el final del duramen y el inicio de la albura. El perfil de la región de densidad en la parte del límite de albura-duramen, fue ampliado junto al análisis de gráficos x-y, posteriormente fue colocada la correspondiente sección de la fotografía a color. También fue mostrado el límite de la corteza de la albura y el duramen con la densitometría de rayos-X, utilizando fotografías microscópicas. En los dos tipos de límites albura-duramen fue preparada la sección transversal con un micrótopo (American Optical Corp modelo 860) y luego se obtuvo una foto macroscópica con la ayuda de un estereoscopio (Fisher Scientific).

#### *Análisis de datos*

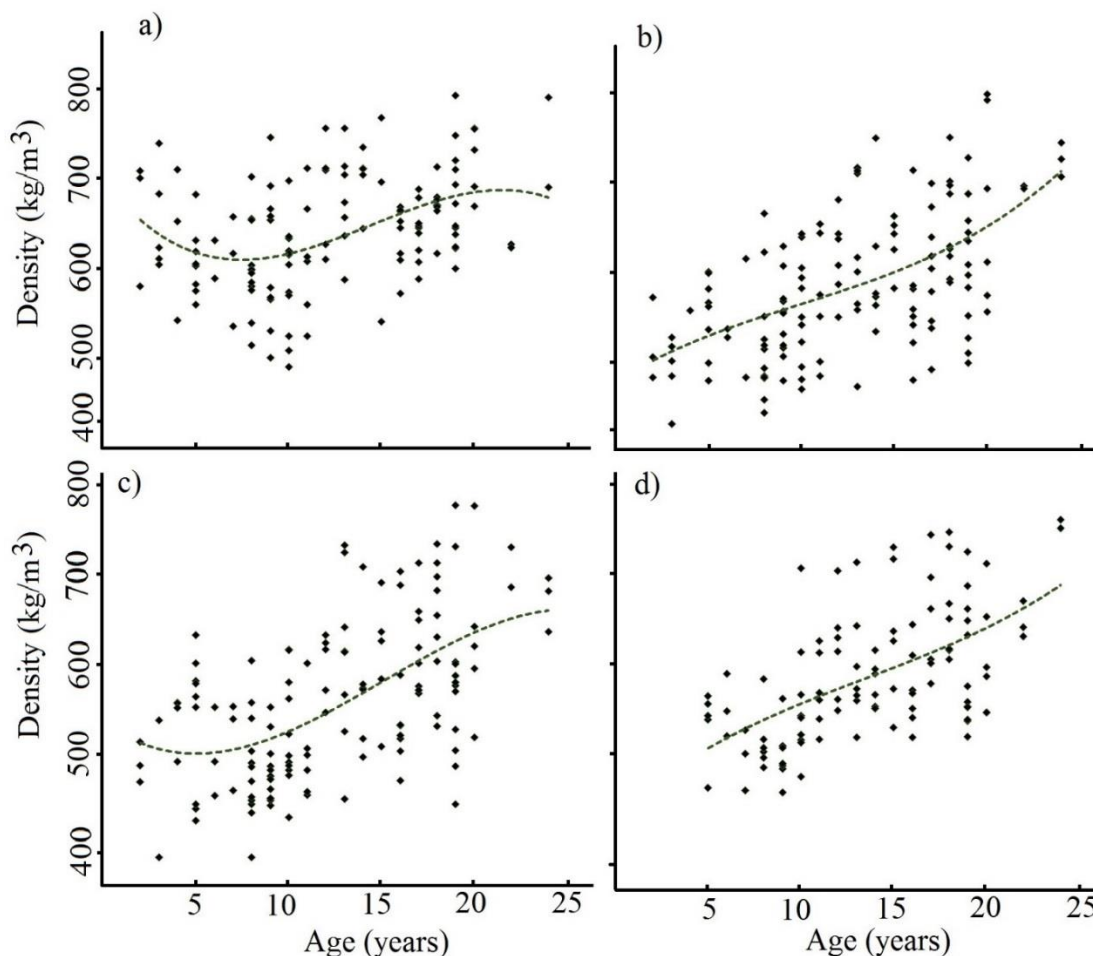
El análisis de datos consistió en calcular el promedio y coeficiente de variación de cada densitometría para así obtener un valor de densidad promedio por cada muestra. Seguidamente con los promedios se representó gráficamente la relación entre la densidad y los coeficientes de variación a diferentes edades y en las 4 alturas diferentes en el árbol estudiadas. En la clasificación del tipo de anillos en los perfiles de densidad se desarrolló una tabla de frecuencia donde se realizó el conteo de la cantidad de anillos por tipo y se obtuvo el porcentaje total de cada tipo de anillo de crecimiento, así como los porcentajes de cada anillo a diferentes edades.



## Resultados

### *Perfil de densidad de la madera con la edad del árbol*

La densitometría de rayos-X mostró que los árboles de teca, creciendo en plantaciones de rápido crecimiento, presentan una variación en la densidad con la edad del árbol entre 400 y 800 kg m<sup>-3</sup> (Figura 3 a-d). El perfil de la densidad de la madera con la edad del árbol muestra una tendencia creciente con el aumento de la edad (Figura 3 a-d). En relación con la altura de los árboles, se tiene que la densidad promedio mínima se presenta en la edad menor a 5 años, pero se observa una variación en este valor en las diferentes alturas. En la base del árbol, la densidad mínima promedio es sobre 550 kg m<sup>-3</sup> en edades menor a 5 años (Figura 3a), a una altura de 2,5 metros la densidad promedio mínima decae a 475 kg m<sup>-3</sup> en ese rango de edades (Figura 3b), en tanto que la altura de 5 metros, la densidad promedio mínima decae a 400 kgm<sup>-3</sup> en la edad menor a 5 años (Figura 3c). Finalmente a la altura de 7,5 metros, la densidad promedio mínima es aproximadamente 450 kg m<sup>-3</sup> (Figura 3d). Otro aspecto que muestra la relación del perfil de densidad de la madera con la edad del árbol, son las diferencias observadas en cada una de las alturas. En la base del árbol, cómo se indicó, la densidad disminuye hasta los 8 años, para luego empezar a ascender (Figura 3a). Mientras que las otras alturas muestreadas (2.5 m, 5.0 m y 7.5 m), el aumento de la densidad con la edad de los árboles es similar y constante (Figura 3b-c).

