

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**COMPORTAMIENTO DE CLONES DE TECA (*TECTONA
GRANDIS* LINN.) A LOS 4,5 AÑOS EN UPALA, ZONA
NORTE DE COSTA RICA.**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL**

FABIÁN URIEL MOLINA SEGURA

**CARTAGO, COSTA RICA.
2017**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**COMPORTAMIENTO DE CLONES DE TECA (*TECTONA
GRANDIS* LINN.) A LOS 4,5 AÑOS EN UPALA, ZONA
NORTE DE COSTA RICA.**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL**

FABIÁN URIEL MOLINA SEGURA

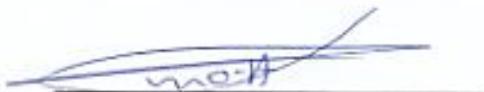
**CARTAGO, COSTA RICA.
2017**

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

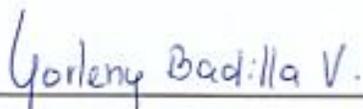
Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por Ph.D. Olman Murillo Gamboa, Ph.D. Roger Moya Roque, M.Sc. Yorlenny Badilla Valverde y M.Sc. William Hernández Castro como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



Olman Murillo Gamboa, Ph.D.
Director de tesis



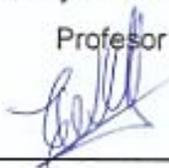
Roger Moya Roque, Ph.D.
Profesor lector



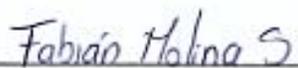
Ing. Yorlenny Badilla Valverde, M.Sc.
Profesor lector



Dorian Carvajal Vanegas
Coordinador Trabajos de graduación



Ing. William Hernández Castro, M.Sc.
Profesor lector



Fabián Molina Segura
Estudiante

DEDICATORIA

A DIOS, por darme la capacidad y salud para concluir con mi título universitario.

A mi familia, en especial a mi madre Elizabeth, que se sacrificó para sacarme adelante, y se esforzó para verme llegar hasta aquí. A mis hermanas Karla y Johanna, así como a mis sobrinas por brindarme el apoyo. Y a mi padre que le hubiera gustado verme llegar hasta donde lo he hecho.

Y a mi novia Gaby, que ha sido mi apoyo en mis últimos años de carrera, por darme la confianza para saber que, si soy capaz.

AGRADECIMIENTOS

Al profe Olman y a la profe Yorleny por los consejos, por darme su confianza, y por brindarme la oportunidad.

Al profe Moya, por ayudarme y transmitirme sus conocimientos, un excelente profesor, le agradezco el apoyo.

Al profe Edwin, por ser mi amigo, por enseñarme tantas cosas de la vida, por confiar en mí, y por hacerme ver que sí podía.

A todos los profesores y al personal de la Escuela de Ingeniería Forestal, y del TEC en general, que me ayudaron en mi formación como profesional.

A la familia de Gaby y de Rafa que me ha acompañado en esta etapa tan importante.

A mi amigo y compañero Rafa, a Gaby y a Maikol que me ayudaron arduamente con este trabajo, gracias.

A mis amigos y compañeros de la carrera, por haberme hecho pasar momentos tan agradables.

ÍNDICE GENERAL

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
Capítulo I. Evaluación de la interacción genotipo-edad a temprana edad, en una colección clonal de teca (<i>Tectona grandis</i> Linn.) en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	1
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
MATERIALES Y MÉTODOS	5
Diseño y ubicación del ensayo.....	5
Análisis de datos	7
RESULTADOS	10
DISCUSIÓN	22
Valores genéticos	22
Correlación genética	24
Ranking genético	25
CONCLUSIONES	26
RECOMENDACIONES	27
BIBLIOGRAFÍA	28

Capítulo II. Evaluación de las propiedades de la madera de una colección clonal de teca (*Tectona grandis* Linn.) en Upala, Zona Norte de Costa Rica. 31

RESUMEN	31
ABSTRACT	32
INTRODUCCIÓN	33
MATERIALES Y MÉTODOS	35
Diseño y ubicación del ensayo.....	35
Descripción del ensayo.....	35
Diseño experimental.....	35
Variables dasométricas.....	37
Determinación de PE 12% (Método no destructivo)	37
Determinación de PE (Método destructivo).....	38
Color del duramen	40
Diferencia del color.....	41
Análisis estadístico	42
RESULTADOS	44
Propiedades generales.....	44
Propiedades físicas	51
Color de la madera.....	56
Agrupamiento	60
Análisis de correlación.....	61
Efecto clon/bloque en las propiedades de la madera.....	64
Heredabilidad de las propiedades de la madera	64
DISCUSIÓN	66
Propiedades generales.....	66

Propiedades físicas	68
Análisis de correlación.....	70
Parámetros genéticos de las propiedades de la madera	71
CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	75

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Descripción de los parámetros generados por SELEGEN, mediante el procedimiento REML/BLUP, para una colección clonal de teca evaluada en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	8
Cuadro 2. Parámetros genéticos para el carácter diámetro (cm) de 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	10
Cuadro 3. Parámetros genéticos para el volumen total (m ³) de 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	11
Cuadro 4. Parámetros genéticos para el volumen comercial (m ³) de 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	12
Cuadro 5. Parámetros genéticos para diámetro (cm), volumen comercial (m ³), volumen total (m ³) de 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	14
Cuadro 6. Valores de F entre propiedades de la madera de <i>T. grandis</i>	51
Cuadro 7. Valores de F entre propiedades físicas de la madera de clones de <i>T. grandis</i>	56
Cuadro 8. Verosimilitud y varianza para los parámetros de color.....	60
Cuadro 9. Correlación genética entre propiedades de la madera en una colección clonal de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte, Costa Rica (N=48).	63
Cuadro 10. Resultado del análisis de varianza y los valores de los parámetros genéticos para las diferentes variables estudiadas en el ensayo clonal de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte, Costa Rica.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del ensayo clonal de <i>T. grandis</i> L. en México de Upala, Zona Norte, Costa Rica.	5
Figura 2. Croquis del ensayo clonal de <i>T. grandis</i> L. establecido en Upala, Zona Norte, Costa Rica, 2017.	7
Figura 3. a. Comportamiento de la heredabilidad individual; b. Comportamiento de la heredabilidad media clonal; en función de la edad para las variables diámetro (cm) y volumen comercial (m ³) en Upala, Zona Norte de Costa Rica.	13
Figura 4. Valores genéticos para el diámetro (cm), en un ensayo clonal de <i>T. grandis</i> , en Upala, Zona Norte de Costa Rica.	17
Figura 5. Valores genéticos para el volumen comercial (m ³), en un ensayo clonal de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.	18
Figura 6. Ranking genético del diámetro (cm) para los clones de <i>T. grandis</i> , Upala, Zona Norte de Costa Rica.	20
Figura 7. Ranking genético del volumen comercial (m ³) para los clones de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte, Costa Rica.	21
Figura 8. Croquis del ensayo clonal de <i>T. grandis</i> L, Upala, Zona Norte de Costa Rica, 2017.	36
Figura 9. Obtención del tarugo de madera de <i>T. grandis</i> con barreno Pressler. ...	37
Figura 10. Diseño del muestreo para la determinación de las propiedades de la madera.	38
Figura 11. Determinación del volumen mediante el Principio de Arquímedes.	39

Figura 12. Promedio del diámetro (d) (cm) para los 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	44
Figura 13. Promedio del espesor de albura (cm) para los 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte, Costa Rica.....	45
Figura 14. Promedio del duramen (cm) para los 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona de Costa Rica.....	46
Figura 15. Porcentaje de duramen (%) en 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	47
Figura 16. Promedio de espesor de corteza (cm) en 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.	48
Figura 17. Porcentaje de corteza en 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	48
Figura 18. Diámetro de duramen, porcentaje de duramen y espesor de albura 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> a diferentes alturas del fuste.	49
Figura 19. Espesor de corteza y porcentaje de corteza (%) en 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i>	50
Figura 20. Peso específico a 12% de 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	51
Figura 21. Densidad verde (g/cm ³) de 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	52
Figura 22. Contenido de humedad en verde (%) de 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	53

Figura 23. Peso específico básico de 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	54
Figura 24. Peso específico básico (a), densidad verde (g/cm ³) (b) y contenido de humedad verde (%) (c) de 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i>	55
Figura 25. Parámetro de luminosidad (L*) de 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	57
Figura 26. Parámetro de color rojo (a*) de 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	58
Figura 27. Parámetro de color amarillo (b*) de 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	59
Figura 28. Cambio de color (ΔE) de 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	59
Figura 29. Agrupamiento por similitud de color de duramen en 46 clones y dos testigos de <i>T. grandis</i> en Upala, Zona Norte de Costa Rica.....	60

Capítulo I. Evaluación de la interacción genotipo-edad a temprana edad, en una colección clonal de teca (*Tectona grandis* Linn.) en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Fabián Molina Segura ¹

RESUMEN

Se evaluó un ensayo clonal de *Tectona grandis* L., con el objetivo de observar el comportamiento del ensayo clonal a 2,5, 3,5 y 4,5 años de edad, y encontrar los mejores clones, para contribuir a aumentar su rentabilidad en plantaciones comerciales. El ensayo con 46 clones y dos testigos, se estableció en el 2012 en Upala, Zona Norte de Costa Rica, y fue evaluado en los años 2015, 2016 y 2017. El material genético provino de la selección de árboles plus realizadas por GENFORES (cooperativa costarricense de conservación y mejoramiento genético forestal). Se plantaron dos parejas por clon, separadas y distribuidas al azar dentro de cada bloque. En la medición del 2015 y 2017 se evaluó el diámetro, altura comercial y el volumen comercial por árbol. Los datos fueron analizados mediante el procedimiento REML/BLUP con ayuda del software SELEGEN de EMBRAPA, Brasil, para la estimación de los parámetros genéticos de la población de mejoramiento. Todos los caracteres evaluados exhibieron valores de heredabilidad individual superior a $h^2g > 0,246$. Mientras que la heredabilidad media del clon fue superior a $h^2mc > 0,88$. Los clones 30e, 9x, 1x y 11c se situaron en las primeras posiciones del ranking a la edad de 4,5 años con respecto al diámetro y volumen comercial. Las correlaciones genéticas entre los caracteres evaluados mostraron diámetro se expresa estable a partir de 3,5 años en esta especie. La ganancia genética esperada para el diámetro si se plantaran los 10 mejores clones del ranking genético fue de 11,5%, mientras que para el volumen comercial fue de 28%.

Palabras Claves: *Tectona grandis*, ensayo clonal, selección temprana, ganancia genética, Costa Rica, forestería clonal.

ABSTRACT

We assessed a clonal trial of *Tectona grandis* L., to observe the behavior of the clonal assay at 2.5, 3.5 and 4.5 years of age, and find the best clones, to help increase their profitability in commercial plantations. The trial with 46 clones and two witnesses, was established in the 2012 in Upala, northern zone of Costa Rica, and was evaluated in the years 2015, 2016 and 2017. The genetic material came from the selection of trees plus made by GENFORES (Costa Rican cooperative of Conservation and forest genetic improvement). Two pairs per clone were planted, separated and randomly distributed within each block. In the measurement of 2015 and 2017, the diameter, commercial height and commercial volume per tree were assessed. The data were analyzed using the REML/BLUP procedure with the help of the software of the EMBRAPA, Brazil, for the estimation of the genetic parameters of the breeding population. All evaluated characters exhibited values of individual heritability superior to $h^2_g > 0.246$. Whereas the average heritability of the clone was superior to $H^2_{MC} > 0.88$. The Clones 30e, 9 x, 1 x and 11 were placed in the first positions of the ranking at the age of 4.5 years with respect to the diameter and commercial volume. The genetic correlations between the evaluated traits showed diameter is expressed stable from 3.5 years in this species. The expected genetic gain for the diameter if planted the 10 best clones of the genetic ranking was 11.5%, while for the commercial volume was 28%.

Key words: *Tectona grandis*, clonal essay, early selection, genetic gain, Costa Rica, clonal forestry.

INTRODUCCIÓN

Tectona grandis Linn. es una especie latifoliada originaria del sureste asiático, proveniente de bosques de tipo monzónico, desde seco tropical hasta bosque húmedo tropical. Fue introducida desde Trinidad y Tobago a Costa Rica en los años 20 por la compañía bananera (Keogh, 1980), pero a partir de los años 80 inicia su expansión y popularidad en el país (CATIE, 1986).

La teca ha sido una de las especies maderables ampliamente difundida por todo el mundo. Codiciada por las múltiples propiedades de su madera entre las que se destacan belleza, durabilidad, resistencia al ataque de hongos y termitas, tiene distintos usos tales como ebanistería, muebles, para construcción de las cubiertas de barcos (Fonseca, 2004). En Costa Rica, ha sido una de las especies más utilizadas para la reforestación (Róger Moya, 2002), cuya expansión ha motivado un avance importante en mejoramiento genético (Murillo, Badilla y Rojas 2016; Badilla y Murillo 2017).

De Camino y Morales (2013) señalan que el uso de clones debe ser uno de los principios en la silvicultura moderna. Tienen como fin la disminución de la variabilidad de la plantación y el aumento de su productividad (Monteuuis y Maître, 2006). Solórzano (2010) menciona que los ensayos clonales son esenciales para la evaluación del comportamiento de los materiales, donde uno de los objetivos es seleccionar los individuos con un crecimiento superior, que serán utilizados para el avance de los programas de mejoramiento genético.

El mejoramiento genético se ha convertido en la mejor opción para aumentar el rendimiento comercial de las plantaciones y permite la reducción del tiempo de los turnos de rotación (Solórzano, 2010). Varios estudios de evaluación genética clonal se han desarrollado previamente con clones de teca en Costa Rica y Nicaragua (Vallejos 2007; Chacón 2012; Loría 2016; Pérez 2016). En una compilación de los avances alcanzados en los últimos 15 años, Murillo, Badilla y Rojas (2016) y Badilla y Murillo (2017) reportan valores de aproximadamente un 20-25% de ganancia genética en volumen comercial y una reducción de entre 1 y 2 años en alcanzar el turno de rotación.

Uno de los pilares más importantes en programas de mejoramiento consiste en la rigurosidad y veracidad de selección de árboles genéticamente superiores a la población original (Zobel y Talbert 1984; Duarte 2012; Solares 2014).

El uso del software especializado, como SELEGEN (Resende, 2007), permite evaluar estadísticamente e identificar con precisión el material genético superior, mediante la determinación de su valor genético.

La estimación de la heredabilidad es quizá uno de los parámetros de mayor relevancia (Eleotério, Vilela, da Silva, y Ribeiro, 2011). Zobel y Talbert (1988) explican que para predecir la respuesta de la selección en especies forestales, la heredabilidad y el diferencial de selección son indispensables (Balcorta y Vargas, 2004).

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar una colección de clones de teca (*Tectona grandis*), a los 4,5 años de edad, en Upala, Zona Norte de Costa Rica. Se espera seleccionar el material genético de mayor adaptación y desarrollo a las condiciones ambientales de Upala. Este estudio forma parte de los trabajos de la cooperativa de mejoramiento genético forestal (GENFORES), dirigida desde la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño y ubicación del ensayo

El ensayo se ubica en la Región Huetar Norte de Costa Rica, en la localidad de México de Upala (10°57'25,90" longitud este 84°03'00,03" latitud norte, figura 1). Fue establecido en una propiedad de la empresa Puro Verde Paraíso Forestal S.A. en conjunto con GENFORES (Instituto Tecnológico de Costa Rica).

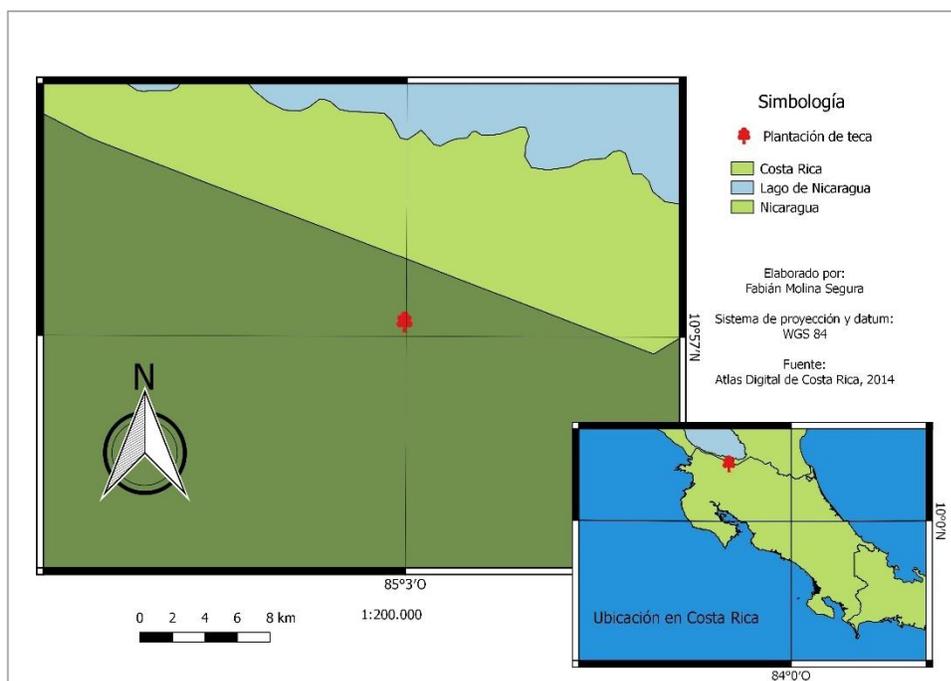


Figura 1. Ubicación del ensayo clonal de *T. grandis* L. en México de Upala, Zona Norte, Costa Rica.

El cantón de Upala se localiza a una altitud aproximada de 42 m.s.n.m., registra una precipitación promedio de 2395 mm/año, temperatura promedio anual de 26°C, la humedad relativa puede llegar a 90% y el viento puede alcanzar velocidades de 8,3 km/h (Villalobos, Jiménez, Hernández, Córdova, y Solano, 2013). El sitio tiene suelos ácidos del orden Inceptisoles, profundos, bien drenados y con alto contenido de materia orgánica (Ortiz y Cordero, 2014). Se ubica en la zona de vida bosque húmedo tropical transición a perhúmedo, según Holdridge (1987).

El ensayo clonal de teca se estableció el 23 de octubre del 2012, consta de 46 clones, que fueron seleccionados en plantaciones de Upala, San Carlos y Guanacaste, además de dos testigos, para un total de 48 accesiones. El terreno para el establecimiento del ensayo fue subsolado a 30 cm de profundidad, rastreado y posteriormente se hicieron surcos.

El diseño experimental del ensayo fue desarrollado por GENFORES (Murillo, Obando, Badilla, y Araya, 2001), que consiste en seis bloques completos al azar. Dentro de cada bloque se establecieron aleatoriamente y separados espacialmente, dos parejas de rametos/clon, distribuidas aleatoriamente (Figura 2).

Esta distribución espacial permite realizar un primer raleo con criterio silvicultural, de una intensidad de un de 50%, donde se selecciona al mejor individuo de cada pareja, basado en sus atributos de adaptación, crecimiento y calidad de tronco (Murillo y Badilla, 2004).

El ensayo fue evaluado a los 2,5, 3,5 y 4,5 años de edad. A todos los árboles se les midió el diámetro (1,3 m) con cinta diamétrica. La altura comercial se estimó con base en el número de trozas comerciales posibles (de 2,5 m de largo), hasta donde el fuste se bifurcó o perdió la dominancia apical. El volumen comercial fue estimado mediante la ecuación universal:

$$VCom = \frac{\pi}{4} * (d/100)^2 * l * f \quad (1)$$

Donde:

VCom= volumen comercial (m³)

d= diámetro a la altura del pecho (m)

l= altura comercial (m)

f=factor de forma 0,5 (Piedra, 2001).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	30x	30x	48e	48e	33e	33e	48e	48e	30x	30x	26e	26e	22x	22x	24e	24e	20e	20e	33e	33e	26e	26e	11c	11c	
	55e	55e	27e	27e	49x	49x	14c	14c	28p	28p	46e	46e	1x	1x	22e	22e	30e	30e	20e	20e	42cm	42cm	30e	30e	
	31e	31e	51p	51p	28p	28p	42cm	42cm	17e	17e	21e	21e	3x	3x	44e	44e	51p	51p	51p	51p	5M	5M	8c	8c	
	33p	33p	4c	4c	20e	20e	27e	27e	22x	22x	44e	44e	48e	48e	12cm	12cm	42cm	42cm	30x	30x	53e	53e	28p	28p	
	53	53	8c	8c	46e	46e	11c	11c	4M	4M	16e	16e	9x	9x	31e	31e	4c	4c	16e	16e	49x	49x	T2	T2	
	16e	16e	7x	7x	32cm	32cm	3M	3M	8c	8c	53e	53e	23p	23p	42e	42e	32e	32e	23p	23p	42e	42e	T1	T1	
	3	3	17e	17e	24e	24e	31cm	31cm	12cm	12cm	5M	5M	28p	28p	8c	8c	T1	T1	17e	17e	4M	4M	32cm	32cm	
I	22e	22e	22x	22x	37c	37c	30c	30c	42e	42e	4c	4c	11c	11c	16e	16e	5x	5x	14c	14c	30c	30c	5x	5x	II
	26e	26e	4M	4M	11c	11c	7x	7x	T1	T1	3x	3x	53e	53e	31cm	31cm	46e	46e	53	53	4c	4c	21e	21e	
	T2	T2	1x	1x	53e	53e	55e	55e	1x	1x	22e	22e	14c	14c	30x	30x	5M	5M	33p	33p	4	4	3M	3M	
	5M	5M	30c	30c	42cm	42cm	24e	24e	23p	23p	4	4	49x	49x	21e	21e	30c	30c	12cm	12cm	24e	24e	22e	22e	
	9x	9x	44e	44e	21e	21e	53	53	51p	51p	31e	31e	26e	26e	4	4	55e	55e	32e	32e	7x	7x	37c	37c	
	14c	14c	3M	3M	3x	3x	49x	49x	9x	9x	5x	5x	33p	33p	53	53	3	3	3x	3x	31e	31e	27e	27e	
	4	4	32e	32e	42e	42e	T2	T2	33e	33e	30e	30e	37c	37c	3M	3M	27e	27e	48e	48e	1x	1x	44e	44e	
	30e	30e	23p	23p	12cm	12cm	20e	20e	32cm	32cm	33p	33p	32cm	32cm	33e	33e	4M	4M	55e	55e	31cm	31cm	22x	22x	
	31cm	31cm	5x	5x	T1	T1	32e	32e	37c	37c	3	3	17e	17e	7x	7x	T2	T2	3	3	46e	46e	9x	9x	
	16e	16e	3	3	33p	33p	30c	30c	11c	11c	23p	23p	T2	T2	51p	51p	3M	3M	32e	32e	17e	17e	5x	5x	
	22e	22e	3x	3x	1x	1x	49x	49x	31e	31e	30x	30x	53e	53e	30e	30e	12cm	12cm	4M	4M	26e	26e	3	3	
	30x	30x	21e	21e	9x	9x	46e	46e	4c	4c	51p	51p	42cm	42cm	30x	30x	28p	28p	37c	37c	27e	27e	24e	24e	
	23p	23p	22x	22x	32cm	32cm	20e	20e	1x	1x	26e	26e	37c	37c	20e	20e	33e	33e	46e	46e	31e	31e	51p	51p	
	30e	30e	20e	20e	33e	33e	27e	27e	7x	7x	4	4	T1	T1	1x	1x	16e	16e	48e	48e	33e	33e	14c	14c	
	55e	55e	T2	T2	42cm	42cm	3	3	53	53	32e	32e	24e	24e	4c	4c	14c	14c	23p	23p	7x	7x	42e	42e	
	17e	17e	8c	8c	28p	28p	17e	17e	3M	3M	42cm	42cm	4	4	9x	9x	33p	33p	53	53	30e	30e	30c	30c	
III	32e	32e	42e	42e	27e	27e	30e	30e	14c	14c	48e	48e	3	3	31e	31e	27e	27e	11c	11c	4c	4c	12cm	12cm	IV
	3M	3M	44e	44e	48e	48e	37c	37c	21e	21e	28p	28p	23p	23p	31cm	31cm	42e	42e	55e	55e	30x	30x	32cm	32cm	
	31e	31e	53	53	49x	49x	9x	9x	32cm	32cm	22x	22x	17e	17e	48e	48e	49x	49x	T2	T2	33p	33p	53e	53e	
	4M	4M	26e	26e	11c	11c	53e	53e	55e	55e	5M	5M	53	53	32e	32e	4M	4M	28p	28p	8c	8c	5M	5M	
	T1	T1	7x	7x	51p	51p	T2	T2	44e	44e	T1	T1	32cm	32cm	46e	46e	26e	26e	4	4	22x	22x	20e	20e	
	5M	5M	14c	14c	4c	4c	3x	3x	8c	8c	12cm	12cm	3x	3x	30c	30c	55e	55e	31cm	31cm	21e	21e	42cm	42cm	
	53e	53e	5x	5x	30c	30c	24e	24e	33p	33p	4M	4M	21e	21e	22x	22x	22e	22e	3M	3M	22e	22e	44e	44e	
	31cm	31cm	24e	24e	4	4	5x	5x	33e	33e	42e	42e	5M	5M	11c	11c	8c	8c	9x	9x	49x	49x	T1	T1	
	37c	37c	12cm	12cm	46e	46e	22e	22e	31cm	31cm	16e	16e	7x	7x	5x	5x	44e	44e	1x	1x	16e	16e	3x	3x	
	51p	51p	T2	T2	32cm	32cm	32e	32e	7x	7x	5M	5M	53	53	42cm	42cm	32cm	32cm	21e	21e	53e	53e	37c	37c	
	33e	33e	7x	7x	20e	20e	55e	55e	33p	33p	42cm	42cm	22e	22e	30e	30e	4	4	32e	32e	49x	49x	12cm	12cm	
	30x	30x	14c	14c	53e	53e	1x	1x	49x	49x	30x	30x	33p	33p	30c	30c	16e	16e	4c	4c	48e	48e	42cm	42cm	
	53	53	23p	23p	8c	8c	14c	14c	9x	9x	28p	28p	53e	53e	3x	3x	23p	23p	24e	24e	5M	5M	14c	14c	
	1x	1x	9x	9x	42cm	42cm	26e	26e	3x	3x	16e	16e	44e	44e	14c	14c	22x	22x	30e	30e	32cm	32cm	22x	22x	
	46e	46e	4	4	27e	27e	30c	30c	48e	48e	5x	5x	42e	42e	3M	3M	12cm	12cm	5x	5x	26e	26e	23p	23p	
	12cm	12cm	48e	48e	31e	31e	23p	23p	T2	T2	22x	22x	55e	55e	17e	17e	51p	51p	31e	31e	22e	22e	16e	16e	
V	4c	4c	11c	11c	24e	24e	44e	44e	22e	22e	17e	17e	5M	5M	9x	9x	T1	T1	53	53	T1	T1	8c	8c	VI
	21e	21e	37c	37c	31cm	31cm	53e	53e	31cm	31cm	46e	46e	21e	21e	T2	T2	33e	33e	30x	30x	T2	T2	9x	9x	
	30e	30e	49x	49x	42e	42e	4c	4c	8c	8c	20e	20e	1x	1x	32e	32e	49x	49x	33p	33p	4M	4M	33e	33e	
	22e	22e	3	3	4M	4M	21e	21e	31e	31e	4	4	7x	7x	3	3	46e	46e	3x	3x	42e	42e	55e	55e	
	28p	28p	33p	33p	16e	16e	12cm	12cm	27e	27e	3	3	20e	20e	31e	31e	26e	26e	11c	11c	30c	30c	27e	27e	
	5x	5x	T1	T1	17e	17e	30e	30e	37c	37c	4M	4M	27e	27e	4c	4c	31cm	31cm	3M	3M	28p	28p	3	3	
	5M	5M	3M	3M	30c	30c	42e	42e	24e	24e	T1	T1	11c	11c	4M	4M	5x	5x	20e	20e	46e	46e	51p	51p	
	22x	22x	44e	44e	55e	55e	11c	11c	53	53	32cm	32cm	30x	30x	48e	48e	28p	28p	44e	44e	17e	17e	7x	7x	
	26e	26e	3x	3x	32e	32e	51p	51p	33e	33e	3M	3M	8c	8c	37c	37c	24e	24e	4	4	1x	1x	31cm	31cm	

Figura 2. Croquis del ensayo clonal de *T. grandis* L. establecido en Upala, Zona Norte, Costa Rica, 2017.

Nota: Las casillas con fondo blanco corresponden a los árboles faltantes del ensayo.

Análisis de datos

La información recolectada en campo se ordenó en una base de datos, mediante el programa Excel 2016, donde se calculó el volumen total. La base de datos, se analizó con el software SELEGEN (Resende, 2007), el cual estimó los componentes de varianza para las variables deseadas. SELEGEN utilizó el procedimiento REML/BLUP para obtener estimados no sesgados de los componentes de varianza y demás parámetros genéticos.

El análisis de los clones se realizó con base en el modelo de SELEGEN para ensayos clonales no emparentados, en una sola localidad, varias plantas por parcela:

$$y = Xr + Zg + Wp + e \quad (2)$$

Donde “y” es el vector de datos, “r” es el vector del efecto de repetición (asumido como fijo) y sumados a la media general, “g” es el vector del efecto genético total (asumido como aleatorio); “p” es el vector de los efectos de parcela y “e” es el vector del término del error o residuo (aleatorio). Las letras mayúsculas representan las matrices de incidencia de estos efectos (Resende, 2007).

Cuadro 1. Descripción de los parámetros generados por SELEGEN, mediante el procedimiento REML/BLUP, para una colección clonal de teca evaluada en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Parámetro	Descripción
Vg	Componente de varianza genética total
Vparc	Componente de varianza de la interacción bloque x clon
Ve	Componente de varianza de los residuos no explicados por el modelo
Vf	Varianza fenotípica total = Vg+Vparc+Ve
h²g	Heredabilidad individual en sentido amplio
c²parc	Coefficiente de determinación de la parcela (bloque x clon)
h²mc	Heredabilidad media del clon
Exactitud	Precisión en la estimación de los parámetros
Rgloc	Correlación genotípica entre el desempeño de los genotipos en varias edades
CVgi%	Coefficiente de variación genética
CVe%	Coefficiente de variación experimental
CVr	Coefficiente de variación relativa = CVgi/ CVe
PEV	Varianza del error de predicción de los valores genotípicos
SEP	Desviación estándar del valor genotípico de cada clon

Se determinó el ranking genético en función del diámetro para todos los años (2,5, 3,5 y 4,5), así como para el volumen comercial a las edades de 2,5 y 4,5 años, con base en los valores genéticos estimados por los procedimientos REML/BLUP en el software SELEGEN.

Se determinó luego la correlación de los valores genéticos entre todas las edades de comparación para el diámetro y el volumen comercial. Con estos resultados se estableció una primera estimación de la posibilidad de selección temprana en ensayos clonales de teca.

Para el análisis de la interacción genotipo x edad, se creó una nueva base de datos con una columna para la edad de medición, con lo que la variable edad se convirtió en una clase o efecto del modelo. De esta manera cada año de medición se anexó debajo de la primera medición y así sucesivamente. Con esta base de datos SELEGEN analizó la información con el modelo para diseños de bloques completos al azar, en varias localidades (ahora edades), para clones no emparentados y con varias plantas por parcela:

$$y = Xr + Zg + Wp + Ti + e \quad (3)$$

Donde “y” es el vector de los datos, “r” es el vector de los efectos de la repetición (asumidos como fijos) sumados a la media general, “g” es el vector de los efectos genotípicos (asumidos como aleatorios), “p” es el vector de los efectos de parcela (asumidos como aleatorios), “i” es el vector de los efectos de la interacción genotipo x ambiente (aleatorios), “e” es el vector del error o residuos (aleatorios). Las letras mayúsculas representan las matrices de incidencia para los efectos referidos. El vector “r” contempla todas las repeticiones de todas las edades (ajusta la combinación repetición*edad). En ese caso, ese vector contempla los efectos de las edades y de las repeticiones dentro de las edades (Resende, 2007).

RESULTADOS

Los parámetros genéticos obtenidos para el diámetro registraron el valor más alto de heredabilidad individual y heredabilidad media del clon a la edad de 4,5 años. Los resultados muestran que los parámetros genéticos tienden a aumentar conforme avanza la edad del ensayo, los valores se incrementaron desde 26 a 29,6% y de 29,6 a 30,5%, respectivamente para el rango de edades estudiado. Con respecto a la heredabilidad media del clon, los valores aumentaron de 88 a 91% para la edad de 2,5 y 3,5 años respectivamente, sin embargo, se mantiene en 91% para la edad de 4,5 años. El parámetro exactitud resultó alto para el diámetro, registrando un valor mínimo de 94 (Cuadro 2).

Cuadro 2. Parámetros genéticos para el carácter diámetro (cm) de 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Parámetro	Edad (años)		
	2,5	3,5	4,5
Vg	0,57	1,00	1,58
Vparc	0,07	0,03	0,03
Ve	1,55	2,34	3,55
Vf	2,18	3,37	5,16
h ² g	0,260 ± 0,044	0,296 ± 0,047	0,305 ± 0,048
c ² parc	0,03	0,01	0,01
h ² mc	0,88	0,91	0,91
Exactitud	0,94	0,95	0,95
CVgi%	6,21	7,26	8,13
CVe%	5,56	5,71	6,22
CVr	1,12	1,27	1,31
PEV	0,07	0,09	0,14
SEP	0,26	0,31	0,37
Media general	12,12	13,75	15,43

El volumen total mostró valores de heredabilidad altos, tanto en sentido individual como para la heredabilidad media clonal. En el Cuadro 3, se presentan los parámetros para el volumen total a la edad de 2,5 y 4,5 años, donde el parámetro de heredabilidad individual disminuye levemente de 26,2 a 24,6% con el aumento en edad. Mientras que con la heredabilidad media del clon y la exactitud los valores se mantienen constantes con 88 y 94%, respectivamente.

Cuadro 3. Parámetros genéticos para el volumen total (m³) de 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Parámetro	Edad (años)	
	2,5	4,5
Vg	0,0003	0,001
Vparc	0,00004	0,0001
Ve	0,0008	0,004
Vf	0,00115	0,005
h²g	0,262 ± 0,044	0,246 ± 0,043
c²parc	0,04	0,01
h²mc	0,88	0,88
Exactitud	0,94	0,94
CVgi%	13,33	17,43
CVe%	12,00	15,58
CVr	1,11	1,12
PEV	0,00004	0,0001
SEP	0,01	0,01
Media general	0,13	0,20

En cuanto al volumen comercial, en el Cuadro 4 se exponen los valores genéticos a los 3,5 y 4,5 años de edad del ensayo, donde se observa un patrón similar a lo acontecido con la variable volumen total. La heredabilidad individual y media clonal mostraron una disminución con la edad, al registrar respectivamente 25 y 88. Finalmente, la exactitud mantiene valores altos con un 94% para ambas edades.

Cuadro 4. Parámetros genéticos para el volumen comercial (m³) de 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Parámetro	Edad (años)	
	3,5	4,5
Vg	0,0001	0,0004
Vparc	0,000003	0,0001
Ve	0,0003	0,001
Vf	0,0004	0,002
h²g	0,263 ± 0,044	0,249 ± 0,043
c²parc	0,01	0,03
h²mc	0,89	0,88
Exactitud	0,94	0,94
CVgi%	14,36	19,63
CVe%	12,20	18,13
CVr	1,18	1,08
PEV	0,00001	0,00005
SEP	0,004	0,01
Media general	0,07	0,10

Como se observa en la Figura 3, la heredabilidad individual registró un crecimiento progresivo de acuerdo con los años evaluados, con un valor máximo para el diámetro a los 4,5 años de 30,5%. Sin embargo, para el volumen comercial el valor de heredabilidad individual se registra casi estable con una leve disminución de 26 a 25%. Respecto a la heredabilidad media del clon se observa un comportamiento similar con la edad mostrando un incremento para el diámetro y una disminución para el volumen comercial.