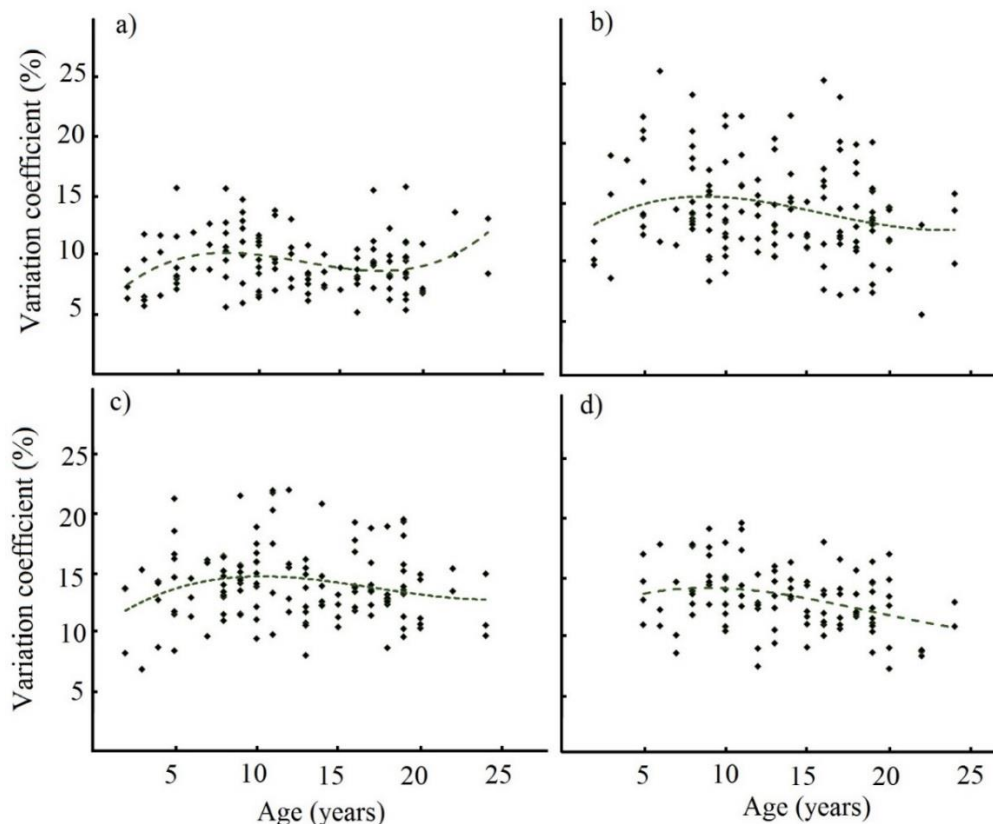


**Figura 3.** Variación de la densitometría de rayos-X a diferentes edades y diferente altura: (a) 0 metros, (b) 2,5 metros, (c) 5,0 metros y (d) 7,5 metros, en árboles de *Tectona grandis* en Costa Rica.

La variabilidad de la densidad determinada por medio del CV de los valores de densitometría rayos-X mostraron un rango entre 5 y 25% (Figura 4 a-d). En la base de los árboles, se presentaron los valores mas bajos y de menor variación entre el valor mínimo y máximo del CV (Figura 4a). Otra altura de menor variación entre el valor mínimo y máximo del CV fue la altura de 7,5 m, donde varió de 10 a 15% (Figura 4b-c). En las otras dos alturas (2,5 mts y 5,0 mts) se presenta una alta variación entre el valor mínimo y máximo del CV, entre 5% y 25% (Figura 4b-c).

La variación con el incremento de la edad, en general presenta un mismo comportamiento, valores del CV mostraron una tendencia creciente desde las edades

tempranas hasta los 10 años, a partir de esta edad hay un decrecimiento de CV hasta los 25 años (Figura 4). A pesar de esta tendencia, se observa que en la base del árbol el CV vuelve a ascender a apartir de los 20 años (Figura 4 a)., lo que no ocurre en las otras alturas (Figura 4b-c).

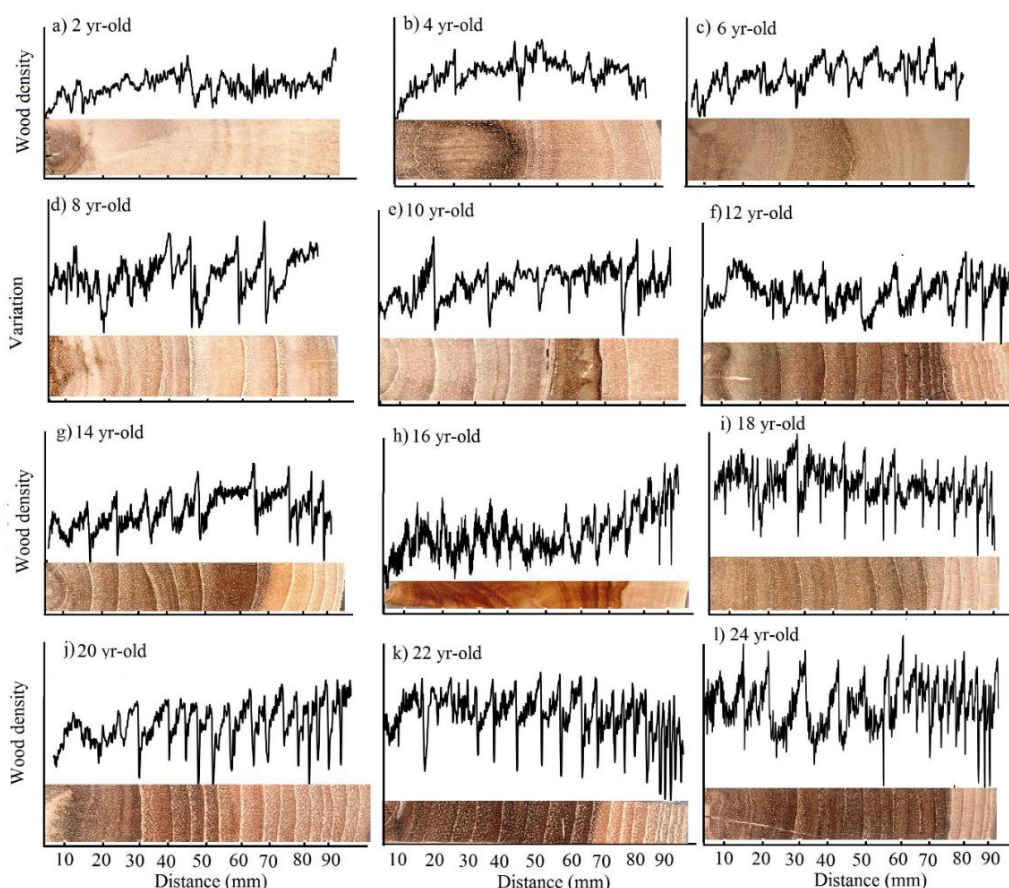


**Figura 4.** Coeficiente de variación de la densitometría de rayos-X a diferente edad y diferentes alturas: (a) 0 metros, (b) 2,50 metros, (c) 5,0 metros y (d) 7,5 metros, en árboles de *Tectona grandis* en Costa Rica.

#### *Perfil de densidad de la madera entre los anillos anuales de crecimiento*

El patrón del perfil de densidad de la madera entre los anillos anuales mostró que en las edades tempranas de los árboles, entre 0 y 8 años, no es posible determinar la variación entre anillos de crecimiento o específicamente el límite del anillo anual con la ayuda de las mediciones de densitometría de rayos-X. La marcación de anillos de crecimiento no es clara y se hace difícil de delimitar con la ayuda del perfil de densidad de la madera en las edades entre los 2 y 8 años (Figura 5 a-c). A edades entre los 8 y 12 años, el límite del anillo anual

comienza hacerse más evidente, se observa un decaimiento en el valor de la densidad luego de un ligero aumento de la densidad al finalizar el anillo. Sin embargo la marcación de cada anillo no es tan pronunciada (Figura 5 d-f). En las edades sobre 14 años (Figura 5 g-l), la marcación de cada uno de los anillos de crecimiento tiende hacerse más pronunciada al aumentar la edad de los árboles, ocurre un punto máximo al final del anillo e inmediatamente un decaimiento en los valores de densidad. Es importante hacer mención que aunque las mediciones de densitometría de rayos-X en los primeros años es poco evidente, cuando se hace la preparación de la muestra para observar macroscópicamente los anillos, estos son mas fácilmente observables. Esta diferencia entre la marcación con rayos-X y la preparación para la observación macroscópica es más evidente en las edades menores a 8 años (Figura 5a-c), que en las edades más avanzadas donde el perfil de densidad de la madera muestra más evidentemente el anillo, como se observa macroscópicamente (Figura e-f).