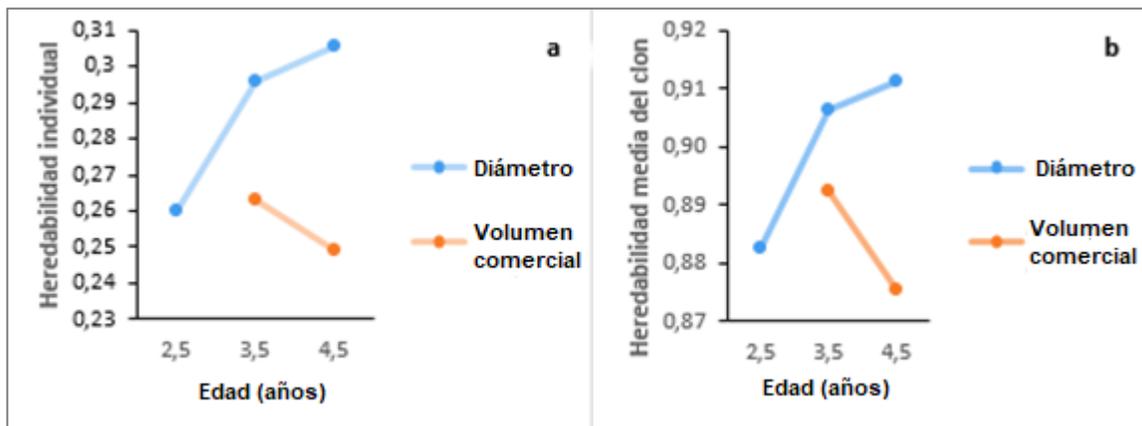


Figura 3. a. Comportamiento de la heredabilidad individual; **b.** Comportamiento de la heredabilidad media clonal; en función de la edad para las variables diámetro (cm) y volumen comercial (m³) en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

En el Cuadro 5, se muestran los parámetros genéticos obtenidos con el modelo 03 de SELEGEN, donde se observó la interacción genotipo x edad.

Los parámetros diámetro (cm), volumen comercial (m³) y volumen total (m³) calculados en la colección clonal mostraron un alto potencial de mejoramiento genético; donde, el valor de exactitud de la selección de genotipos osciló entre el 92% y el 98%. Hubo una correlación genotípica (rlog) alta, el volumen total 84%, volumen comercial 86% y el diámetro 99%. Además, para todas las variables la varianza residual obtuvo el porcentaje más alto de las varianzas, ámbito fue de 70-74%

Cuadro 5. Parámetros genéticos para diámetro (cm), volumen comercial (m³), volumen total (m³) de 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Parámetro	Diámetro (cm)	Volumen comercial (m³)	Volumen total (m³)
Vg	1,071	0,00006	0,0003
Vparc	0,027	0,000006	0,00002
Vint	0,002	0,000009	0,00005
Ve	2,523	0,0002	0,001
Vf	3,624	0,0003	0,001
h2g	0,296±0,027	0,217±0,028	0,209±0,028
c2parc	0,008	0,024	0,012
c2int	0,001	0,035	0,041
h2mc	0,966	0,863	0,851
Acclon	0,983	0,929	0,922
rgloc	0,998	0,863	0,837
PEV	0,036	0,00001	0,00004
SEP	0,190	0,003	0,006
CVgi%	7,520	16,910	15,383
CVe%	5,894	16,445	14,911
Media general	13,764	0,044	0,108

El Cuadro 6 muestra la matriz de correlaciones genéticas entre variables semejantes para los caracteres evaluados a la edad de 2,5, 3,5 y 4,5, donde se utilizaron todas las variables. Se refleja una alta correlación para el carácter diámetro a 4,5 años de edad con el resto de variables solo no presenta una correlación significativa con la variable altura comercial a los 3,5 años de edad. Sin embargo, presentó una correlación fuerte con las variables volumen total a 4,5 años, diámetro a 3,5 años y volumen comercial a 3,5 años, donde la correlación fue significativa con un 98%, en el caso de la correlación del diámetro, entre la edad 4,5 y 2,5 años, implica que el comportamiento entre ambos años es similar en un 94%.

La matriz de correlaciones genética relaciona altura total 4,5 años de 31 a 57%, con las demás variables. En cuanto a la altura comercial la correlación fue significativa con todas las variables y varió entre 21 a 66%, siendo volumen comercial a 4,5 años la variable con la que presentara mayor correlación.

Otra de las correlaciones analizadas fue la de volumen total a 4,5 años, donde solo no se relaciona significativamente con altura comercial (3,5 años), para los demás caracteres la correlación fue significativa y rondó de 41 a 98%, donde la tendencia entre los años 4,5 fue similar 98% para volumen total y diámetro. Muy similar sucede con la variable volumen comercial a 4,5 años, ya que presenta la correlación significativa más baja con la altura comercial a 3,5 años, mientras que con las variables que está altamente correlacionada, el rango va de 51 a 94%, donde es volumen total 4,5 años es el carácter con la correlación más alta significativamente. La variación del volumen comercial 4,5 con volumen total a 4,5 años es muy similar en 94%, al ser 4,5 años parte de la medición más reciente hay que considerar que estas dos variables especificadas en este párrafo, son las variables de mayor interés para la selección de árboles superiores de teca.

Para el diámetro a 3,5 años, la correlación significativa más baja fue de 28%, mientras que la más alta fue con la variable volumen comercial a 3,5 años, dicha correlación fue de 99%, mientras que para la variable altura comercial a 3,5 años la correlación no fue significativa.

La variable altura comercial (3,5 años) no presentó una correlación significativa con ninguno de los diámetros, ni volúmenes totales. La correlación más significativa fue con altura comercial a 4,5 años (49%). Para la última variable analizada a 3,5 años, fue el volumen comercial, donde el diámetro a 3,5 años obtuvo una correlación significativa de 99%, mientras que la correlación más baja significativamente fue con la altura comercial a 3,5 años con 20%.

Para las variables obtenidas para la edad de 2,5 años, el diámetro presenta una correlación significativa de 21 a 99%, con todas las variables excepto altura comercial 3,5, la correlación genética más alta fue con volumen total 2,5. Se aprecia que en el caso de la altura total a 2,5 años la correlación es muy baja con la altura comercial a 3,5 años, para las demás variables la correlación va de 47 a 68%, la correlación más alta la presentó con las variables volumen total y volumen comercial a 4,5 años. Por último, el volumen total, no se correlacionó significativamente con altura comercial a 3,5, el valor más alto de correlación genética fue con el diámetro a 2,5 años (99%), y el más bajo fue con altura comercial a 4,5 (26%). Todas las variables cuantitativas analizadas estuvieron positivamente correlacionadas entre sí.

Cuadro 1. Matriz de correlaciones genéticas para un ensayo clonal de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

	Diámetro 4,5	Ht 4,5	Hc 4,5	V tot 4,5	V com 4,5	Diámetro 3,5	Hc 3,5	V com 3,5	Diámetro 2,5	Ht 2,5	V tot 2,5
Diámetro 4,5	1										
Ht 4,5	0,43*	1									
Hc 4,5	0,35*	0,52*	1								
V tot 4,5	0,98*	0,57*	0,41*	1							
V com 4,5	0,92*	0,51*	0,66*	0,94*	1						
Diámetro 3,5	0,98*	0,36*	0,28*	0,94*	0,87*	1					
Hc 3,5	0,13	0,33*	0,49*	0,15	0,27*	0,09	1				
V com 3,5	0,98*	0,38*	0,35*	0,95*	0,91*	0,99*	0,20*	1			
Diámetro 2,5	0,94*	0,31*	0,21*	0,88*	0,81*	0,97*	0,10	0,96*	1		
Ht 2,5	0,62*	0,57*	0,48*	0,68*	0,68*	0,55*	0,24*	0,58*	0,47*	1	
V tot 2,5	0,96*	0,34*	0,26*	0,92*	0,86*	0,98*	0,11	0,97*	0,99*	0,60*	1

Nota: * Estadísticamente significativo en 95%.

Finalmente se utilizaron las variables de diámetro y volumen comercial obtenidos a 4,5 años de edad, para presentar los valores genéticos obtenidos en el ranking, esto por ser óptimo para representar el ensayo.

Los mayores rendimientos de diámetro se encontraron en los clones, desplazando absolutamente a los 2 testigos, en la Figura 4 se observa a los testigos (T1 y T2) ubicados en las posiciones 33 y 46. El promedio del valor genético del ensayo corresponde a 15,43 cm a los 4,5 años de edad; al comparar este valor contra el promedio de los primeros 16 clones (16,75 cm en) se esperaría obtener un 7,88% de incremento en el diámetro. Si se realiza la comparación con el valor genético del puesto uno en el ranking (18,24 cm) el aumento sería de 15,41%. Mientras que si se realiza la comparación con el promedio del valor genético de los testigos (14,10 cm), existe una disminución del 9,43%.

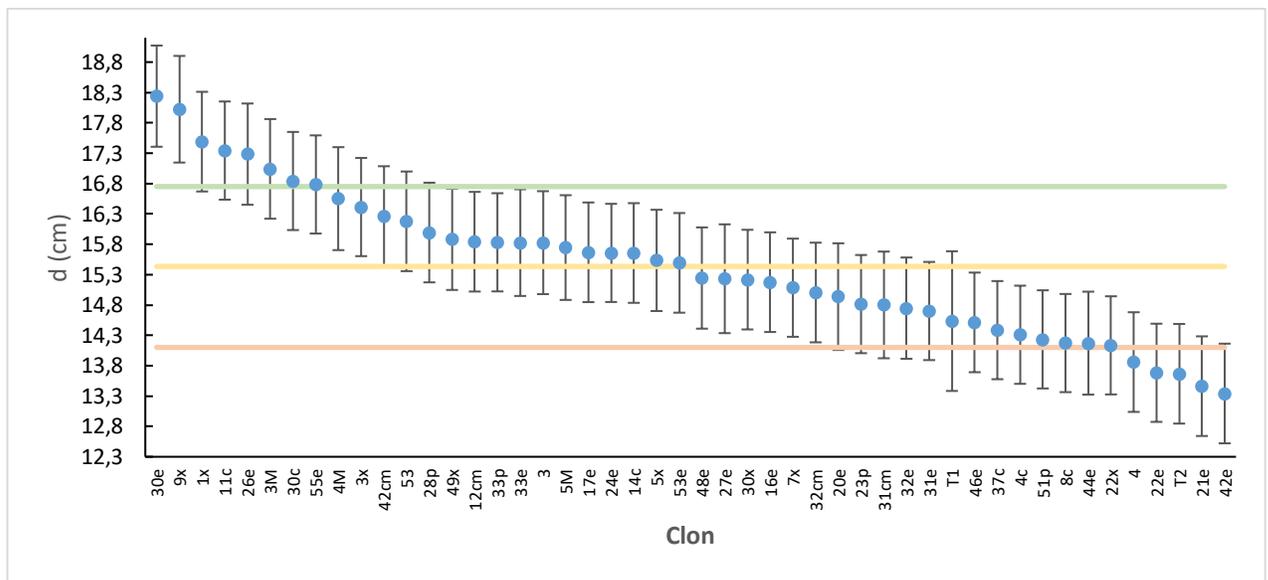


Figura 4. Valores genéticos para el diámetro (cm), en un ensayo clonal de *T. grandis*, en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Para la variable volumen comercial, la Figura 5 muestra el promedio del valor genético del ensayo (0,10 m³), al comparar este valor contra el obtenido por los primeros 16 clones (0,12 m³) se esperaría obtener una ganancia de 16,67%, si se realiza la comparación con el valor genético del puesto uno en el ranking (0,14 m³) el aumento sería de 28,57%. Por último, si se compara con el promedio del valor genético de los testigos (0,84 m³), existe una disminución del 25%.

Es, por lo tanto, un indicador del valor económico real del árbol que puede ser analizado genéticamente y permite determinar el mejor material genético de acuerdo con los objetivos de la plantación: obtener la mayor cantidad de madera de la mejor calidad posible con turnos de corta reducidos y con la menor inversión en mantenimientos y replantes (Pavlotzky y Murillo, 2014).

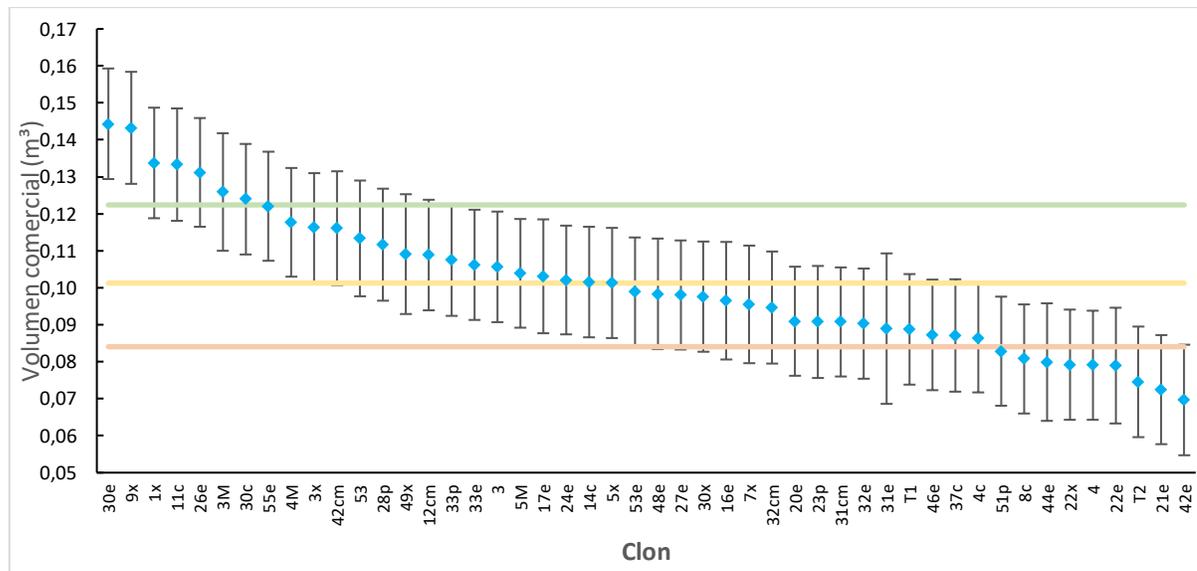


Figura 5. Valores genéticos para el volumen comercial (m^3), en un ensayo clonal de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Los clones de teca en diámetro y volumen comercial no registran diferencias significativas entre ellos, el promedio genotípico obtenido fue de 15,43 cm para el diámetro (Figura 4), con una ganancia genética de 11,5% para los 10 mejores clones. En cuanto al volumen comercial los mejores clones mostraron un promedio genotípico de $0,10m^3$ (Figura 5), siendo su ganancia genética de 28%. La ganancia obtenida respecto al uso de los testigos es significativamente baja de 3,1 y 7,6%, respectivamente, para el diámetro y volumen comercial a los 4,5 años.

Las Figuras 6 y 7 muestran el ranking genético de 46 clones y dos testigos para el diámetro (cm) y volumen comercial (m^3), dicho ranking fue dividido en tres segmentos para visualizar las interacciones (simple o compleja).

La Figura 6 muestra el ranking realizado para el diámetro en los tres años evaluados, entre lo que se destaca para la edad de 2,5 a 3,5 años como los clones en las primeras y las últimas posiciones del ranking se mantienen, no varió significativamente dentro del mismo tercio, el cambio más relevante ocurre para el clon 26e que pasa de la posición 3 a la 5, bajando del 1° tercio al 2° tercio. En el caso de los ascensos en los tercios el aumento más significativo fue para el clon 8c subió del puesto 46 al 40.

Siguiendo en la Figura 6, el cambio del ranking para la edad de 3,5 a 4,5 años de edad es el siguiente:

Los clones 30e y 9x (primeras posiciones), y el clon 42e (última posición) no variaron con respecto al ranking anterior. El clon que presentó descenso del primer al segundo tercio, y del segundo al tercer tercio fueron los clones 26e y T2, que bajaron del puesto 3 al 5, y del 45 al 46, respectivamente. Ahora bien, solamente el testigo T2 subió del tercer al segundo tercio, donde ascendió de la posición 46 a la 36. Todos los cambios significativos en el ranking de diámetro para las diferentes edades fueron interacciones simples.

Lo que respecta a los testigos, estos siempre se situaron en las últimas posiciones (tercer tercio), la posición más importante alcanzada por uno de ellos, en este caso el T1 fue la 36 en el segundo tercio para la edad de 4,5 años.

Ranking	Edad (años)		
	2.5	3.5	4.5
1	30e	30e	30e
2	9x	9x	9x
3	26e	26e	1x
4	1x	1x	11c
5	11c	11c	26e
6	55e	30c	3M
7	30c	55e	30c
8	3x	3M	55e
9	53	4M	4M
10	33p	33e	3x
11	33e	53	42cm
12	42cm	3x	53
13	4M	33p	28p
14	53e	28p	49x
15	28p	42cm	12cm
16	48e	49x	33p
17	31cm	14c	33e
18	49x	12cm	3
19	3	48e	5M
20	12cm	3	17e
21	17e	24e	24e
22	3M	53e	14c
23	14c	17e	5x
24	24e	5M	53e
25	20e	27e	48e
26	27e	5x	27e
27	5x	31cm	30x
28	5M	32e	16e
29	32e	30x	7x
30	16e	20e	32cm
31	23p	16e	20e
32	31e	32cm	23p
33	32cm	7x	31cm
34	30x	23p	32e
35	7x	31e	31e
36	44e	46e	T1
37	46e	37c	46e
38	4c	44e	37c
39	37c	22x	4c
40	22x	8c	51p
41	51p	51p	8c
42	T2	4c	44e
43	22e	4	22x
44	4	22e	4
45	21e	T2	22e
46	8c	T1	T2
47	T1	21e	21e
48	42e	42e	42e

Figura 6. Ranking genético del diámetro (cm) para los clones de *T. grandis*, Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Para el ranking genético generado para el volumen comercial por árbol (Figura 7), se observa que las primeras posiciones en el caso del 30e cambia una posición en el ranking, mientras que para el clon 1x que se situaba de tercero para la edad de 3,5 años, aumentó en tres posiciones situándolo en el puesto 1 para la edad de 4,5 años, sin embargo, los cambios no son significativos.

En el caso del último puesto sólo dos clones que mostraron un cambio significativo en el ranking presentan una interacción simple, los clones son los siguientes: 9x pasa del puesto 2 al 6. El clon 3M fue el que varió del segundo tercio al primer tercio, donde sube del puesto 8 al 3.

Los testigos no sufrieron cambios significativos en el ranking genético y se mantuvieron en el segundo tercio, obteniendo el T1 la mejor posición a los 4,5 años de edad en el puesto 35.

Ranking	Edad (años)	
	3,5	4,5
1	30e	1x
2	9x	30e
3	1x	3M
4	26e	26e
5	11c	11c
6	30c	9x
7	55e	42cm
8	3M	3x
9	4M	30c
10	33p	55e
11	28p	4M
12	3x	5M
13	42cm	5x
14	33e	27e
15	49x	28p
16	53	49x
17	14c	17e
18	3	12cm
19	5x	33p
20	12cm	3
21	5M	24e
22	48e	32cm
23	17e	30x
24	24e	23p
25	27e	16e
26	53e	7x
27	31cm	14c
28	32e	20e
29	32cm	33e
30	30x	32e
31	16e	31e
32	20e	53e
33	23p	37c
34	7x	53
35	31e	T1
36	46e	46e
37	37c	4
38	44e	48e
39	22x	51p
40	8c	8c
41	51p	22x
42	4c	31cm
43	T2	T2
44	4	4c
45	T1	44e
46	22e	42e
47	42e	22e
48	21e	21e

Figura 7. Ranking genético del volumen comercial (m³) para los clones de *T. grandis* en Upala, Zona Norte, Costa Rica.

DISCUSIÓN

Valores genéticos

Evaluar el desempeño en crecimiento, la forma y la calidad de los árboles clonados en plantaciones comerciales según Indira (2006), es uno de los factores fundamentales en los programas de mejoramiento forestal, además, si se desea optimizar el rendimiento por hectárea lo ideal es practicar silvicultura clonal mediante el uso de clones (Padua, 2003). Sin embargo, se debe tener en cuenta que los pocos años de edad en un ensayo clonal, podría ser la causa que afecte el desarrollo y la expresión del potencial del material genético, ya que puede verse como una edad muy temprana para observar las diferencias significativas (Tawara 1996; Ávila, Murillo, Murillo, y Sandoval; 2014).

La heredabilidad de las variables diámetro, volumen total y comercial del árbol del ensayo clonal de teca presentó un alto control genético con valores 0,91 para el diámetro, sin embargo, fue menor en comparación a otros estudios realizados con teca en la Zona Norte y Zona Sur de Costa Rica, ya que el valor de heredabilidad media del clon para la variable diámetro fue de 0,97 (Chacón, 2012).

Para la variable diámetro el valor más alto de heredabilidad se presentó a los 4,5 años de edad, sin embargo, los valores para las variables volumen total y comercial por árbol es menor para la edad de 4,5 años (Cuadro 2), Pérez (2016), obtuvo en su estudio los valores más altos de heredabilidad en edades similares, estos contribuyen con el potencial de selección, aunado a la edad, ya que esta podría ser la adecuada para seleccionar clones respecto a las diferentes variables (Pastrana, Espítia, y Murillo, 2012).

Además, Pastrana, Espítia, y Murillo (2012), los valores de heredabilidad pueden combinarse con altos valores de exactitud, lo que conllevaría a una eficiente selección de clones en función de las variables correspondientes, en el caso de este estudio el valor más bajo de exactitud lo obtuvo la variable volumen comercial por árbol para la edad de 4,5 años (Cuadro 4), mientras que el valor máximo lo alcanza la variable diámetro a los 4,5 años.

Según Fonseca (2004) y De Camino y Morales (2013) la teca es una especie con alta variabilidad genética, para el caso del diámetro, la variación genética presentada en el presente estudio no superó el 8,1%, valores similares obtuvo Pérez, donde la mayor variabilidad genética para el diámetro fue de 7,4%. Los coeficientes de variabilidad genética aumentaron para la variable volumen total por árbol donde el valor más alto fue de 17,4%, sin embargo, fue para la variable volumen comercial por árbol donde se presentó el valor más alto con 19,6% a los 4,5 años de edad, mientras que en el estudio realizado por Pérez (2016), presentó a los 4,7 años de edad un coeficiente de variabilidad genética de 16,3%. En otros estudios realizados en Costa Rica por Chacón (2012), la teca ha presentado coeficientes de variabilidad genética superiores al 5%.

El efecto positivo del raleo en la heredabilidad del diámetro al año 4, se debe a la eliminación del 50% de los árboles de menor crecimiento dentro de cada parcela (clon en cada bloque), esto se debe a que el objetivo del raleo está enfocado en reducir la expresión de los caracteres de inferior dimensión; por tanto, al disminuir el número de individuos defectuosos las diferencias entre los clones son más notorias por lo que la variabilidad genética aumenta y la heredabilidad media del genotipo baja dado que la población es más homogénea (Pavlotzky y Murillo, 2014) lo que permite que el error ambiental disminuya considerablemente y se exprese en mayor medida la heredabilidad dado que la varianza genética aumenta.

Para el volumen comercial por árbol, los parámetros genéticos tienen un comportamiento similar pero menor al diámetro, debido a que esta variable fue estimada por el diámetro respectivo, sin embargo, sufre una disminución respecto a la heredabilidad y exactitud, pero sufre un aumento en el coeficiente de variabilidad genética Cuadros 2 y 4. En el estudio realizado por Pérez (2016), los valores más altos de heredabilidad se registraron a los 4,7 años de edad, para este estudio la heredabilidad disminuyó ligeramente de 4,5 años respecto a la edad de 3,5 años.

Se identificó la edad de 4,5 años, como la edad óptima para la selección genética en el ensayo clonal de teca en función del diámetro, y la edad de 3,5 años como la óptima para la selección genética con fines comerciales, ya que en estudios donde se analizó el diámetro y volumen comercial se obtuvieron valores similares a los encontrados en este estudio (Pérez, 2016).

Correlación genética

En el último año de evaluación se mantiene correlaciones más significativas con respecto a los años anteriores, excepto para la altura total Cuadro 5, se debe considerar que según Ávila, Murillo, Murillo y Sandoval (2014), es normal correlaciones bajas para los primeros años, debido que por cuestiones de edad los clones no han expresado en su totalidad su potencial genético, además en un estudio realizado en el Pacífico sur de Costa Rica no se encontraron correlaciones significativas para las primeras mediciones realizadas a la edad de uno y dos años del ensayo (Pérez, 2016).

En este estudio se encontró que la variable diámetro a 2,5 años estuvo fuertemente relacionado con los demás diámetros evaluados (94-97%), algo similar a lo realizado por Pavlotzky y Murillo (2013), donde en un ensayo genético de acacia (*Acacia mangium*) registraron que el diámetro a 1 año de edad presentó una correlación fuertemente significativa con el diámetro a los 4 años (90% en correlación). En otro estudio realizado por Pérez (2016), hubo una mayor semejanza con respecto a la correlación a partir de los 2,0 años, donde se mantuvieron correlaciones genéticas superiores a 93% con los diámetros a 3,4 años 4,7 años y 5,8 años.

Al igual que el diámetro, el volumen comercial a los 3,5 años de edad, mantiene correlaciones genéticas altas respecto a las demás variables cuantitativas (correlación superior a 99%) y los diámetros (superior a 98%) (Cuadro 5), dichos valores afirman la idea de selección temprana mencionada Pavlotzky y Murillo (2013). Además, a partir de los 2,5 años de edad los crecimientos son positivos y estables.

Ranking genético

Los valores genéticos obtenidos para el diámetro a 4,5 años de edad indican la alta superioridad que tienen los clones analizados respecto a los testigos utilizados ya que estos se encuentran en la posición 33 y 46 del ranking. En el estudio realizado por Pérez (2016), los clones desplazaron completamente a los testigos, dejándolos entre las tres últimas posiciones. Según Valerio (1986) y Ávila, Murillo, Murillo y Sandoval (2014), el buen desarrollo del material genético implica que el sitio donde se establecieron presentan las condiciones óptimas para ver su potencial genético.

Aunque para este estudio no se realizaron mediciones posteriores al raleo se estima que para cuando se realice los valores genéticos estimados por el programa SELEGEN se reducirán, sin embargo, el ranking no se verá afectado significativamente (Pavlotzky y Murillo 2013; Ávila, Salas, y Murillo 2016). Para este estudio, el ranking varió para las variables y edades analizadas, sin embargo, hubo clones que no variaron dentro del ranking.

CONCLUSIONES

A los 4,5 años de crecimiento de *T. grandis* los parámetros genéticos estimados para el diámetro son mayores, considerándose como la mejor edad para la selección, mientras que para el volumen comercial la heredabilidad se estabiliza a los 3,5 años. La evaluación temprana (2,5 años), es una edad que no le permite demostrar el potencial genético a los clones.

En general el crecimiento del ensayo genético de teca presenta un rango de medio a alto el potencial heredable y de productividad.

El coeficiente de variación genético a la edad 4,5 años fue de 8,1%, lo cual indica que la base genética del programa es aceptable. Mientras que los valores más altos de heredabilidad individual fueron de 30,5% y 26,3% para los caracteres diámetro (4,5 años), volumen total y comercial (3,5 años) respectivamente. La heredabilidad media clonal fue de 91% para el diámetro, 88% para el volumen total y 89% para el volumen comercial.

Los clones 30e, 9x, 1x y 11c, son los mejores clones en el ranking genético en cuanto al diámetro, mientras que si lo que se desea es optimizar el volumen comercial nuevamente aparecen los clones 1x, 30e y 11c, junto con el 26e como los genotipos con mejor rendimiento para dicha variable, asegurando una productividad alta para el desarrollo comercial en Upala, Zona Norte, Costa Rica. Por otro lado, clones como el 42e y 21e fueron los más bajos en el ranking. Los testigos también presentaron posiciones bajas en el ranking. La ganancia genética obtenida para los 10 mejores clones en cuanto al diámetro y volumen comercial fue de 11,5 y 28% respectivamente.

A la edad de 2,5 años hasta los 4,5 años las variables cuantitativas se mantienen positivamente correlacionadas entre sí. Lo que infiere en que los cambios en el ranking son mínimos lo cual solo expone interacciones simples.

RECOMENDACIONES

Se recomienda una edad cercana a los 4 años para la selección de clones.

Se puede realizar otra medición a los 5,5 años para contemplar los parámetros genéticos de las variables luego del raleo.

Es necesario validar la superioridad de los clones en otros sitios para así determinar la interacción genotipo-ambiente, esto porque los parámetros analizados se basan en la expresión fenotípica en un ambiente seleccionado (Zobel y Talbert, 1988).

BIBLIOGRAFÍA

- Ávila, C., Murillo, R., Murillo, O., y Sandoval, C. (2014). Desarrollo juvenil de clones de *Gmelina arborea* Roxb. de dos procedencias, en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 12(28), 23-35.
- Ávila, C., Salas, A., y Murillo, R. (2016). Selección de genotipos superiores de *Gmelina arborea* roxb. por su heredabilidad genética a la tolerancia de la enfermedad de pudrición del tronco, Pacífico sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(32), 11-20.
- Badilla, Y., y Murillo, O. (2017). Ganancia realizada en plantaciones clonales de teca en Costa Rica. En: I Simposio Internacional GENFORES. 26-27 enero, 2017. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Balcorta, H., y Vargas, J. (2004). Variación fenotípica y selección de árboles en una plantación de melina (*Gmelina arborea* Linn., Roxb.) de tres años de edad. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 10(1).
- De Camino, R., y Morales, J. (2013). Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades. Turrialba: CATIE.
- CATIE. (1986). Silvicultura de especies promisorias para la producción de leña en América Central; resultados de cinco años de investigación. Turrialba, CR, CATIE. 220 p. (Informe Técnico nº 86).
- Chacón, P. (2012). Evaluación de ensayos clonales (GENFORES) de *Tectona grandis*, en la zona norte y zona sur de Costa Rica. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 93 p.
- Eleotério, I., Vilela, M., da Silva, R., y Ribeiro, M. (2011). Genética forestal. Viçosa, Brasil: Editora Arka.
- Fonseca, W. (2004). Manual para productores de teca (*Tectona grandis* L. f) en Costa Rica. Heredia, Costa Rica.
- Holdridge, L. (1987). Ecología basada en zonas de vida. San José, Costa Rica.
- Indira, E. (2006). Provenance variations in *Gmelina arborea* with particular reference to tree form. *Journal of Tropical Forest Science*, 36-50.

- Keogh, R. (1980). Teak provenances of the Caribbean, central America, Venezuela and Colombia. Paper presented at the Proceedings from IUFRO Symposium on wood production in the Neotropics. Institute for Tropical Forestry. Rio Piedras, Puerto Rica.
- Monteuuis, O., y Maître, H. (2006). Los últimos avances realizados en la clonación de teca permiten mejorar la calidad del material de plantación, OIMT Actualidad Forestal Trop 2006.
- Moya, R. (2002). Influencia de la edad del cambium, tasa de crecimiento y nivel de precipitación sobre la densidad básica de la teca en Costa Rica. *Madera y Bosques*, 8(1).
- Murillo, O., y Badilla, Y. (2004). Calidad y valoración de plantaciones forestales. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica.
- Murillo, O., Badilla, Y., y Rojas, F. (2016). Desarrollo del mejoramiento genético forestal en Costa Rica y liderazgo regional con especies tropicales En: XIV Congreso Nacional Agronómico Forestal y Ambiental, 25-27 de octubre, Belén, Costa Rica.
- Murillo, O., Obando, G., Badilla, Y., y Araya, E. (2001). Estrategia de mejoramiento genético para el Programa de Conservación y Mejoramiento Genético de Especies Forestales del ITCR/Fundecor, Costa Rica. *Revista Forestal Latinoamericana (Venezuela)* v. 16 (30) p. 275-285.
- Ortiz, E., y Cordero, S. (2014). Atlas Digital de Costa Rica. CD-ROM. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Padua, F. (2003). Clonal correlation in growth and stem quality of *Gmelina arborea*. Trabajo presentado en el XII World Forestry Congress. Québec City, Canada.
- Pastrana, I., Espítia, M., y Murillo, O. (2012). Evaluación del potencial de mejoramiento genético en el crecimiento en altura de *Acacia mangium* Willd. *Acta Agronómica*, 61(2), 143-150.

- Pavlotzky, B., y Murillo, O. (2013). Ganancia genética esperada en *Acacia mangium* en San Carlos, Zona Norte de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 10(24), 14-25.
- Pavlotzky, B., y Murillo, O. (2014). Ganancia genética esperada e interacción genotipo-ambiente en *Acacia mangium* en la zona norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 38(2).
- Pérez, R. (2016). Evaluación de ensayos genéticos de teca (*Tectona grandis* Lf) en Costa Rica y Panamá, empresa Brinkman y Asociados Reforestadores de Centroamérica SA.
- Piedra, R. (2001). Analisis de crecimiento y proyeccion de materia prima para las plantaciones de *Tectona grandis* de la empresa Inversiones Agroforestales SA Panamá.
- Resende, M. (2007). SELEGEN-REML/BLUP: Sistema Estatístico e Seleçãõ Genética Computadorizada (Software). Brasilia, Brasil: EMBRAPA.
- Solórzano, S. (2010). Evaluación a los 4 años de edad de variables dasométricas, calidad del fuste y propiedades de la madera en clones de *Tectona grandis* L., Los Chiles, Costa Rica. (Licenciatura en Ingeniería Forestal), Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Tawara, C. S. (1996). Variação clonal de melina (*G. arborea* Roxb) na Costa Rica Clonal variation of *Gmelina arborea* Roxb. in Costa Rica: CATIE, Turrialba (Costa Rica).
- Valerio, J. (1986). Evaluación de nueve procedencias de *Gmelina arborea* (Roxb.) en Turrialba, Costa Rica.
- Villalobos, R., Jiménez, E., Hernández, K., Córdova, J., y Solano, P. (2013). Descripción del clima. Cantón de Upala. Costa Rica.
- Zobel, B., y Talbert, J. (1988). Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales: Limusa.

Capítulo II. Evaluación de las propiedades de la madera de una colección clonal de teca (*Tectona grandis* Linn.) en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Fabián Molina Segura ¹

RESUMEN

Se realizó una evaluación temprana de las propiedades de la madera de un ensayo clonal de *Tectona grandis* de 4,5 años de edad, ubicado en México de Upala, Zona Norte de Costa Rica, ya que se desconoce cuál clon de teca presenta el mejor diámetro (d), mayor porcentaje de duramen y color del duramen apropiado. Además, se determinó el potencial heredable para cada una de las propiedades de los 46 clones y dos testigos. Las propiedades evaluadas fueron analizadas por el software SELEGEN. Los resultados mostraron que el clon 9x presentó mayor diámetro (19,1 cm), un valor alto de diámetro de duramen 10,7 cm y un valor menor de 15% en porcentaje de corteza. El clon con mayor porcentaje de duramen fue el 55e, mientras que el clon 24e presentó el valor más alto de peso específico básico con 0,5. Se encontró que las propiedades físicas varían conforme aumenta la altura del árbol. Los valores más altos de heredabilidad y de coeficiente de variación genética lo obtuvo la propiedad física diámetro duramen los valores fueron 0,39 y 19,54 respectivamente.

Palabras Claves: Evaluación temprana, *Tectona grandis*, duramen, color de duramen, potencial heredable.

ABSTRACT

An early evaluation was made of the properties of the wood of a clonal trial of a 4.5 years of age *Tectona grandis*, located in Mexico of Upala, northern zone of Costa Rica as it is unknown which teak clone presents the best diameter (d), highest percentage of heartwood and color of the appropriate heartwood. In addition, the inheritable potential was determined for each of the properties of the 46 clones and two witnesses. The properties evaluated were analyzed by the software "SELEGEN". The results showed that the clone "9x" showed greater diameter (19.1 cm), a high value of heartwood diameter 10.7 cm and a percentage less than 15% of bark. The clone with the highest percentage of heartwood was the 55e, while the clone 24e presented the highest basic specific weight value with 0.5. Physical properties were found to vary as tree height increases. The highest values of heritability and genetic variation coefficient were obtained by physical property diameter heartwood the values were 0.39 and 19.54 respectively.