**Figura 5.** Patrón de variación de los anillos observados en la densitometría de rayos-X a diferentes edades en árboles de *Tectona grandis* en Costa Rica.

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

*Perfil de densidad de la madera dentro del anillo anual.*

En el estudio del perfil de densidad de la madera dentro del anillo, cinco perfiles de densidad fueron catalogados (Figura 6), los cuales se describen a continuación:

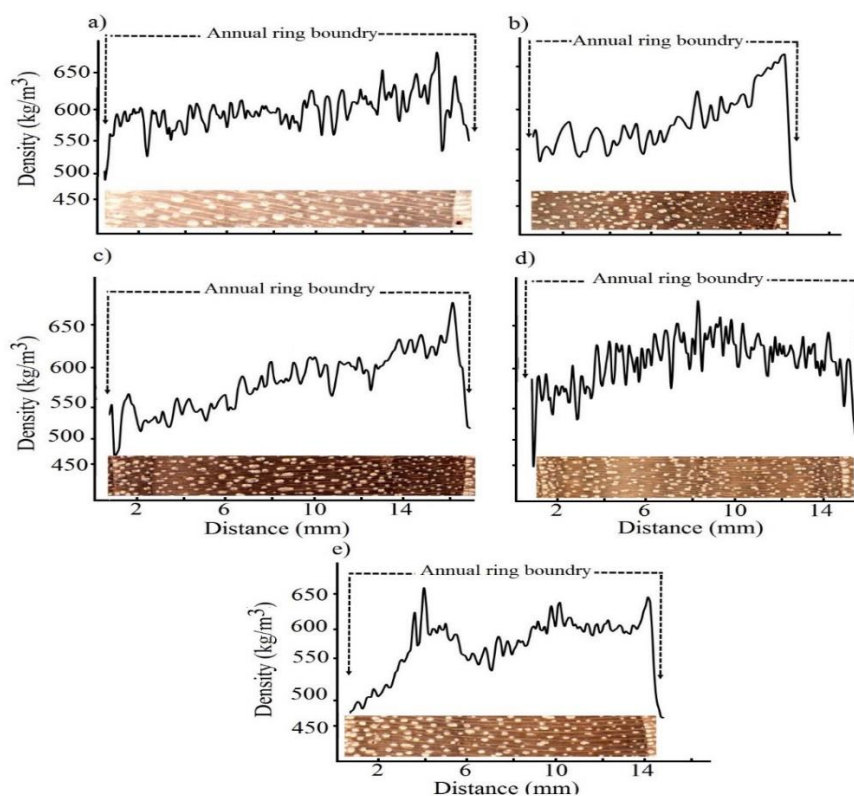
(1): uniforme: donde la variación de densidad se mantiene constante dentro del anillo anual y sin cambios significativos en la pendiente (Figura 6 a).

(2): estable-creciente: en el anillo se observa que la densidad es constante y al llegar a la mitad del anillo comienza a crecer hasta el final de anillo (Figura 6 b).

(3) creciente: la variación de densidad se mantiene en aumento desde el inicio del anillo hasta finalizar este (Figura 6 c).

(4): inestable: se visualiza una primera fase de aumento y luego una disminución obteniendo entre 2 y 3 picos de densidad en el centro del anillo (Figura 6 d).

(5): falso: presenta una marcación de anillo temprana con un pico de densidad entre los 2 mm y 4 mm de distancia (Figura 6 e).



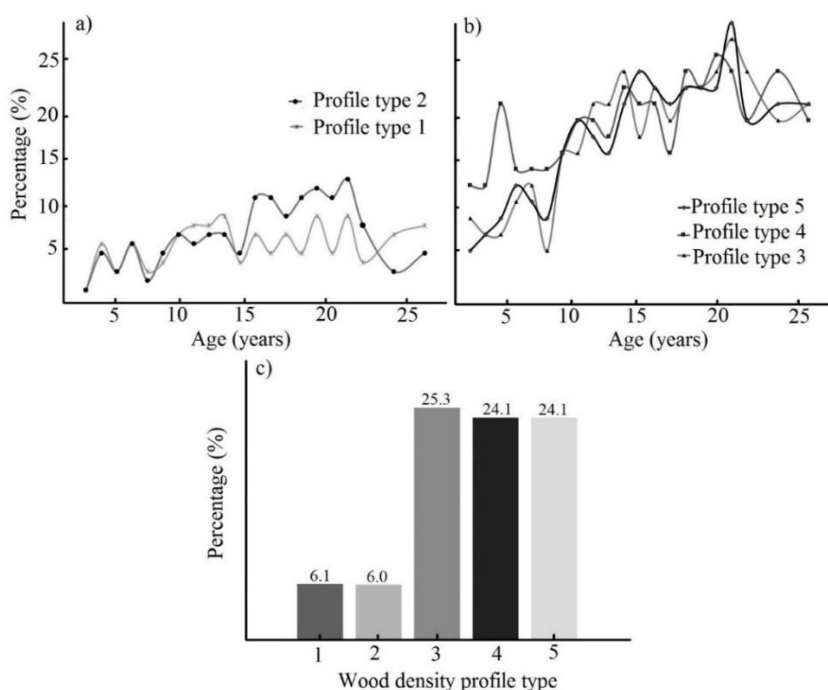
**Figura 6.** Clasificación de la forma del anillo observado en la densitometría de rayos-X: (a) uniforme, (b) estable-creciente, (c) creciente, (d) inestable y (e) falso en árboles de *Tectona grandis* en Costa Rica.

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”

En relación a la clasificación de los 5 tipos de perfil de densidad dentro del anillo anual en relación a la edad del árbol, mostró que los perfiles tipo 1 y 2 (uniforme y estable-creciente, respectivamente) muestran un aumento en la frecuencia de aparición entre las edades de 5 a 23 años, con porcentaje de 5 a 13% (Figura 7a). Por su lado, los perfiles 3, 4 y 5 aumentan la frecuencia de aparición con la edad de los árboles y con porcentaje similares para los 3 tipos de perfiles (Figura 7b).

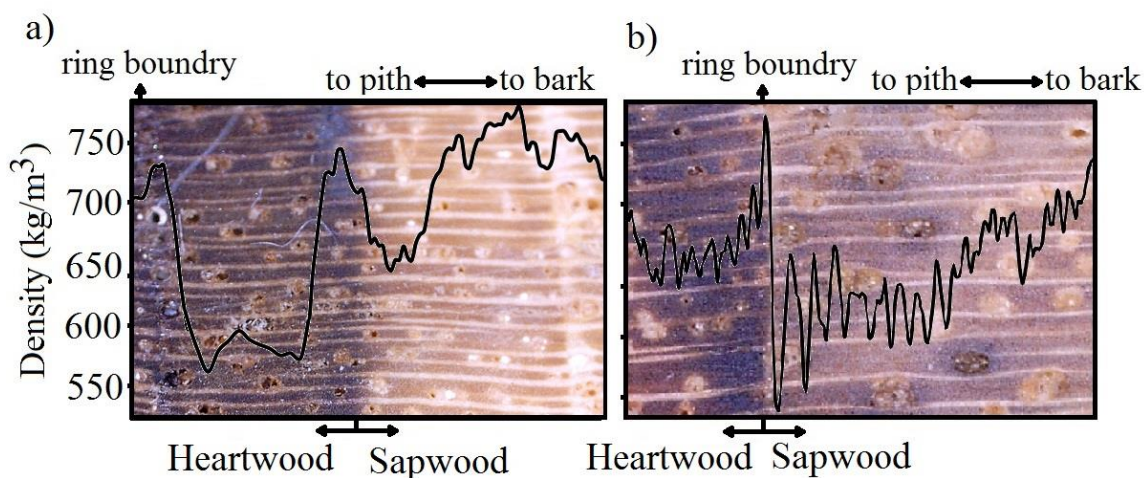
En la evaluación del perfil de densidad de la madera dentro del anillo anual, para la totalidad de los anillos se encontró que el los perfiles de densidad 1 y 2 (uniforme y estable-creciente respectivamente) presentaron el porcentaje más bajo de frecuencia en las densitometrías de rayos-X con un 6% (Figura 7 c). Mientras que los perfiles de densidad tipo 3, 4 y 5 (creciente, inestable y falso respectivamente) presentaron un crecimiento del porcentaje con la edad de los árboles, variando de 5% a 25%, con los valores más bajos en edades tempranas y los valores más altos en las edades de 23-25 años (Figura 7 c).



**Figura 7.** Porcentajes de frecuencia del tipo de anillo acorde al perfil de densidad dentro del anillo a diferentes edades: (a) perfil tipo 1: uniforme y 2: estable-creciente (b) perfil tipo 3: creciente, perfil tipo 4: inestable y perfil tipo 5: falso; y (c) porcentaje total por tipo de perfil de densidad en árboles de *Tectona grandis* en Costa Rica.

*Perfil de densidad para el límite albura-duramen.*

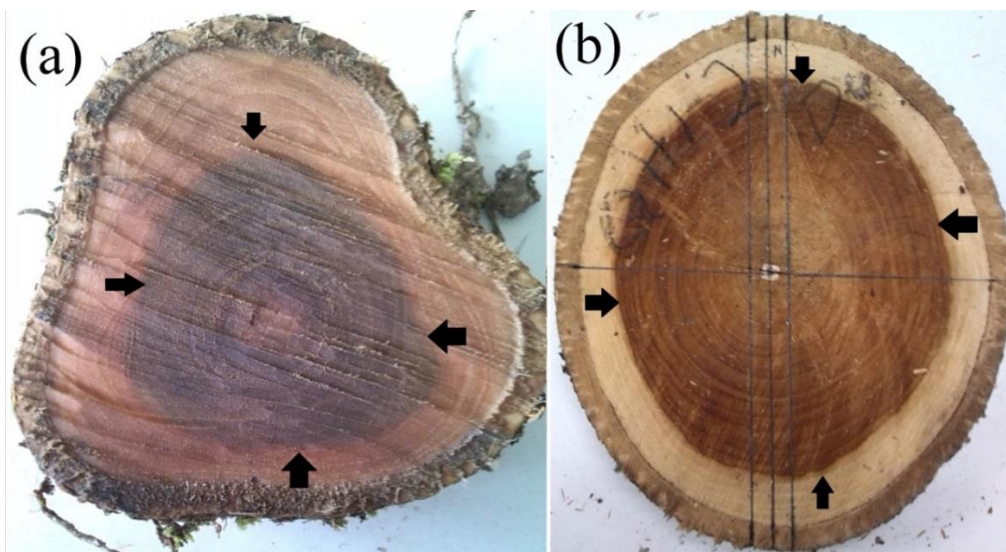
La marcación del límite entre albura y duramen utilizando el perfil de densidad de la madera mostró que no en todos los casos es posible determinar este límite, esto porque la variación de la densidad en el límite albura-duramen está influenciado por la presencia de anillos de crecimiento: un primer caso puede ocurrir cuando el límite entre albura y duramen está dentro del anillo de crecimiento (Figura 8a). En este caso el perfil de densidad de la madera muestra un aumento de la densidad hasta donde está el límite entre albura y duramen, pero un vez que desaparece el duramen la densidad decae en la sección de la albura (Figura 8a). El segundo caso ocurre cuando la límite entre albura y duramen coincide con el límite entre dos anillos de crecimiento (Figura 8b). En este caso el perfil de densidad de la madera presenta una disminución de la densidad (Figura 8 b).



**Figura 8.** Variación de la densidad de la madera a través de los anillos de crecimiento y relacionada con la anatomía de la sección transversal, final de la madera tardía (a) en la mitad del anillo y (b) en el límite del anillo en árboles de *Tectona grandis* en Costa Rica.

Así mismo no fue posible establecer si el límite albura-duramen en el límite del anillo anual está relacionado con la edad o la altura del árbol o no. Esto porque el límite visual entre albura y duramen es irregular en la sección transversal del disco (Figura 9). En un disco de forma irregular, la formación del duramen es irregular también en la sección transversal (Figura 9a) y en algunos casos cuando el disco es más circular, en este caso el límite albura-duramen es regular en la sección transversal del disco, pero es irregular en la periferia del

disco (Figura 9b). En ambos caso, el límite entre albura y duramen puede estar o no relacionado al anillo de crecimiento.



**Figura 9.** Límite entre albura y duramen en la sección transversal en árboles de *Tectona grandis* creciendo en plantaciones de rápido crecimiento. (a) Límite irregular presente en la sección transversal irregular and (b) regularidad relativa regularidad del límite albura-duramen. (La flecha indica el límite albura-duramen.)

## Discusión

### *Perfil de densidad con la edad del árbol.*

Los valores de densidad obtenidos por medio de la densitometría de rayos-X, entre 400 y 800 kg m<sup>-3</sup> (Figura 3 a-d), son similares a los encontrados por Kokutse et al. (2002) y Moya et al. (2009), los cuales reportan una densidad que varía entre 500 y 850 kg /m<sup>-3</sup>, para árboles creciendo en Togo and Costa Rica, respectivamente. El perfil de densidad de la madera muestra el aumento de la densidad con la edad de los árboles (Figura 3 a-d), también en concordancia con lo encontrado por Kokutse et al. (2004) en árboles de plantaciones en Togo y en Costa Rica para árboles de plantaciones en diferentes fertilidades de suelos (Moya et al., 2009), en climas tropical seco o tropical húmedo (Pérez y Kanninen, 2003) o en árboles de una edad de 9 años (Moya et al., 2013). La variación radial, específicamente el incremento radial, ocurre porque con el aumento de la edad los elementos anatómicos se ven afectados,



específicamente ocurre una disminución en la frecuencia de los radios debido a la concentración de auxinas, que son los principales componentes que regulan las divisiones de las células del cambium, la cual a su vez decrece al aumentar la edad, dando como resultado baja frecuencia de vasos y radios, (Zimmermann, 1982; Aloni y Zimmermann 1983), lo que provoca un aumento en la densidad con la edad del árbol, como lo encontrado en los árboles de teca desarrollados en plantaciones de rápido crecimiento (Figura 3a-b).