Key words: Early evaluation, *Tectona grandis*, heartwood, heartwood color, heritable potential.

INTRODUCCIÓN

La madera de teca (*Tectona grandis*) es una de las maderas más cotizadas, debido a sus características de alta durabilidad, fácil operación, su alta resistencia y un peso relativamente liviano (ITTO, 2004). Pérez y Kanninen (2003), citan que mediante las propiedades físicas y químicas de la madera, una correcta selección de las características fenotípicas y realizar prácticas de manejo adecuadas, garantizan que la calidad de esta madera sea aceptable. Moya (2002), menciona que en Costa Rica, la teca ha sido una de las especies más utilizadas en la reforestación, junto con otras especies forestales.

Para la obtención de mayores ganancias en menor tiempo mayor volumen y calidad de la madera se ha vuelto usual el uso de clones para reforestar, por lo que, es fundamental enfatizar en la selección de los clones, así como en la evaluación, no solo silvicultural si no de la calidad de la madera, para asegurar un adecuado material genético y así garantizar los parámetros necesarios para el mercado actual (Goh, Chaix, Baillères, y Monteuis, 2007). Mediante la clonación se realiza una copia de todas las características de un individuo, se debe agrupar los clones con propiedades de madera similares, con el fin de disminuir la variabilidad (Monteuis y Maître, 2006).

Los ensayos clonales de teca han sido utilizados para una evaluación temprana con el objetivo de encontrar individuos, familias o procedencias que muestren un crecimiento superior, y presenten las mejores propiedades de la madera, con el fin de esperar el menor tiempo posible para inferir las propiedades de la madera en edades adultas (Solórzano, 2010).

Como lo menciona Solórzano (2010), la selección de individuos con mayores tasas de crecimiento permite aprovechar los árboles de raleos intermedios y reducir los turnos de corta de la plantación. Sin embargo, se presenta el inconveniente de una mayor producción de madera juvenil dentro del árbol (Bhat, Priya, y Rugmini, 2001).

Hay que considerar que a pesar que la madera juvenil es anatómicamente diferente e inferior estructuralmente en comparación con la madera madura (Zobel y Sprague, 2012), los ensayos para el mejoramiento genético han comenzado a tener gran auge. La base primordial de un programa de mejoramiento genético forestal consiste en la selección del árbol de alto rendimiento. Cabe destacar que se debe ser riguroso en la selección estos árboles, ya que así será la ganancia genética que se obtendrá (Zobel y Talbert, 1984).

Mediante el mejoramiento genético, se ha logrado determinar que existe una heredabilidad en el diámetro, la altura del árbol y su periodo de floración (Callister y Collins, 2008). Como lo han determinado Moya y Marín (2011) en sus estudios, existen repercusiones en las propiedades de la madera en edades tempranas debido a la clonación de árboles. Una de las propiedades que ha tomado mucho énfasis, es el color del duramen, ya que como lo citan Thulasidas y Okuyama (2006), es uno de los atributos más importantes para términos de comercialización de madera, debido a que es un factor fundamental en la fabricación de muebles o chapas decorativas (Jett, 1995), además, según Moya y Berrocal (2010), el color es un excelente indicador de resistencia a insectos y hongos.

En este trabajo se presentan los resultados de la evaluación de teca proveniente de plantaciones de rápido crecimiento en la Zona Norte, mediante técnicas de evaluación temprana de diferentes parámetros de la madera. Fue evaluado el peso específico, contenido de humedad verde, densidad verde, además del color del duramen árbol clones y su relación con los parámetros morfológicos del árbol, presencia de duramen y abertura de la troza. Así mismo fue analizada la heredabilidad de estos parámetros, con el fin de contar con elementos fenotípicos y genotípicos para la futura predicción y desarrollo de las plantaciones clonales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño y ubicación del ensayo

El ensayo se ubica en la Región Huetar Norte de Costa Rica, específicamente en México de Upala (10°57'25,90" longitud este 84°03'00,03" latitud norte). Pertenece a la empresa Puro Verde Paraíso Forestal S.A. y fue establecido en conjunto con GENFORES (Instituto Tecnológico de Costa Rica).

El cantón de Upala se localiza a una altitud de 42 m.s.n.m. aproximadamente, registra una precipitación promedio de 2395 mm/año, temperatura promedio anual de 26°C, la humedad relativa puede llegar a 90% y el viento puede alcanzar velocidades de 8,3 km/h (Villalobos et al., 2013). El sitio registra tiene suelos ácidos del orden Inceptisoles, profundos, bien drenados y con alto contenido de materia orgánica (Ortiz y Cordero, 2014). Se ubica en la zona de vida bosque húmedo tropical transición a perhúmedo, según Holdridge (1987).

Descripción del ensayo

El ensayo clonal de teca se estableció el 23 de octubre del 2012, consta de 46 clones distintos y dos testigos. Los clones fueron seleccionados en plantaciones de Upala, San Carlos y Guanacaste. El terreno para el establecimiento del ensayo fue subsolado a 30 cm de profundidad, rastreado y posteriormente se hicieron surcos

Diseño experimental

El diseño experimental del ensayo fue el desarrollado por GENFORES (Murillo, Obando, Badilla y Araya, 2001). Este consiste en seis bloques, dentro de cada bloque se establecieron de forma aleatoria dos parejas de cada clon (incluyendo a los testigos), en total fueron 46 clones.

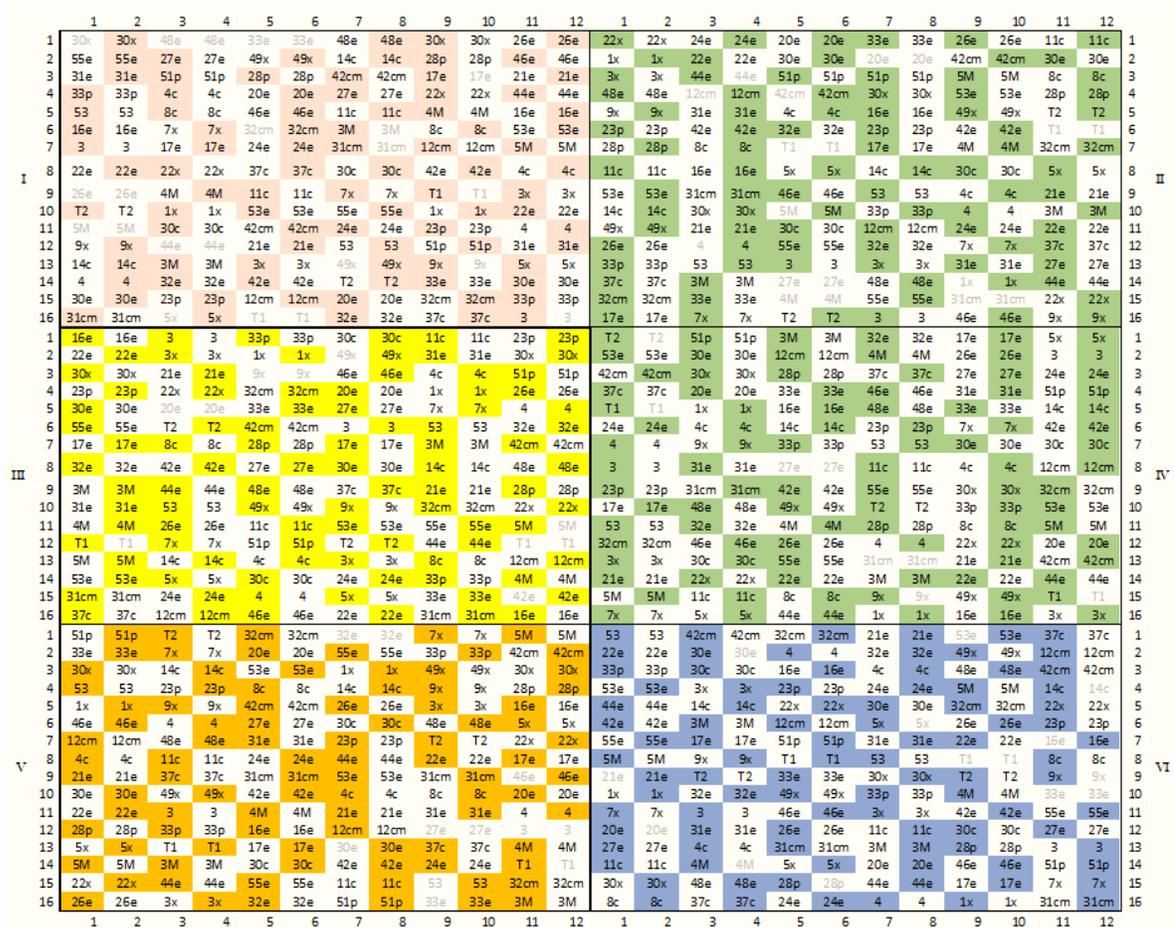


Figura 3. Croquis del ensayo clonal de *T. grandis* L, Upala, Zona Norte de Costa Rica, 2017. Fuente: Murillo, Obando, Badilla, y Araya (2001).

Nota: Las casillas con fondo de color blanco corresponden a los árboles faltantes del ensayo.

Esta distribución espacial permite realizar un primer raleo con criterio silvicultural, de una intensidad de un de 50%, donde se deja al mejor individuo de cada pareja, basado en sus atributos de adaptación, crecimiento y calidad de tronco (Murillo y Badilla, 2004). Se marcó el clon con menor rendimiento por cada pareja de clones por bloque, al considerar que había dos parejas (cuatro clones), se le realizó el siguiente análisis al árbol marcado que presentó las mejores características.

Variables dasométricas

Determinación de PE 12% (Método no destructivo)

Antes de ralear los árboles, se obtuvo una muestra del árbol en pie, donde se empleó el Barreno de incremento o Barreno Pressler de 5 mm de diámetro para obtener un tarugo por clon por bloque a la altura del pecho (1,30 m desde la base del árbol, por defectos de estandarización (Imaña y Encinas, 2008) donde se introdujo en forma rotativa a la mitad del diámetro del árbol manteniendo un ángulo de 90 grados, en dirección a la médula (Imaña y Encinas, 2008). Las muestras fueron rotuladas y almacenadas en pajillas plásticas y se introdujeron en bolsa con cierre hermético para evitar la pérdida de humedad y ruptura del tarugo (Giraldo et al., 2014).



Figura 9. Obtención del tarugo de madera de *T. grandis* con barreno Pressler.

Se obtuvo el volumen verde del tarugo (Fórmula 4), luego los tarugos fueron colocados en la cámara de aclimatación hasta llegar a un contenido de humedad del 12%, en donde se determinó el peso específico:

$$PE_{12\%} = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Donde:

m: masa de la muestra al 12% (g)

V: Volumen verde de la muestra (cm³)

Se cortaron los árboles y se extrajeron discos de madera (tres por árbol), en la base a 10 cm del suelo, a 2,5 y 5 m del suelo. Según Giraldo et al., (2014), los discos deben tener un espesor promedio de 4 cm y fueron trasladados al laboratorio en bolsas debidamente identificadas.

Luego de extraer los discos se determinó el diámetro con corteza a cada disco con cinta diamétrica, para el diámetro sin corteza y duramen se midió con regla en dos lugares diferentes en el disco correspondiente y se promedió.

Determinación de PE (Método destructivo)

Para cada uno de los discos obtenidos se tomó una sección transversal de 2,54 cm de ancho (Figura 10). Cada muestra fue dividida en dos secciones, y con un marcador permanente fueron rotuladas con la orientación de la sección.

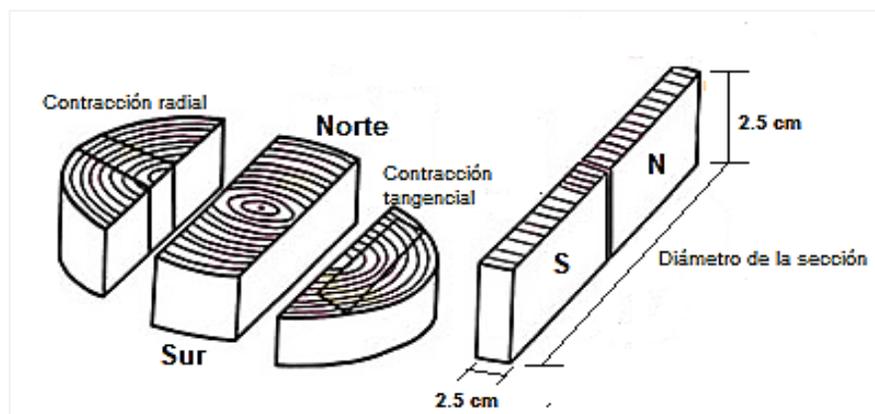


Figura 10. Diseño del muestreo para la determinación de las propiedades de la madera (Moya, Arce, Gonzalez, Olivares, y Rios, 2010).

Se procedió a obtener:

- Masa inicial
- Volumen

El volumen se determinó al colocar un recipiente sobre una balanza con agua, en donde se sumergió completamente la muestra. Se taró la balanza, y se utilizó un punzón con punta afilada para sumergir la muestra en el agua sin tocar las paredes del contenedor. Se esperó la estabilización en la lectura de la pantalla de la balanza y se procedió a obtener el peso. La lectura de la masa es igual a la masa de agua que se desplaza por la muestra, el agua al presentar una densidad de 1 g por cada cm^3 , el peso representa el volumen de la muestra (Figura 11). Las muestras fueron colocadas en el horno a una temperatura de 105°C continuos, según lo establecido en la norma Tappi aplicada por Moya y Tenorio (2013), hasta que se alcance un peso constante (24 horas).



Figura 11. Determinación del volumen mediante el Principio de Arquímedes.

Para determinar peso específico básico se utilizó la Fórmula 5:

$$PEB = \frac{m}{V} \quad (5)$$

Donde:

m: masa seca de la muestra (g)

V: Volumen de la muestra determinado por inmersión de agua (cm³)

Se determinó los valores de densidad verde (Fórmula 6) y contenido de humedad verde (Fórmula 7).

$$Dverde = \frac{m}{V} \quad (6)$$

Donde:

m: masa verde de la muestra (g)

V: Volumen verde de la muestra determinado por inmersión de agua (cm³)

$$\%CH = \frac{m-ms}{ms} \times 100 \quad (7)$$

Donde:

m: masa verde de la muestra (g)

ms: masa seca de la muestra (g)

Además, se analizó el color del duramen en los árboles tumbados.

Color del duramen

El color del duramen se midió en los discos obtenidos a una altura de 2,5 m, donde se tomó una sección transversal de 2,54 cm de ancho, y fue cortada en las mismas dos distancias de la médula según la metodología utilizada por Moya y Marín (2011).

Se obtuvo un total de 483 muestras (dos muestras por sección x seis repeticiones x 48 clones). El color de la madera se midió en el lado tangencial de la sección transversal de acuerdo con ISO 7724/1-1984 e ISO 7724/2-1984 (ISO, 1984). Se realizaron dos mediciones ya que, al ser árboles de una plantación clonal de cinco años, presentan poco duramen. Se utilizó un espectrofotómetro HunterLab MiniScan® XE Plus. Las mediciones se realizaron a temperatura ambiente y se determinaron las características del color mediante el sistema CIELAB que utiliza los parámetros L^* , a^* , b^* . El rango de medición fue de 400 a 700 nm, y se utilizó una abertura de 13 mm en el punto de medición. El componente especular (modo SCI) se incluyó para observar la reflexión a un ángulo de 10° que es normal para la superficie de la muestra (D65/10), un campo de visión 2° (Observador estándar, CIE 1931), y la iluminación D65 estándar (correspondiente a la luz del día a 6500 K).

El sistema del color de CIELab estima el color de madera en tres coordenadas: L^* para la ligereza representa la posición en el eje negro-blanco ($l = 0$ para el negro, $l = 100$ para el blanco), a^* para el valor de la croma y define la posición en el eje rojo-verde (+100 valores para tonos rojos, -100 valores para tonalidades verdes), y b^* para el valor de croma y define la posición del eje amarillo-azul (+100 valores para tonos amarillos, -100 valores para tonos azules) (Hunterlab, 1995).

Diferencia del color

La diferencia del color entre dos muestras de madera se da cuando se utiliza el sistema de CIELab y se expresa mediante el índice ΔE (cambio de color), donde se mide la diferencia del color entre dos puntos en el plano cartesiano, cuyo cálculo se realiza sumando las diferencias cuadradas de cada parámetro de madera (Fórmula 8). Además, se calculó el color del duramen ΔE para la evaluación de la calidad del color de los clones evaluados.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (8)$$

Donde:

- $\Delta L^* = \Delta L^*M - \Delta L^*P$
- $\Delta a^* = \Delta a^*M - \Delta a^*P$
- $\Delta b^* = \Delta b^*M - \Delta b^*P$
- M = valor de la coordenada de color de la muestra
- P = valor de la coordenada de color del patrón**

**Para la obtención del color patrón, se utilizaron los datos usados en el estudio realizado por Arce (2013), donde realizó el análisis de dos secciones de teca procedentes de un individuo de bosque natural de Myanmar donde obtuvo los valores de L*, a*, b*, estos fueron 44,94, 12,44 y 24,26 respectivamente.

Análisis estadístico

La información recolectada en campo, se ordenó en una base datos, mediante el programa Microsoft Excel 2016, donde se calcularon las variables mencionadas anteriormente (Fórmula 4, 5, 6, 7 y 8). Se analizó con Microsoft Excel 2016 y mediante el software SELEGEN (Resende, 2007), el cual permitió obtener de manera automática los componentes de varianza, heredabilidad y coeficiente de variabilidad genética para las variables deseadas.

El análisis de clones se realizó con el modelo 020, Bloques aleatorios, prueba de clones no relacionados, una planta por parcela de SELEGEN:

$$y = Xr + Zg + e \quad (9)$$

Donde “y” es el vector de datos, “r” es el vector de los efectos del promedio general, “g” es el vector de los efectos genotípicas (asumido como aleatorios), y “e” es el vector de errores o residuos (al azar). Las letras en mayúsculas representan las matrices de incidencia para los efectos antes mencionados (Resende, 2007).

Se estimó el promedio, la desviación estándar y coeficiente de variación para las propiedades evaluadas para cada clon. Se realizó un análisis de varianza, donde se verificó la normalidad de los datos. Se utilizó el programa SAS (SAS Institute Inc. 2001) para realizar el análisis estadístico. El nivel de significancia utilizado fue de $p < 0,05$. La diferencia entre las medias de los clones se estableció por la prueba de Tukey a una significancia de 99%.

Se realizó un análisis descriptivo para verificar que el parámetro color cumpliera con una distribución normal, homogeneidad de la varianza y que no tuviera datos extremos. Se calculó la desviación estándar, coeficiente de variación y los límites de confianza mediante Microsoft Excel 2016. Se utilizó un análisis de varianza para determinar las causas del parámetro de color.

$$Y_i = \mu + c_i + e_i \quad (10)$$

Dónde: “ Y_i ” es la observación de cada propiedad de la madera del árbol de i , “ μ ” es la media general, “ c_i ” es el efecto aleatorio del clon, y “ e_i ” es el efecto aleatorio residual.

Se estimó la heredabilidad para los parámetros de madera basados en la fórmula:

$$H^2 = \frac{\sigma_c^2}{\sigma_c^2 + \sigma_b^2} \quad (11)$$

Donde σ_c y σ_b son componentes de varianza para efectos clonales.

Se utilizó el análisis multivariado por componentes principales de clustering hierarchanical (CMA) para agrupar clones por color de madera. Donde al igual que Moya y Marín (2011), el objetivo fue encontrar una agrupación de clones tales que la variación de los parámetros de color dentro de cada cluster sea homogénea. Los valores medios de cada variable fueron introducidos en el modelo. Se utilizaron los programas estadísticos SAS y Statistica para evaluar la agrupación.

RESULTADOS

Propiedades generales

En las siguientes figuras (12, 13, 14, 15, 16 y 17) se presentan los valores promedio de los 46 clones y dos testigos de teca analizados.

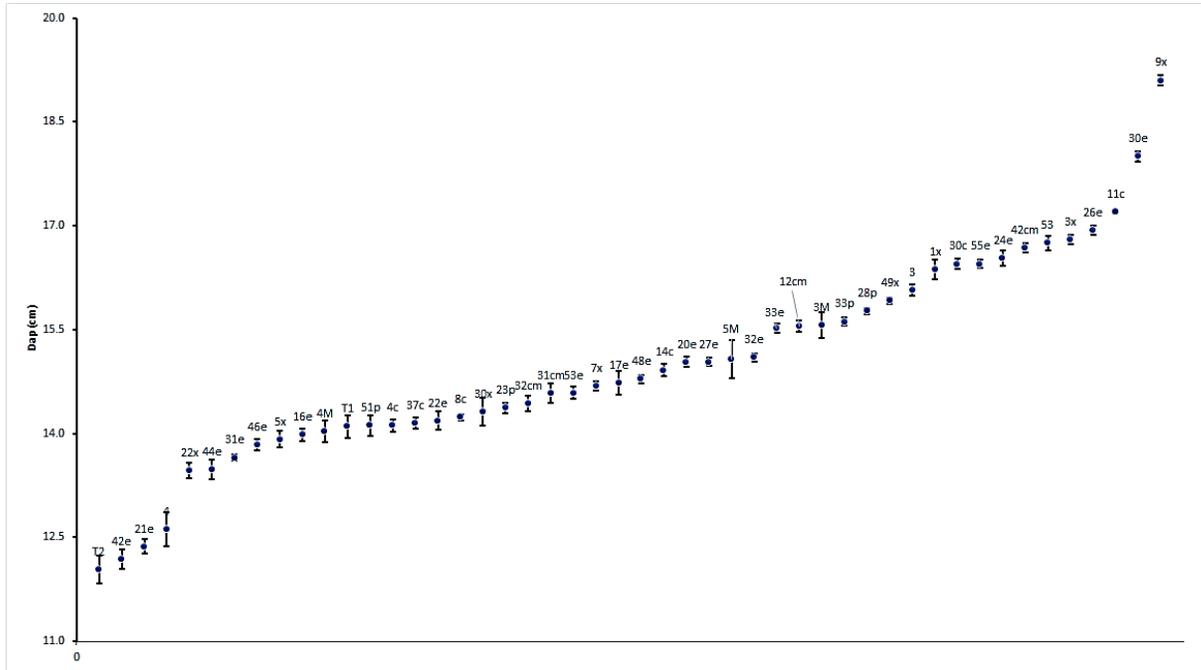


Figura 12. Promedio del diámetro (d) (cm) para los 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Para el diámetro (d) (Figura 12), el rango va de los 12,0 a los 19,1 cm, los clones que presentaron los valores más altos son el 9x, 30e y 11c, con de 19,1, 18 y 17,2 cm, respectivamente. Los valores más bajos los obtuvo el testigo T2, luego los clones 42e y 21e, con 12,0, 12,2 y 12,4 cm, respectivamente. El clon 9x presenta diferencias significativas con los clones 32e, 5M, 27e, 20e, 14c, 48e, 17e, 7x, 53e, 31cm, 32cm, 23p, 30x, 8c, 22e, 37c, 4c, 51p, 4M, 16e, 5x, 46e, 31e, 44e, 22x, 4, 21e, 42e. Para el valor más bajo (clon 42e), este es estadísticamente diferente a los clones 9x, 30e, 11c, 26e, 3x, 53, 42cm, 24e, 55e, 30c, 1x y el clon 3.

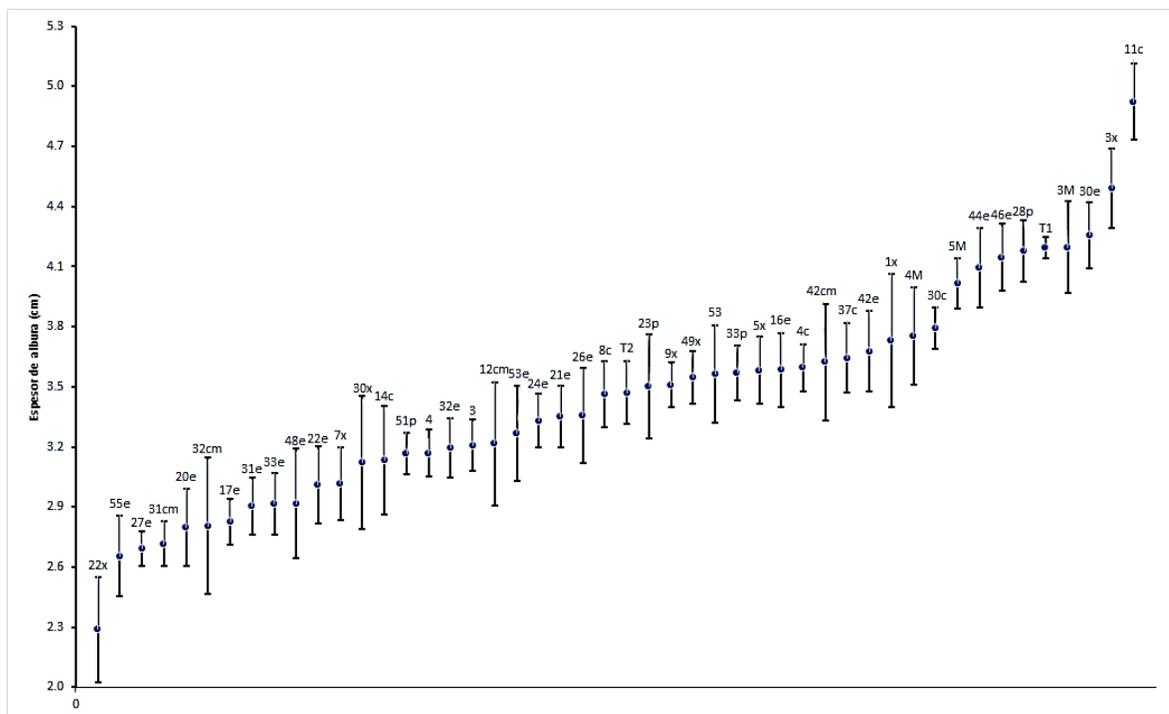


Figura 13. Promedio del espesor de albura (cm) para los 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona Norte, Costa Rica.

El espesor de la albura en la población se mantuvo dentro del ámbito de 2,3 a 4,9 cm, donde el clon 22x obtuvo el valor más bajo (2,3 cm), además, el clon 22x en albura es estadísticamente diferente a los clones 11c, 3x, 30e, 3M, 28p, 46e, 44e, 5M. El clon 11c fue el que presentó mayor albura con 4,9 cm, presentando diferencias significativas con 53e, 12cm, 3, 32e, 4, 51p, 14c, 30x, 7x, 22e, 48e, 33e, 31e, 17e, 32cm, 20e, 31cm, 27e, 55e, 22x.

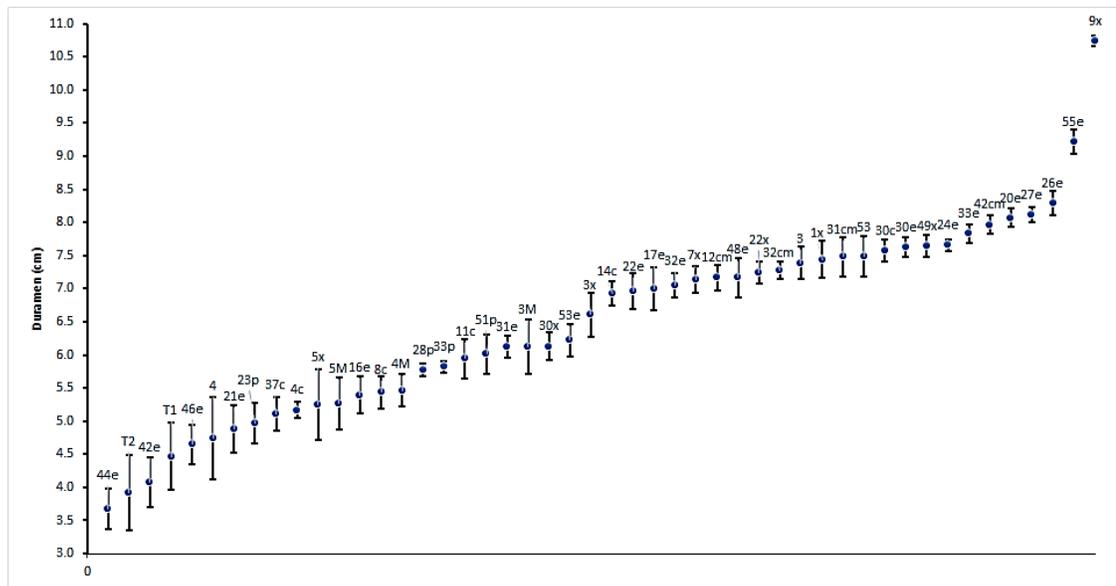


Figura 14. Promedio del duramen (cm) para los 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona de Costa Rica.

En cuanto al diámetro de duramen (Figura 14), los clones analizados junto con los dos testigos varían de 3,7 a 10,7 cm, el clon que presentó mayor diámetro de duramen fue el 9x (10,7 cm), y no presentó diferencias estadísticas con los clones 55e, 26e, 27e, 20e, 42cm, 33e, 24e, 49x, 30e, 30c, 53, 31cm, 1x, 3, 32cm, 22x, 48e, 12 cm, 7x, 32e, 17e. Por otra parte, el clon 44e, presentó el valor más bajo de duramen (3,7 cm), este clon es estadísticamente diferente a los clones 9x, 44e, 55e, 26e, 27e, 20e, 44e, 42cm, 33e, 24e, 49x, 30e, 30c, 53, 31 cm.

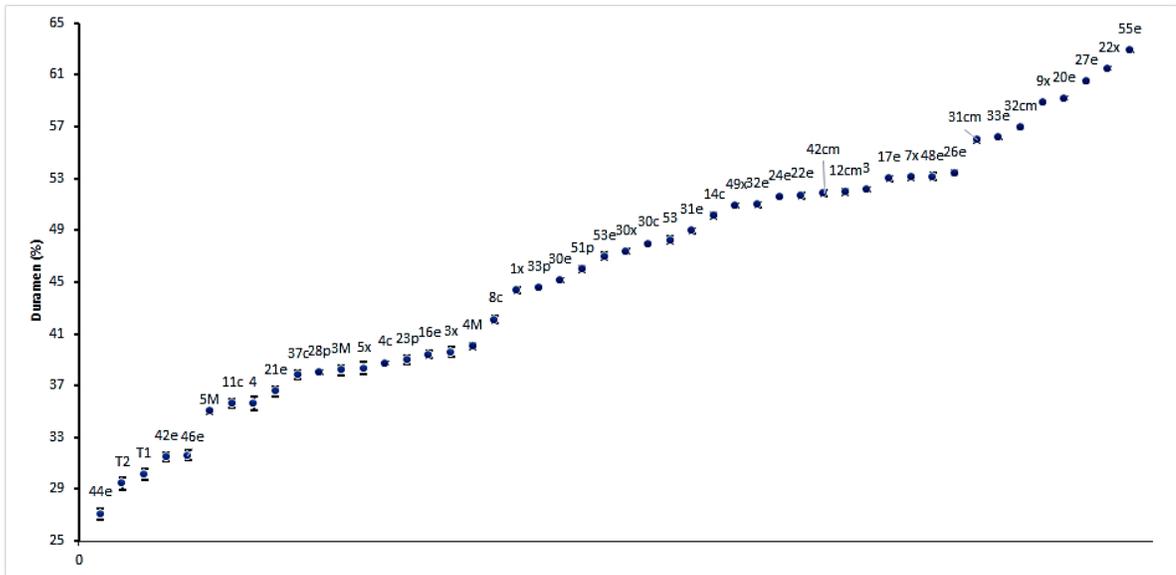


Figura 15. Porcentaje de duramen (%) en 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Si consideramos el porcentaje de duramen (Figura 15), este parámetro presenta un rango de 27,1% para el clon 44e hasta 62,9% para el 55e. El clon 55e es el que presenta el valor más alto es estadísticamente diferente a los siguientes clones 21e, 4, 11c, 5M, 46e, 42e, 44e y el testigo T2. El clon con menor porcentaje de duramen el 44e presenta diferencias significativas con los siguientes clones 55e, 27e, 20e, 9x, 32cm, 33e, 31cm, 26e, 48e, 7x, 17e, 44e.

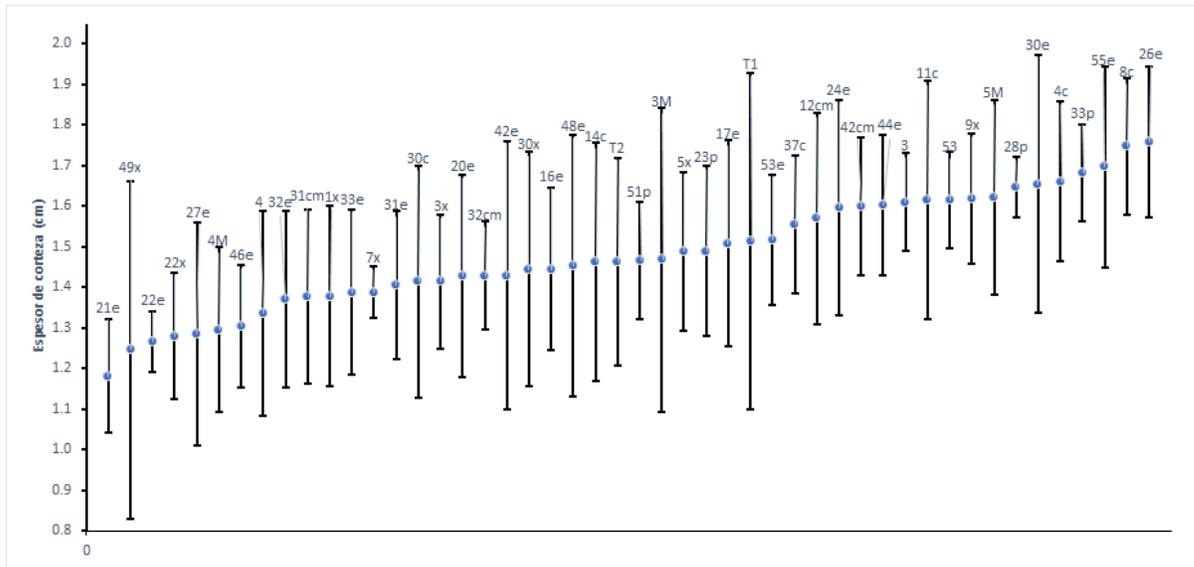


Figura 16. Promedio de espesor de corteza (cm) en 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Para el análisis de la corteza, el clon 21e, fue el que presentó el valor más bajo de espesor de corteza con 1,13 cm, en cuanto a igualdad estadística este clon es estadísticamente igual a todos los demás clones incluyendo los testigos. El clon 26e también es estadísticamente igual a los demás clones, considerando que presentó el valor más alto de espesor de corteza (1,71 cm).