La disminución de la densidad de la madera con la altura del árbol, también ocurre en otras especies de plantación de rápido crecimiento en especies tropicales. Por ejemplo Moya y Muñoz (2010) reportaron una disminución desde la base del árbol hasta una altura comercial donde el diámetro es de 10 cm en las especies de *Acacia mangium*, *Cordia alliodora*, *Alnus acuminata*, *Bombacopsis quinata*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Dipteryx panamensis*, *Hieronyma alchomeoides*, *Samanea saman*, *Swietenia macrophylla*, *Terminalia amazonia* y *Terminalia oblonga*. La disminución de la densidad con la altura del árbol es explicado por las variaciones que se dan en la estructura anatómica de la madera. En la base de los árboles es necesario contar con fibras de paredes celulares más gruesas, ya que esta sección del árboles se encuentra sometido a mayores esfuerzos por mantener la verticalidad de los árboles (Guzmán et al., 2017). Así mismo la concentración de elementos decrece con la altura del árbol, provocando cambios en la composición de las fibras, vasos y radios (Zimmermann, 1982; Aloni y Zimmermann 1983)

Los cambios en la estructura anatómica con la edad en sentido radial (Priya y Bhat, 1998, 1999; Moya et al., 2009) o longitudinal (Cardoso et al., 2015) también explican el comportamiento del coeficiente de variación (CV) obtenidos en los perfiles de densidad de la madera medidos por medio de densitometría de rayos-X. La variabilidad de la densidad disminuye con la edad exceptuando en la base del árbol (Figura 4 a-b). Esto porque durante los primeros años de crecimiento de los arboles ocurre un cambio acelerado en las propiedades entre un año a otro hasta una edad donde las propiedades de la madera se comienzan a estabilizar (Zobel y Sprague, 2012). Mientras que en la base de los arboles algunos autores han encontrado que las propiedades de la madera presentan comportamientos anómalos durante toda el crecimiento del árbol (Evans et al., 2000), probablemente porque se encuentra sometido a muchos esfuerzos (Guzmán et al., 2017).

Un aspecto importante de destacar en los gráficos de los perfiles de densidad de la madera con la edad o el CV también con la edad (Figura 3 y 4), es el cambio en la tendencia luego de 5 años en el caso de la densidad (Figura 3), y a los 10 años en el caso del CV. Este

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

cambio en la variación probablemente está fundamentado por el cambio es la finalización de la producción de la madera juvenil e inicio de la formación de la madera madura. Dicho resultado concuerda con los establecido por Moya et al. (2009) y Moya et al. (2014), en donde basados en los cambios de la densidad y otros cambios en los elementos de los vasos, fibras y radios, establecieron el fin del periodo de madera juvenil y el inicio de la formación de la madera madura, en plantaciones de rápido crecimiento a la edad de 6 años. Pero dichos autores y del presente estudio no concuerda con los resultados presentados por Bhat et al. (2001) que establece una edad de 15-21 años, pero es justificado por el hecho que el estudio de Bhat et al. (2001) fue realizado para árboles creciendo en condiciones de más lento crecimiento de las que se tienen actualmente en plantaciones de rápido crecimiento, específicamente de árboles de bosque natural.

#### *Perfil de densidad de la Madera entre anillos anuales.*

Los perfiles de densidad de la madera a diferentes edades mostraron que a edades menores a los 8 años la marcación de los anillos de crecimiento no es clara, por lo contrario es difusa y confusa en árboles menores a estas edades (Figura 5a-d) o bien en maduros pero en los anillos de la parte interna, menor a 8 años, el perfil de densidad de la madera no muestra una marcación de anillo fácilmente visible (Figura 5e-l). No obstante, la identificación de estos anillos de crecimiento es fácilmente observado cuando se hace una preparación de la muestra (Figura 5a-d). Por lo que para identificar los anillos en edades tempranas de árboles de plantaciones de rápido crecimiento, se debe acompañar el perfil de densidad de la madera con un análisis microscópico como el que se muestra en la figura 5 a-l. Este comportamiento es explicado por las tasas de crecimiento de los árboles de teca a temprana edad, sobre todo en árboles de plantaciones de rápido crecimiento, cuyo objetivo es el acelerar el crecimiento con manejo para lograr la mayor producción de madera en pocos años (Kwame et al., 2014). Así mismo varios autores (Bhat y Priya, 2001; Kumar et al., 2002; Bhat y Priya 2004) sustentan que a edades menores a los 15 años los árboles provenientes de plantaciones presentan un crecimiento radial mayor. Esto da como resultado anillos de crecimiento más anchos y con porosidades difusas en los primeros años de desarrollo del árbol (Sousa et al., 2012), haciendo poco visible la marcación de los anillos de crecimiento por medio de densitometría de rayos-x (Figura 5a-d). A diferencia de las edades más avanzada,

donde se observa la presencia de anillos con porosidad anular o semi-anular, los cuales hacen una marcación de los anillos de crecimiento más clara (Figura 5e-l)

Un aspecto importante y que fue ampliamente discutido por Nocetti et al. (2011) es la formación y marcación de anillos en árboles de plantaciones. La formación de anillos en el árbol bajo condiciones tropicales no es uniforme, y va estar relacionado con el clima, la excentricidad del tronco, la competitividad del árbol y las características del suelo, que hacen que el desarrollo de los anillos de crecimiento sea variado de un árbol a otro (Akachuku y Abolarin, 1989; Sousa et al., 2012). Y como se ha mencionado, el manejo que se le da a las plantaciones, las cuales centran sus actividades silviculturales en los primeros años de los arboles hasta los 12 años (Bermejo et al. 2004), lo que genera que durante este periodo el crecimiento del árbol sea intervenido para buscar el mayor desarrollo del diámetro y así el perfil de densidad de la madera por densitometría de rayos-X sea muy dependiente de la edad (Figura 5 a-l).

#### *Perfil de densidad de la madera dentro de los anillos anuales.*

Los anillos de crecimiento por lo general están compuestos en una primera parte por una banda angosta de vasos de lumen abundantes y de gran tamaño, lo que provoca que en estas secciones la densidad del anillo sea menor, estos vasos van a ir disminuyendo gradualmente hasta el final del anillo donde la densidad aumenta (Nocetti et al., 2011). Este comportamiento se puede observar en los diferentes perfiles de densidad de la madera dentro de los anillos anuales obtenidos en el presente trabajo, específicamente en el anillo tipo 1 (uniforme), tipo 2 (estable-creciente) y tipo 3 (creciente) (Figura 6 a-c). Sin embargo la formación de los anillos de crecimiento es sensible a los cambios ambientales donde se desarrollan las diferentes plantaciones, especialmente ante la temperatura y la disponibilidad de agua (Schweingruber, 2007., De Micco et al., 2016). Cuando ocurre un cambio abrupto en el ambiente del árbol como suele suceder en climas tropicales, donde durante todo el año la variación hidrológica se mantiene constante, provoca que la actividad cambial no sea continua (De Micco et al., 2016). Esto da como resultado variación en las células cambiales que son las encargadas de definir el diámetro y frecuencia de los vasos al inicio del anillo y luego el diámetro y frecuencia de estos vasos disminuye al finalizar el anillo y por lo tanto aumento de la densidad (Worbes, 2010), como ocurre en los anillos tipo 1, 2 y 3 (Figura 6a-c).