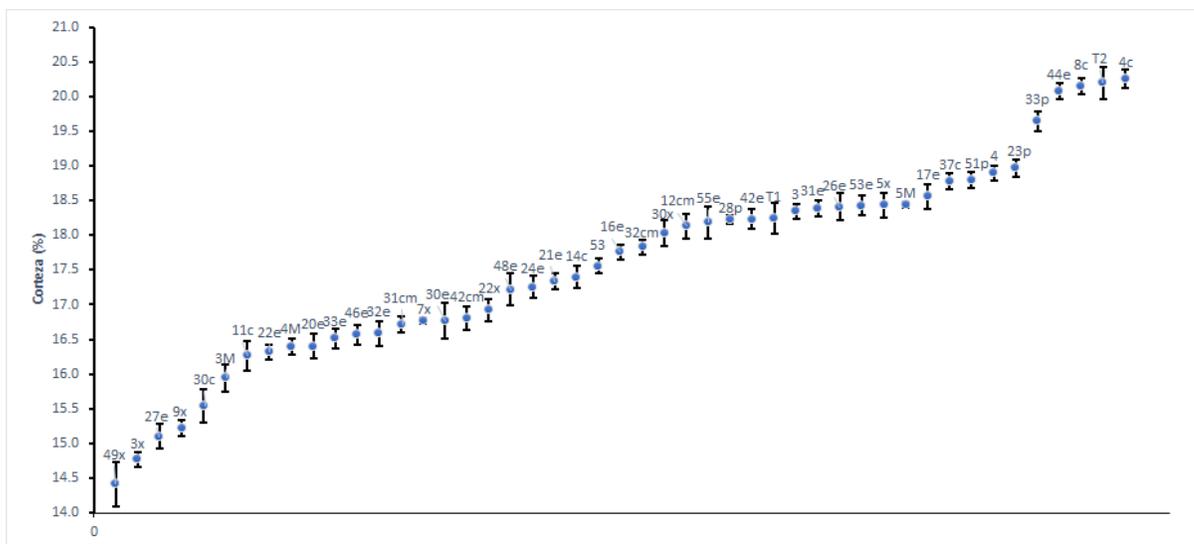


Figura 17. Porcentaje de corteza en 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

El análisis de corteza también fue realizado por porcentaje, donde fue el clon 49x el que presentó un 14,41%, por otra parte, el clon 4c fue el que obtuvo el valor más elevado de porcentaje de corteza con 20,25%. Sin embargo, ni el 49x ni el 4c presentaron diferencias estadísticas con otros clones.

Variación en altura

En la Figura 18 se observa la variación que existe en el árbol en cuanto al espesor de albura, diámetro y porcentaje de duramen. Denótese que para estos tres parámetros conforme se aleja más de la base del árbol, los valores disminuyen. El diámetro de duramen fue el que presentó la disminución más prolongada. Se puede resaltar que, a los 5 m el espesor de albura y duramen tiene un valor similar 3,34 y 3,53 cm.

La diferencia es más notoria en la base donde el espesor de albura presenta un valor de 4 cm y el duramen es de 10,1 cm.

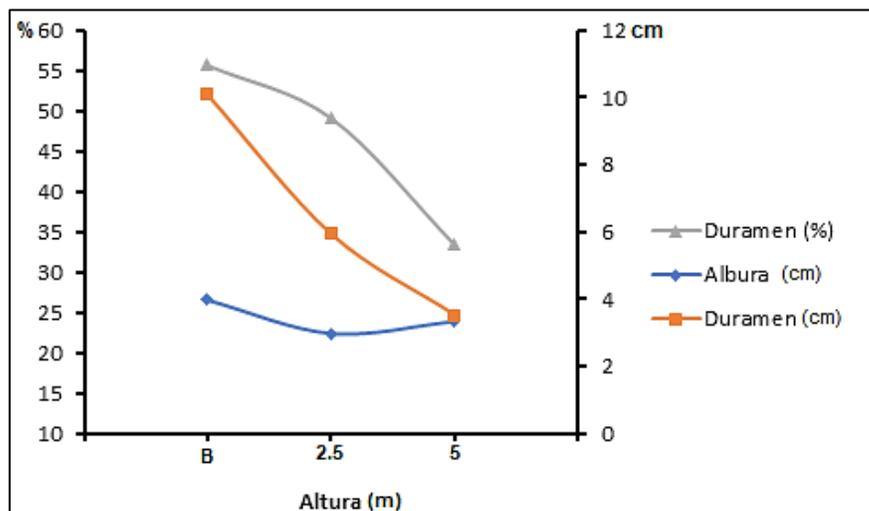


Figura 18. Diámetro de duramen, porcentaje de duramen y espesor de albura 46 clones y dos testigos de *T. grandis* a diferentes alturas del fuste.

Para la variación del espesor de corteza y porcentaje de corteza (Figura 19), se muestra que en ambos casos existe una disminución desde la base hasta cuando la altura es 5 metros, sin embargo, de 2,5 m a 5 m el porcentaje de corteza tiende a aumentar.

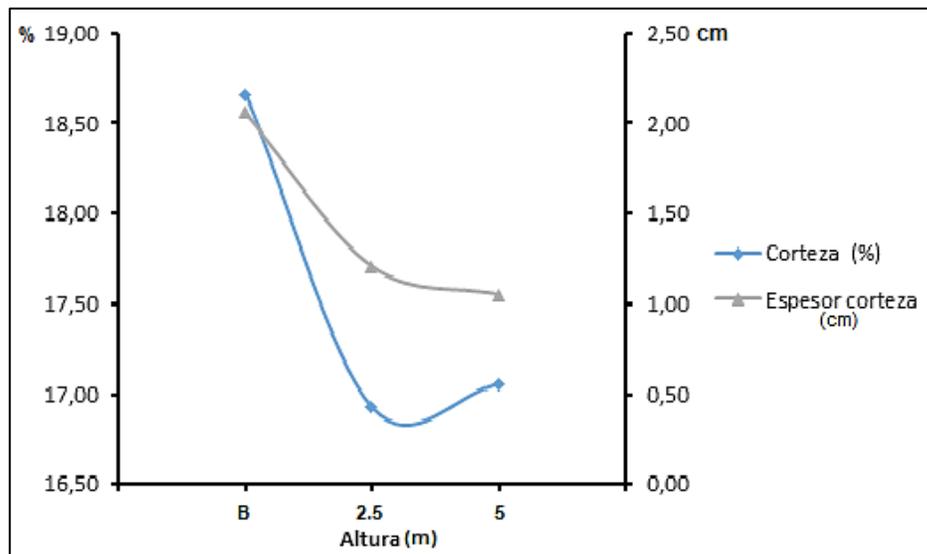


Figura 19. Espesor de corteza y porcentaje de corteza (%) en 46 clones y dos testigos de *T. grandis*.

En cuanto al análisis de varianza realizado para los diferentes parámetros con su respectiva interacción, para clon el valor de F es más alto con diámetro de duramen que con el resto de los parámetros, lo que implica que hay una baja significancia estadística, mayor que la del porcentaje de duramen y espesor de albura, para la corteza no hubo significancia estadística con clon.

En cuanto a la altura, presenta alta significancia estadística nuevamente con el diámetro de duramen, seguido por el espesor de corteza, ahora bien, para la interacción entre el clon*altura los valores de F fueron bajos, y no presenta diferencias con el resto de los parámetros evaluados.

Cuadro 6. Valores de F entre propiedades de la madera de *T. grandis*.

Fuente de variación	Diámetro de duramen	Porcentaje duramen	Espesor de albura	Espesor de corteza	Porcentaje corteza
Clon	10,38**	8,51**	7,73**	1,33 NS	1,83 NS
Altura	881,24**	210,56**	116,32**	341,19**	13,76**
Clon*altura	0,98 ^{NS}	1,38 ^{NS}	0,87 ^{NS}	0,81 ^{NS}	1,00 ^{NS}

Propiedades físicas

Se obtuvo que el peso específico al 12% obtenido de los tarugos de madera, varía de 0,46 para el 33p a 0,57 para el 11c, sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre 11c con el resto de clones, pero el clon 33p solo presentó diferencias significativas con el 11c.

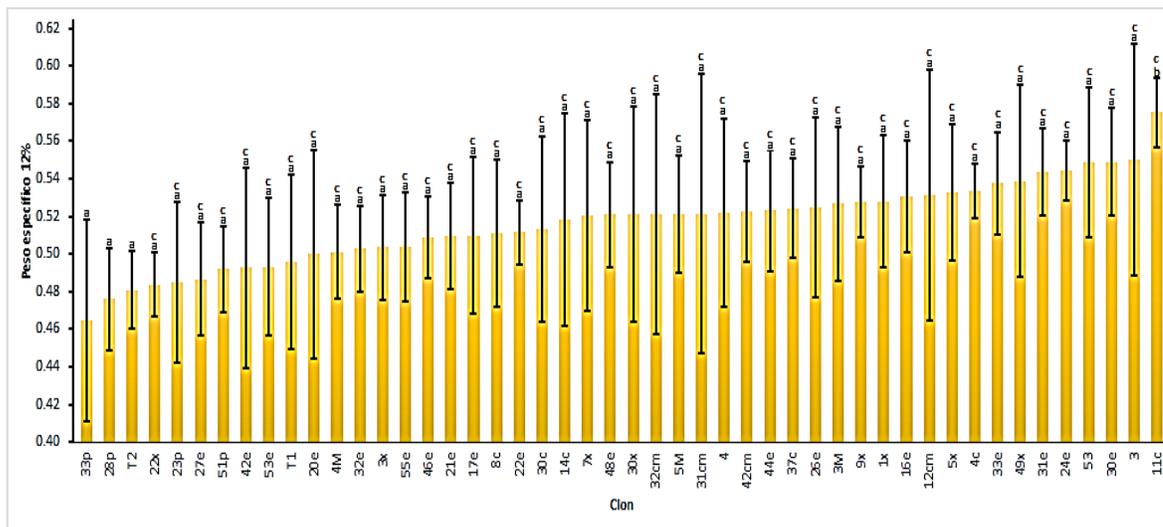


Figura 20. Peso específico a 12% de 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Otra propiedad analizada fue la densidad verde, donde el clon 33p y el testigo T1, obtuvieron los valores de densidad más bajos con 1,04 g/cm³, mientras que el clon 24e fue el que obtuvo el valor más alto de densidad verde con 1,13 g/cm³. El T1 es estadísticamente diferente a los clones 30e y 24e, mientras que el clon 24e es estadísticamente diferente a los clones 28p, 22x, T2 y 33p.

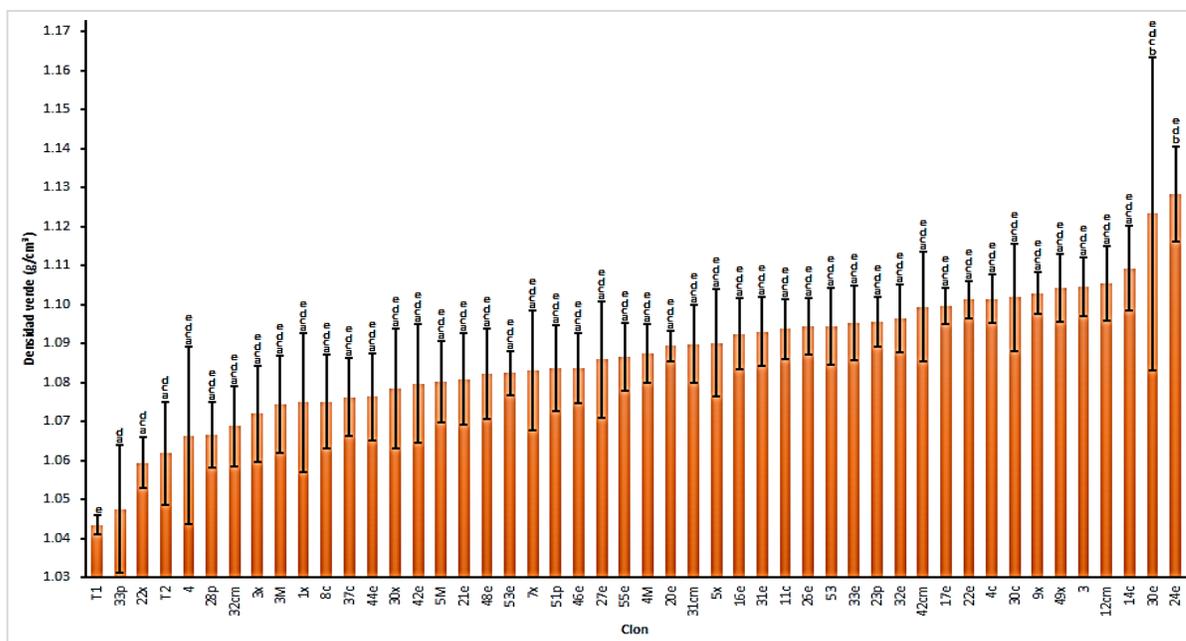


Figura 21. Densidad verde (g/cm³) de 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

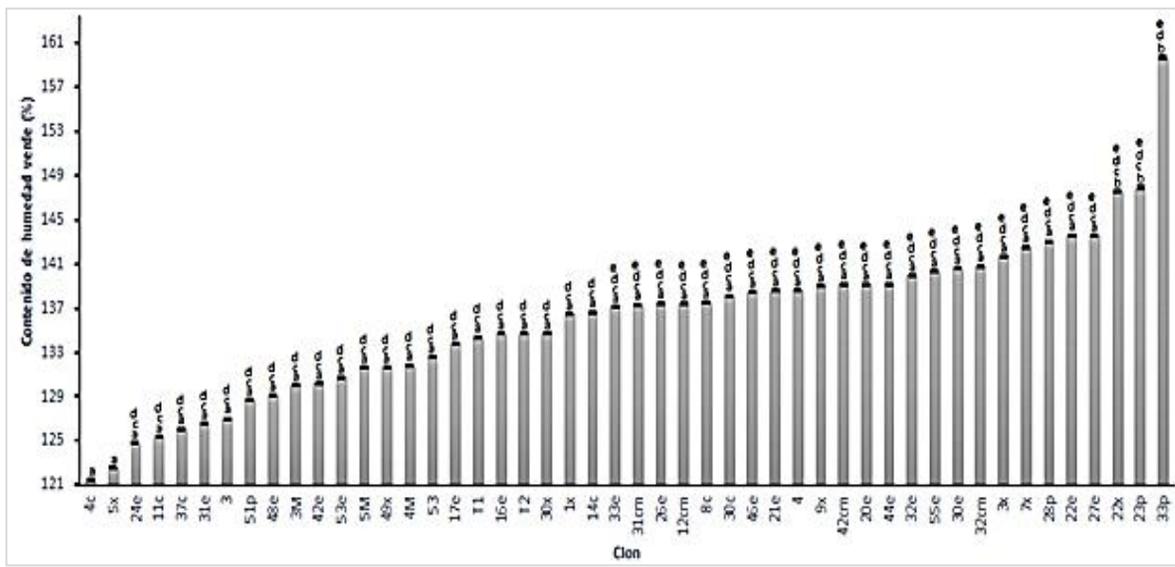


Figura 22. Contenido de humedad en verde (%) de 46 clones y dos testigos de *T. grandis* Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Respecto al contenido de humedad en verde, el rango fue de 121,07% a 159,14%, donde el clon 4c fue el que presentó el contenido de humedad en verde más bajo, y presentó diferencias significativas solamente con los clones 22x, 23p y 33p. Mientras que para el clon con el contenido de humedad más alto (33p), es estadísticamente diferente a los clones 23p, 22x, 27e, 22e, 28p, 7x, 3x, 32cm, 30e, 55e, 32e, 44e, 20e, 42cm, 9x, 4, 21e, 46e, 30c, 8c, 12cm, 26e, 31cm, 33e.

Se obtuvo el peso específico básico, donde el clon 24e fue el que obtuvo el valor más alto, obtuvo un valor de 0,5, y presentó diferencias significativas con 8c, 22e, 44e, 7x, 32cm, 27e, 4, 23p, 3x, 28p, 22x, 33p. El valor más bajo lo obtuvo el clon 33p, con 0,41, este clon es estadísticamente igual a los clones 46e, T2, 1x, 21e, 55e, 8c, 22e, 44e, 7x, 32cm, 27e, 4, T1, 23p, 3x, 28p, 22x.

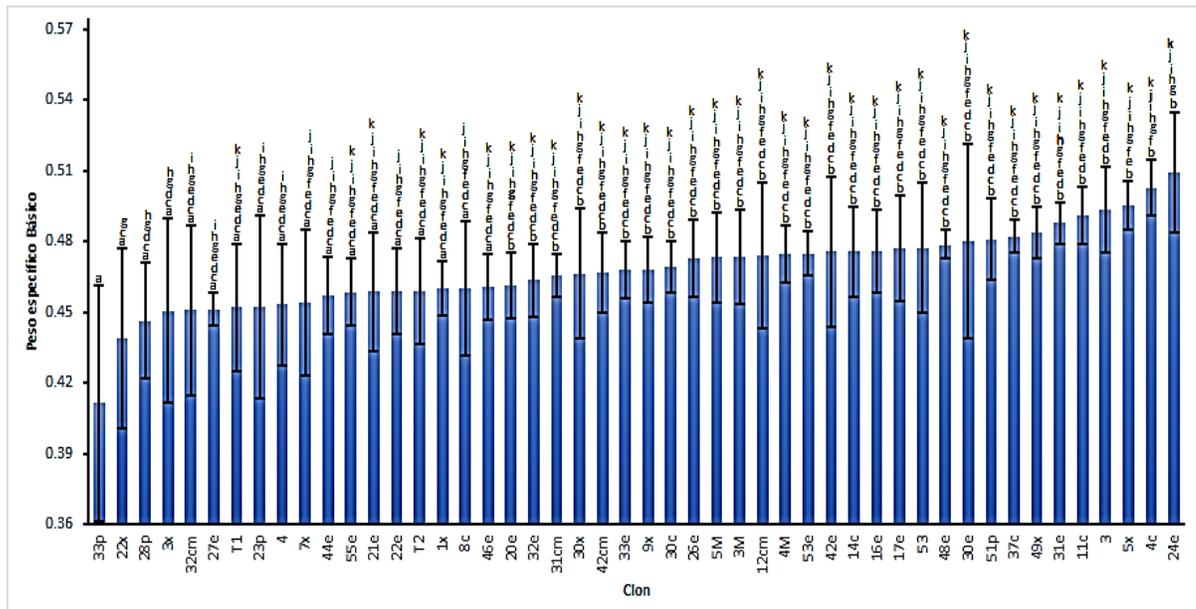


Figura 23. Peso específico básico de 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Variación en altura

En la siguiente figura (24a) se muestra la variación del peso específico básico en diferentes puntos del árbol, esta propiedad disminuye significativamente de la base a los 2,5 m pasando de 0,51 a los 0,44, sin embargo, aumenta levemente de 2,5 a 5 m pasando de 0,44 a los 0,44.