---

#### INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

No obstante, durante el desarrollo del árbol en las condiciones de climas tropicales tan variable, puede dar como resultado la formación de múltiples zonas de crecimiento en un mismo año producto de una disminución de la precipitación durante un periodo de lluvias (Bhat y Priya, 2004; Dié et al., 2012). Estas variaciones da como resultados los anillos tipo 4 y 5, que probablemente sucede por variaciones en las condiciones de crecimiento durante un mismo año, dando como resultado la formación de varios picos de densidad en un mismo anillo de crecimiento (Figura 6 d-e).

En el estudio de la variación de los tipos de anillos con la edad (Figura 7), los anillos tipo 1 y 2, fueron relativamente constantes a diferentes edades de los árboles de teca de plantación, probablemente porque este tipo de anillos, en especial el tipo 1 se presenta presente en edades tempranas de los árboles. En relación con el aumento de la frecuencia con la edad de los anillos tipo 3, 4 y 5 (Figura 6 b-c), primeramente nos indica que este tipo de anillos en árboles adultos de plantaciones de rápido crecimiento son más frecuentes y el segundo aspecto es que en esas edades los árboles de plantación son más sensibles a las variaciones que producen alteraciones en el desarrollo normal del anillo, como en los anillos tipo 4 y 5 (Figura 6 d-e). Este comportamiento en la irregularidad del perfil de densidad de la madera de los anillos tipo 4 y 5 es explicado mediante los mecanismos hormonales que controlan la formación de madera en el árbol (Aloni, 2007). En la madera juvenil la principal hormona que controla el crecimiento es la auxina y esta como ya se ha mencionado va disminuyendo su disponibilidad con la edad (Aloni, 1991), al disminuir la auxina se da un aumento en la segregación de cetonina, este cambio afecta la tasa de síntesis de otras hormonas (Aloni, 2004; Aloni et al., 2006), provocando que el desarrollo del tejido del cambium sea aún más sensible en edades adultas, y que bajo algunas condiciones climáticas se desarrollen vasos de mayor o menor tamaño en periodos cortos durante el año (Aloni, 2001). Situación que se evidencio en el presente estudio, donde los arboles adultos son los que presentan los tipos de anillos menos continuos (Figura 6 a-c).

Basados en los anteriores resultados, se puede afirmar que los árboles de plantaciones de rápido crecimiento presentan una mejor definición de los anillos de crecimiento en relación con los árboles jóvenes cuando se utiliza el perfil de densidad de la madera por densitometría de rayos-X. Sin embargo existen alteraciones que pueden dificultar la identificación de los anillos de crecimiento en edades avanzadas, como por ejemplo los anillos tipo 4 y 5. Por lo que nuevamente es importante dar un acompañamiento a los perfiles

de densidad de la madera con una preparación de la muestra por pulimiento con lija para identificar visualmente los anillos.

#### *Perfil de densidad de la madera para el límite albura-duramen.*

El límite entre albura y duramen se logra evidenciar completamente por medio de los perfiles de densidad de la madera obtenidos por medio de densitometría de rayos-X, básicamente por una caída de la densidad de la madera, sea dentro del anillo (Figura 8a) o en el límite (Figura 8b). Sin embargo no se ha evidenciado que se presentará esto de una forma uniforme en la sección transversal del árbol (Figura 9). El proceso de transición de formación de duramen es ampliamente complejo y depende de muchos factores de crecimiento (Wang y Stewart, 2012; Moya et al., 2014). Otro aspecto y que no ha sido estudiado es la formación a diferentes alturas de los árboles, en el cual se ha señalado que el xilema sintetizado por el cambium a una altura determinada se va encontrar cada vez más alejado de la corona del árbol conforme el este se vaya envejeciendo (Mvolo et al., 2015), por ende este cambio no se va presentar de la misma forma en un grupo de árboles ni en un mismo individuo sino que va depender de la maduración del árbol así como la altura a la cual se esté muestreando. Entonces los resultados encontrados en el presente estudio de la utilización de perfiles de densidad de la madera para determinar el límite entre albura y duramen aunque puede ser posible, nuevamente es muy variable y debe observarse detenidamente el perfil y la sección transversal del disco debido a lo irregular de la formación de duramen (Figura 9a).

## **Conclusiones**

Los arboles de teca desarrollados en plantaciones de rápido crecimiento producen perfiles de densidad de la madera variables. En árboles menores a los 8 años y en las secciones internas de árboles maduros presentan la marcación de los anillos de crecimiento por densitometría de rayos-X poco definido, debido a las altas tasas de crecimiento en los primeros años. En estas edades y estas partes de árboles viejos se hace más difícil por lo que es mejor usar imágenes macro o microscópicas para lograr una diferenciación mayor de los anillos de crecimiento. En estas edades es frecuente que se presenten perfiles de densidad de la madera dentro del anillo tipo 1 (densidad uniforme a través del anillo anual) y tipo 2 (estable-creciente: una sección estable y luego creciente).

En tanto en árboles más adultos el perfil de densidad de la madera presenta una definición más adecuada de la marcación de los anillos de crecimiento. En estos árboles se presentan anillos tipo 3 (creciente), tipo 4 (inestable) y tipo 5 (falso anillo anual) que incrementan con la edad, producto a que en edades adultos los árboles son más sensibles a los cambios en las condiciones de crecimiento, quedando evidenciado en la formación de los anillos de crecimiento. Aunque este perfil de densidad de la madera muestra adecuadamente la formación, es importante conferir estos anillos con una preparación visual de la muestra.

El perfil de densidad de la madera muestra la marcación del límite entre albura y duramen, sin embargo en un caso se puede confundir con un cambio en los anillos de crecimiento, porque el límite albura-duramen coincide con la división del anillo. Pero cuando el límite entre albura y duramen ocurre a través del anillo anual se evidencia por medio de una caída en la densidad. No obstante esto debe ser observado en la sección transversal del disco ya que límite albura-duramen es irregular en la sección transversal del árbol.

### **Agradecimientos**

Los autores desean agradecer a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica y a todas la compañías que aportaron el material y otros tipos de asistencias para llevar a cabo este estudio.

### **Referencias**

- Aloni, R., 1991. Wood formation in deciduous hardwood trees. *Physiology Trees*, 175-197.
- Aloni, R., 2001. Foliar and axial aspects of vascular differentiation: hypotheses and evidence. *J plant growth regul* 20 (1), 22-34. <https://doi.org/10.1007/s003440010001>
- Aloni, R., 2004. The induction of vascular tissues by auxin. In 'Plant hormones: biosynthesis, signal transduction, action. PJ Davies, 471–492 pp.
- Aloni R. (2007) Phytohormonal mechanisms that control wood quality formation in young and mature trees. In: *The Compromised Wood Workshop 2007*. K. Entwistle, P. Harris, J. Walker (eds). The Wood Technology Research Centre, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, pp 1-22.
- Aloni, R., Zimmermann, M.H., 1983. The control of vessel size and density along the plant axis: a new hypothesis. *Differentiation* 24(1-3), 203-208. <https://doi.org/10.1111/j.1432-0436.1983.tb01320.x>

---

#### **INFORME FINAL DE PROYECTO**

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

- Aloni, R., Aloni, E., Langhans, M., Ullrich, C.I., 2006. Role of cytokinin and auxin in shaping root architecture: regulating vascular differentiation, lateral root initiation, root apical dominance and root gravitropism. *Ann Bot-London* 97(5), 883-893. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl027>
- Akachuku, A.E., Abolarin, D.A.O., 1989. Variations in pith eccentricity and ring width in teak (*Tectona grandis* LF). *Trees* 3(2), 111-116. <https://doi.org/10.1007/BF00191541>
- Bebarta, K.C., 1999. Teak: Ecology, silviculture, management, and profitability. International Book Distributors. Dehradun, India.
- Bermejo, I., Canellas, I., San Miguel, A., 2004. Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. *For Ecol Manage* 189(1-3), 97-110. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.031>
- Berrocal, et al., 2018. Development of heartwood, sapwood, bark, pith, specific gravity and dynamic modulus of elasticity of teak (*Tectona grandis*) in fast-growth plantations in Costa Rica. *J. For Res* (Submitted)
- Bhat, K.M., Priya, P.B., Rugmini, P., 2001. Characterization of juvenile wood in teak. *Wood Sci Technol* 34(6), 517-532. <https://doi.org/10.1007/s002260000067>
- Bhat, K.M., Priya, P.B. 2004. Influence of provenance variation on wood properties of teak from the Western Ghat region in India. *IAWA J* 25(3), 273-282. doi: 10.1163/22941932-90000365
- Brienen, R.J., Schöngart, J., Zuidema, P.A., 2016. Tree rings in the tropics: insights into the ecology and climate sensitivity of tropical trees. *Trop Tree Physiology*, 439-461. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5_20)
- Buajan, S., Pumijumng, N., Li, Q., Liu, Y., 2016. OXYGEN ISOTOPE ( $\delta^{18}\text{O}$ ) OF TEAK TREE-RINGS IN NORTH-WEST THAILAND. *J Trop For Sci* 28(4), 396-405. <http://www.jstor.org/stable/43956806>
- Buckley, B.M., Palakit, K., Duangsathaporn, K., Sanguantham, P., Prasomsin, P., 2007. Decadal scale droughts over northwestern Thailand over the past 448 years: links to the tropical Pacific and Indian Ocean sectors. *Clim Dynam* 29(1), 63-71. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0225-1>
- Cardoso, S., Sousa, V.B., Quilhó, T., Pereira, H., 2015. Anatomical variation of teakwood from unmanaged mature plantations in East Timor. *J Wood Sci* 61(3), 326-333. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1474-y>
- D'Arrigo, R., Allan, R., Wilson, R., Palmer, J., Sakulich, J., Smerdon, J.E., Ngkoimani, L.O., 2008. Pacific and Indian Ocean climate signals in a tree-ring record of Java monsoon drought. *Int J Climatol* 28(14), 1889-1901. <https://doi.org/10.1002/joc.1679>
- De Camino, R., Alfaro, M.M., Sage, L.F.M., 2002. Teak (*Tectona grandis*) in Central America. *FAO Plantations Working Papers FP/19*, Rome. Available at <http://www.fao.org/forestry/plantedforests/67508@170537/en/>

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

- De Micco, V., Campelo, F., De Luis, M., Bräuning, A., Grabner, M., Battipaglia, G., Cherubini, P., 2016. Intra-annual density fluctuations in tree rings: how, when, where, and why?. *IAWA J* 37(2), 232-259. doi: 10.1163/22941932-20160132
- Deb, J.C., Phinn, S., Butt, N., McAlpine, C.A., 2017. Climatic-Induced Shifts in the Distribution of Teak (*Tectona grandis*) in Tropical Asia: Implications for Forest Management and Planning. *Environ manage* 60(3), 422-435. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0884-6>
- Deepak, M.S., Sinha, S.K., Rao, R.V., 2010. Tree-ring analysis of teak (*Tectona grandis* Lf) from Western Ghats of India as a tool to determine drought years. *Emir J Food Agr* 22, 388-397. <https://doi.org/10.9755/ejfa.v22i5.4826>
- Dié, A., Kitin, P., Kouamé, F.N.G., Van den Bulcke, J., Van Acker, J., Beeckman, H., 2012. Fluctuations of cambial activity in relation to precipitation result in annual rings and intra-annual growth zones of xylem and phloem in teak (*Tectona grandis*) in Ivory Coast. *Ann Bot London* 110(4), 861-873. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs145>
- Evans, R., Stringer, S., Kibblewhite, R.P., 2000. Variation of microfibril angle, density and fibre orientation in twenty-nine *Eucalyptus nitens* trees. *Appita J* 53(6), 450-457.
- FAO., 2013. Natural teak forests decline, while planted teak forests increase. News article. Food and Agricultural Organisation of United Nations. <http://www.fao.org/news/story/en/item/129569/icode/>. Accessed 20 October 2017
- Guzmán, N., Moya, R., Murillo, O. 2017. Evaluation of Bent Trees in Juvenile Teak (*Tectona grandis* Lf) Plantations in Costa Rica: Effects on Tree Morphology and Wood Properties. *Forests* 8(3), 79. doi:10.3390/f8030079
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica)., 2017. Datos Climáticos. Disponible en <https://www.imn.ac.cr/web/imn/inicio> recuperado el 07 noviembre, 2017.
- Jacoby Jr, G.C., D'Arrigo, R.D., 1990. Teak (*Tectona grandis* LF), a tropical species of large-scale dendroclimatic potential. *Dendrochronologia*, 8, 83-98.
- Jacquin, P., Longuetaud, F., Leban, J. M., Mothe, F., 2017. X-ray microdensitometry of wood: a review of existing principles and devices. *Dendrochronologia* 42, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.01.004>
- Kwame, O.B., Adjei, L.E., Richmond, O., 2014. Assessing the growth performance of teak (*Tectona grandis* Linn. f.) coppice two years after clearcut harvesting. *Int J Agron Agr Res* 5(6), 36-4.
- Kallister, A.N, Collis, S.L., 2008. Genetic parameter estimates in a clonally replicated progeny test of teak (*Tectona grandis* Linn. F.). *Tree genet Genomes* 4, 237-245. <https://doi.org/10.1007/s11295-007-0104-2>
- Kokutse, A.D., 2002. Analyse de la qualité du bois de teck (*Tectona grandis* L. F) en plantation au Togo: formation du bois de coeur, propriétés mécaniques et durabilité. Doctoral dissertation, Bordeaux.

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**



- Kokutse, A.D., Bailleres, H., Stokes, A., Kokou, K., 2004. Proportion and quality of heartwood in Togolese teak (*Tectona grandis* Lf). For Ecol Manage 189(1-3), 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.041>
- Kollert, W., Cherubini, L., 2012. Teak resources and market assessment 2010. FAO Planted Forests and Trees Working Paper FP/47/E, Rome. Available at <http://www.fao.org/forestry/plantedforests/67508@170537/en/>
- Kumar, A.A., Srinivasa, Y.B., Chauhan, S.S., 2002. Growth rate convergence in teak (*Tectona grandis* L.). Curr Sci, 83(7), 808-809.
- Ladrach, W., 2009. Management of teak plantation for solid wood products. International Society of Tropical Foresters. ISTF news 2009, Florida, 25 p.
- Moya, R., Berrocal, A., Serrano, J.R., Tomazello Filho, M., 2009. Variación radial de la anatomía, densidad y durabilidad de la madera de teca (*Tectona grandis*) procedente de dos calidades de sitio y dos regiones climáticas de Costa Rica. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 18(2), 119-131.
- Moya, R., Marín, J.D., Murillo-Gamboa, O., Leandro-Zúñiga, L., 2013. Wood physical properties, color, decay resistance and stiffness in *Tectona grandis* clones with evidence of genetic control. Propiedades físicas, color, resistencia a la descomposición y la rigidez de la madera de clones de *Tectona grandis* con evidencia de control genético. Silvae Genet 62(3), 142-152. <https://doi.org/10.1515/sg-2013-0019>
- Moya, R., Marín, J.D., 2011. Grouping of *Tectona grandis* (Lf) clones using wood color and stiffness. New Forest 42(3); 329-345. <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9255-y>
- Moya, R., Pérez, D., 2008. Effects of physical and chemical soil properties on physical wood characteristics of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. J Trop Forest Sci, 248-257. <http://www.jstor.org/stable/23616701>
- Moya, R., Bond, B., Quesada-Pineda, H., 2014. A review of heartwood properties of *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations. Wood Sci Technol 48(2), 411-433. <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0618-3>
- Moya, R., Tomazello, M., 2007. Relationship between anatomical features and intra-ring wood density profiles in *Gmelina arborea* applying X-ray densitometry. Cerne 13(4), 384-392. <http://cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/view/277>
- Muangsong, C., Cai, B., Pumijumnong, N., Hu, C., Lei, G., 2016. Intra-seasonal variability of teak tree-ring cellulose  $\delta^{18}O$  from northwestern Thailand: A potential proxy of Thailand summer monsoon rainfall. Holocene 26(9), 1397-1405. doi: 10.1177/0959683616640045
- Mvolo, C. S., Koubaa, A., Beaulieu, J., Cloutier, A., Mazerolle, M.J., 2015. Variation in wood quality in white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss). Part I. Defining the juvenile–mature wood transition based on tracheid length. Forests 6(1), 183-202. doi:10.3390/f6010183

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

- Nocetti, M., Rozenberg, P., Chaix, G., Macchioni, N., 2011. Provenance effect on the ring structure of teak (*Tectona grandis* Lf) wood by X-ray microdensitometry. *Ann Forest Sci* 68(8), 1375-1383. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0145-4>
- Palakit, K., Duangsathaporn, K., Siripatanadilok, S., 2015. Climatic fluctuations trigger false ring occurrence and radial-growth variation in teak (*Tectona grandis* Lf). *iForest* 9(2), 286- 293. doi: 10.3832/ifor1100-008
- Pandey, D., Brown, C., 2001. Teak: a global overview. Unasylva-FAO, Roma, 3-13.
- Pérez, L.D., Kanninen, M., 2003. Heartwood, sapwood and bark content, and wood dry density of young and mature teak (*Tectona grandis*) trees grown in Costa Rica. Contenido de duramen, albura y corteza, y densidad de la madera seca de árboles de teca jóvenes y maduros (*Tectona grandis*) cultivados en Costa Rica. *Silva Fenn* 37(1), 45-54.
- Priya, P.B., Bhat, K.M., 1999. Influence of rainfall, irrigation and age on the growth periodicity and wood structure in teak (*Tectona grandis*). *IAWA J* 20(2), 181-192. doi: 10.1163/22941932-90000678
- Priya, P. B., Bhat, K.M., 1998. False ring formation in teak (*Tectona grandis* Lf) and the influence of environmental factors. *Forest Ecol Manag* 108(3), 215-222. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00227-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00227-8)
- Pumijumnong, N., 2013. Dendrochronology in Southeast Asia. *Trees* 27(2), 343-358. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0775-7>
- Ram, S., Borgaonkar, H. P., Sikder, A.B., 2008. Tree-ring analysis of teak (*Tectona grandis* LF) in central India and its relationship with rainfall and moisture index. *J Earth Syst Sci* 117(5), 637. <https://doi.org/10.1007/s12040-008-0058-2>
- Sangram, N., Duangsathaporn, K., Poolsiri, R., 2016. Effect of gases and particulate matter from electricity generation process on the radial growth of teak plantations surrounding Mae Moh power plant, Lampang province. *Agri Nat Resour* 50(2), 114-119. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2016.06.001>
- Schöngart, J., Bräuning, A., Barbosa, A.C. M.C., Lisi, C.S., de Oliveira, J.M., 2017. Dendroecological Studies in the Neotropics: History, Status and Future Challenges. *Dendroecology*, 35-73. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-61669-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-61669-8_3)
- Schweingruber, F.H., 2007. Wood structure and environment. Springer Science & Business Media, Berlin Heidelberg , 279 pp. doi: 10.1007/978-3-540-48548-3
- Shah, S.K., Bhattacharyya, A., Chaudhary, V., 2007. Reconstruction of June–September precipitation based on tree-ring data of teak (*Tectona grandis* L.) from Hoshangabad, Madhya Pradesh, India. *Dendrochronologia* 25(1), 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2007.02.001>
- Sinha S.K., Rao, R.V., Rathore, T.S., Borgaonkar, H.P., 2017. Growth ring structure and specific gravity variation in juvenile and mature wood of natural-grown teak (*Tectona grandis* Lf). *Wood is Good*, 105-115. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-3115-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3115-1_11)

---

**INFORME FINAL DE PROYECTO**

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

- Sinha, S.K., Deepak, M.S., Vijendra Rao, R., Borgaonkar, H.P., 2011. Dendroclimatic analysis of teak (*Tectona grandis* L. f.) annual rings from two locations of peninsular India. *Curr Sci* 100(1), 84-88. <http://moeseprints.incois.gov.in/id/eprint/722>
- Sousa, V.B., Cardoso, S., Quilhó, T., Pereira, H., 2012. Growth rate and ring width variability of teak, *Tectona grandis* (Verbenaceae) in an unmanaged forest in East Timor. *Rev Biol Trop* 60(1), 483-494. [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-77442012000100036&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442012000100036&lng=en&nrm=iso). ISSN 0034-7744.
- Tewari D.N., 1999. A monograph on teak (*Tectona grandis*). International Book Distrutors. Dehra Dun, India, 479 pp.
- Walker, N.K., Dodd, R.S., 2007. Calculation of wood density variation from x-ray densitometer data. *Wood Fiber Sci* 20(1), 35-43.
- Wang, M., Stewart, J.D., 2012. Determining the transition from juvenile to mature wood microfibril angle in lodgepole pine: a comparison of six different two-segment models. *Ann Forest Sci* 69(8), 927-937. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0226-z>
- Worbes, M., 2010. Wood anatomy and tree-ring structure and their importance for tropical dendrochronology. In: Junk W., Piedade M., Wittmann F., Schöngart J., Parolin P. (eds) *Amazonian Floodplain Forests. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*, vol 210. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-8725-6\\_17](https://doi.org/10.1007/978-90-481-8725-6_17)
- Zimmermann, M.H., Brown, C.L., 1982. *Trees: structure and function*. Springer-Verlag, New York, USA, 365 pp.
- Zobel, B., Van Buijtenen, J.P., 1989. *Wood variation, its causes and control*. Springer-Verlag, Berlin, 363 p.
- Zobel, B.J., Sprague, J.R., 2012. *Juvenile wood in forest trees*. Springer Science & Business Media. . Springer-Verlag, Berlin, 372 p.

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**

# Anexo 1

---

INFORME FINAL DE PROYECTO

**“Modelaje del porcentaje de duramen, módulo de elasticidad y densidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. de rápido crecimiento establecidas en Costa Rica”**