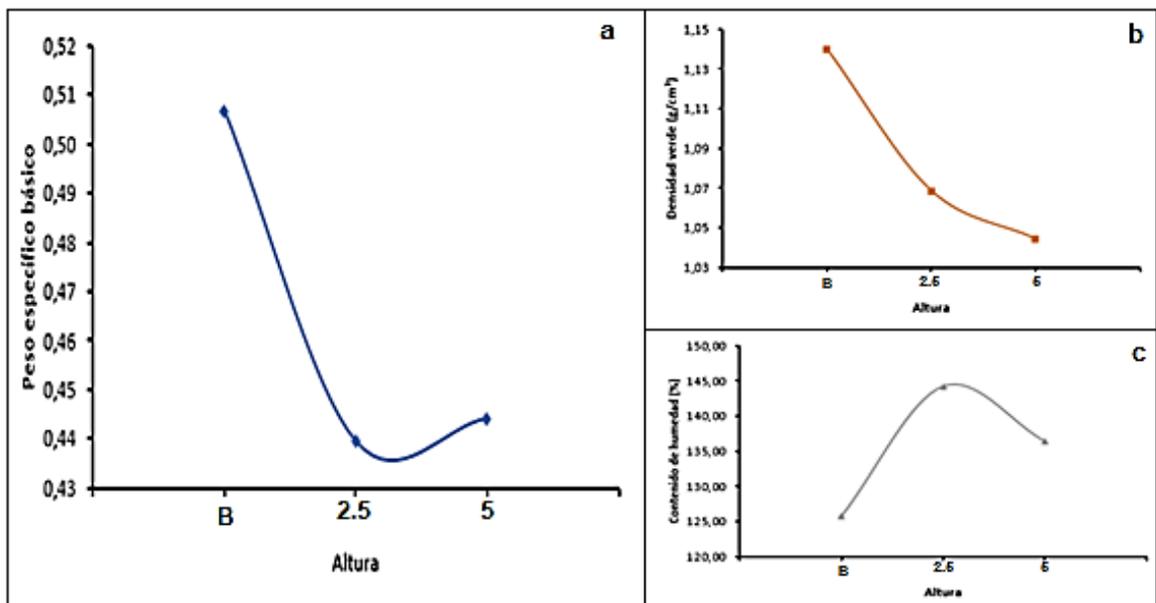


Figura 24. Peso específico básico (a), densidad verde (g/cm³) (b) y contenido de humedad verde (%) (c) de 46 clones y dos testigos de *T. grandis*.

Además, en la Figura 24b se observa cómo varía la densidad verde conforme aumenta la altura, esta propiedad disminuye significativamente de la base a los 2,5 m (de 1,14 a 1,07 g/cm³), de 2,5 a 5 m sigue disminuyendo de 1,07 a los 1,04 g/cm³. Para la propiedad de contenido de humedad verde (Figura 24c), los valores aumentan de la base a los 2,5 m, pasando de 125,8 a 144,2, sin embargo, disminuye de 2,5 a los 5 m, de 144,2 a 136,4.

Para el análisis de varianza (Cuadro 7) realizado para las diferentes fuentes de variación con las distintas propiedades físicas, se tiene que para el clon el valor de F es mayor para el peso específico básico, sin embargo, a pesar de ser un valor bajo, también presenta significancia con las demás propiedades. En cuanto a la altura, presenta alta significancia estadística nuevamente con el peso específico básico, mientras que el contenido de humedad verde y densidad verde, presentan significancia, por último, para la interacción entre el clon*altura los valores de F no fueron significativos con ninguna propiedad evaluada.

Para todas las fuentes de variación excepto la de clon*altura hay una dependencia del peso específico básico, contenido de humedad verde y densidad verde con la altura y el clon, en estos dos casos se encontró que la relación es válida estadísticamente.

Cuadro 7. Valores de F entre propiedades físicas de la madera de clones de *T. grandis*.

Fuente de variación	PEB	CH verde	Densidad verde (g/cm ³)
Clon	6,45**	5,10**	5,10**
Altura en el fuste	489,82**	135,74**	131,97**
Clon*altura	0,98 ^{NS}	0,99 ^{NS}	0,99 ^{NS}

Color de la madera

En las Figuras 25, 26, 27 y 28 se muestran los resultados para la luminosidad (L*), rojo (a*), amarillo (b*) y diferencia de color (ΔE) con respecto a un patrón de color. Para el valor de luminosidad (L*), existe una variación de 22,95 a 72,96, donde el valor más bajo fue para el T2, y el valor más alto lo obtuvo el otro testigo (T1), cabe resaltar que el T2 no presentó diferencias significativas con los clones 22x, 4M, 5x, 5M, 48e, 23p, 46e, 44e, 4, 11c, 42e, mientras que el T1, no presentó diferencias significativas con los demás clones. El valor promedio de L* fue de 61,71 (Figura 25).

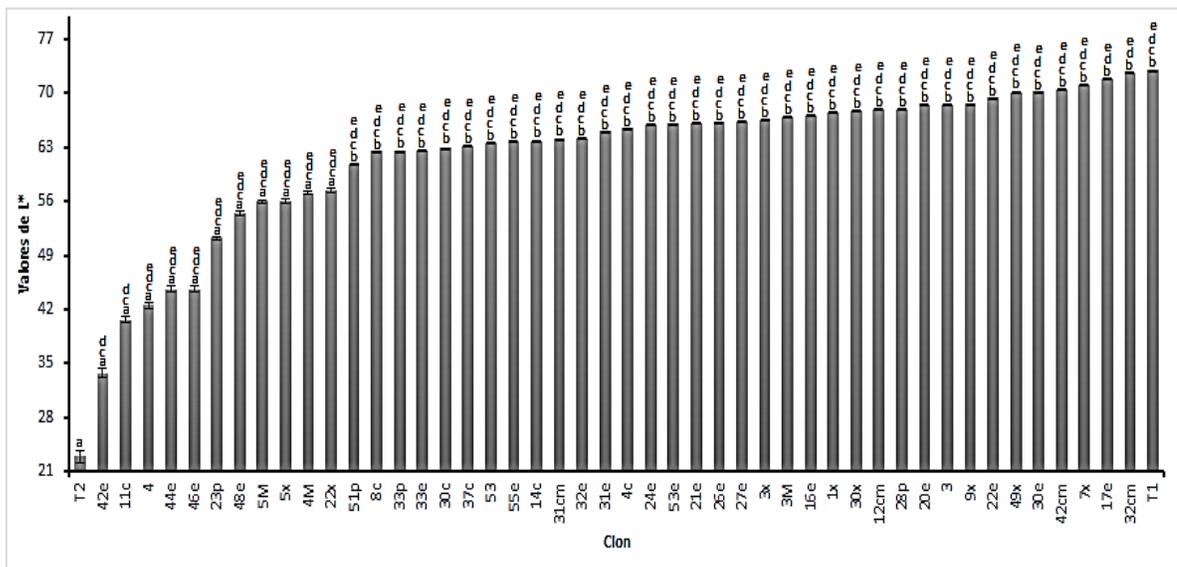


Figura 25. Parámetro de luminosidad (L^*) de 46 clones y dos testigos de *T. grandis*. en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

En la Figura 26 se observa el parámetro que mide el color rojo (a^*), donde ha sido el clon T2, es el clon que presentó el valor más bajo con 3,23, sin embargo, presentó diferencias con los clones 33p, 51p, 33e, 37c, 55e, 31cm, 8c, 32e, 14c, 30c, 21e, 3x, 31e, 26e, 3M, 53, 53e, 27e, 28p, 16e. El clon 33p fue el que presentó el valor más alto de a^* con 12,18, y presentó diferencias estadísticas solamente con los clones 42e, 11c, T2. El promedio para el valor de a^* fue de 9,08.

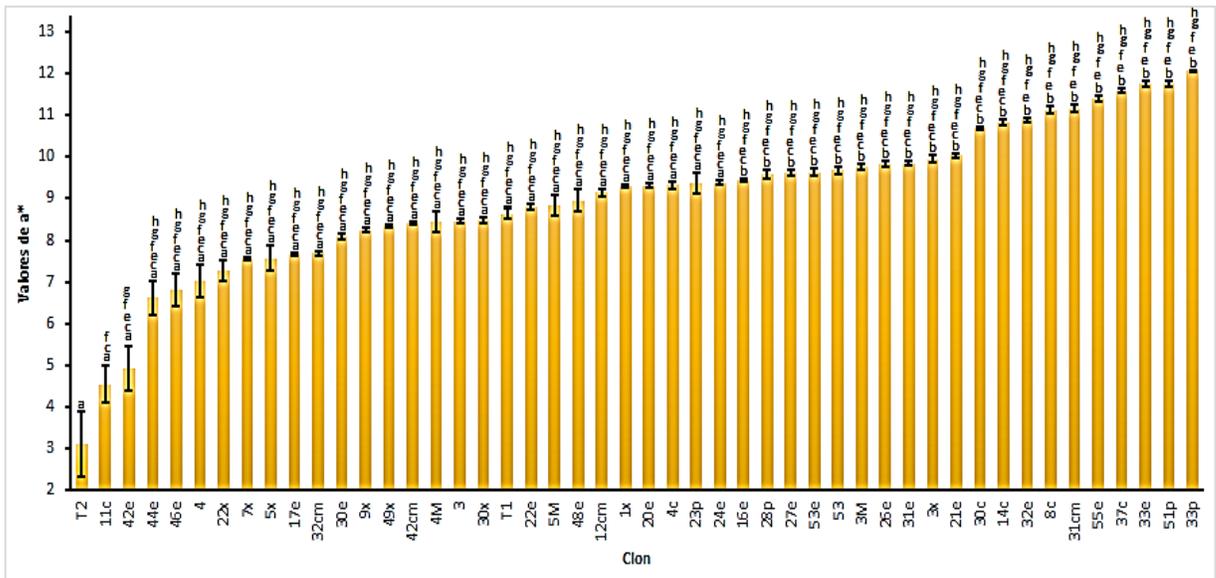


Figura 26. Parámetro de color rojo (a^*) de 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Para la Figura 27, se muestra el rango para el parámetro del color amarillo (b^*), que varía de 8,09 a 25,67, el valor más bajo lo obtuvo el testigo T2, la cual es estadísticamente diferente de los clones 8c, 30c, 4c, 53e, 37c, 51p, 1x, 3, 31e, 24e, 16e, 3x, 12cm, 33p, 28p, 49x, 17e. Por otro lado, el clon 8c fue el clon que obtuvo el valor más alto para este parámetro con 25,67, presentando diferencias estadísticas solamente con el clon 42e y el testigo T2. En este caso, el promedio del valor de b^* fue de 21,21.

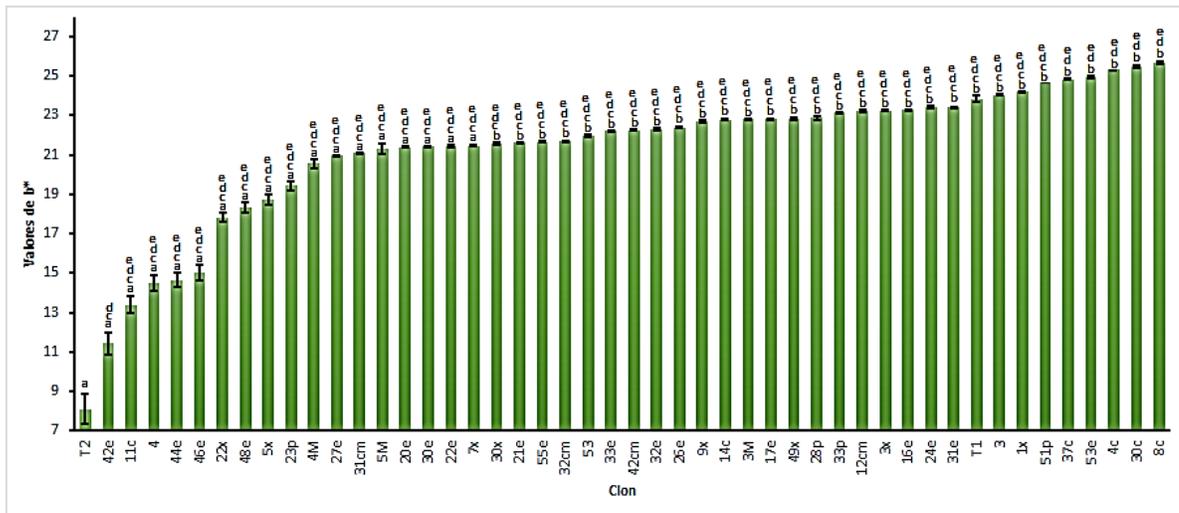


Figura 27. Parámetro de color amarillo (b*) de 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

En el caso del promedio de cambio de color ΔE entre el color del clon y el color patrón, los clones presentan valores entre 15,97 y 43,14 (Figura 28).

El valor más bajo es para el clon 51p y el más alto para el testigo T2. El clon 51p presenta diferencias significativas con el clon 42e y con el testigo T2. El T2 es estadísticamente diferente a los clones 3, 20e, 28p, 30x, 12cm, 1x, 23p, 16e, 3M, 27e, 3x, 26e, 21e, 24e, 53e, 4c, 31e, 31cm, 32e, 55e, 53, 14c, 37c, 30c, 33e, 8c, 33p, 51p.

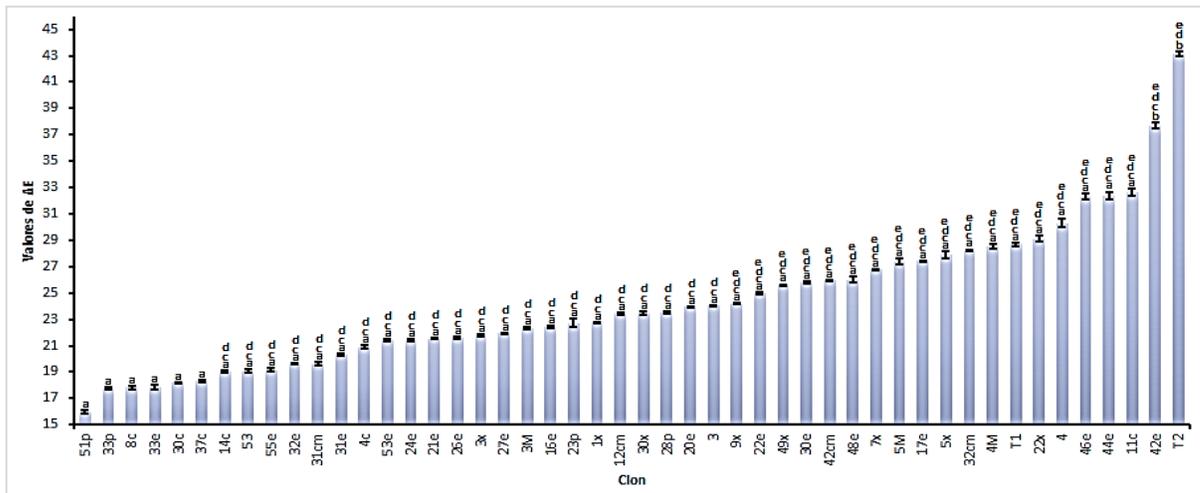


Figura 28. Cambio de color (ΔE) de 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

Agrupamiento

La Figura 29, presenta el conjunto de grupos de clones la cual se seleccionaron con respecto a los parámetros de color L^* , a^* , b^* .

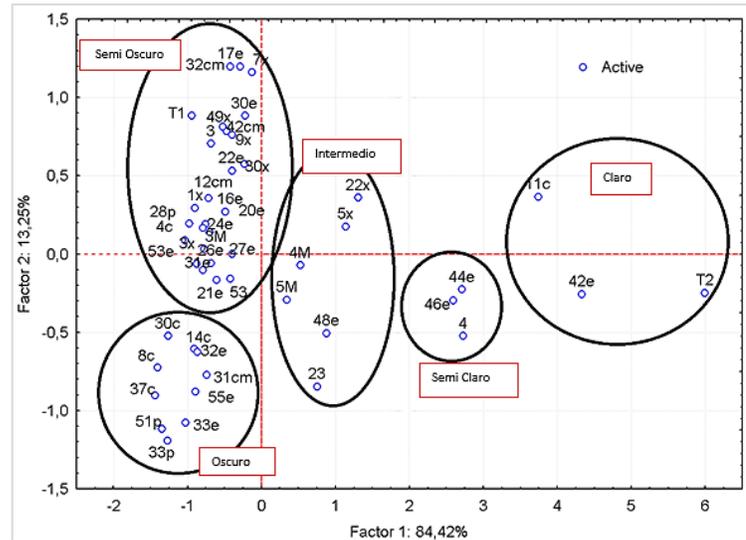


Figura 29. Agrupamiento por similitud de color de duramen en 46 clones y dos testigos de *T. grandis* en Upala, Zona Norte de Costa Rica.

El Factor 1 (eje x), explica el 84,42% de los datos donde el parámetro de color b^* es la variable que más determina el agrupamiento, el Factor 2 (eje y) explica el 13,25%, en este factor el parámetro a^* es el que determina el agrupamiento. Mientras que el Factor 3, explica 2,33%, sin embargo, al ser mínimo no se colocó en la Figura 29. Los factores 1 y 2, explican en un 98% la agrupación del modelo (Cuadro 8).

Cuadro 8. Verosimilitud y varianza para los parámetros de color.

Componente	Factor 1	Factor 2	Factor 3
L^*	-0,91	0,40	0,14
b^*	-0,98	0,07	-0,21
a^*	-0,87	-0,49	0,09
% Varianza	84,42	13,25	2,33
Varianza acumulada	84,42	97,67	100,00

La Figura 29 muestra cinco grupos en las cuales cada uno presenta similitud entre los clones agrupados. En el grupo que nos interesa más (Oscuro), está conformado por los clones 31cm, 32e, 55e, 14c, 37c, 30c, 33e, 8c, 33p y 51p, dichos clones fueron los que presentaron los valores más bajos de ΔE (Figura 28). Mientras que los clones 42e y 11c, junto con el testigo T2, fueron los clones con mayor ΔE , por lo tanto, presentan un duramen claro.

Análisis de correlación

Los diferentes parámetros se relacionaron genéticamente con las propiedades físicas analizadas en el ensayo. En cuanto a la correlación genotípica positiva del diámetro con las demás variables se obtuvo el valor más alto con el duramen con 0,75, seguido de la variable corteza, densidad verde, porcentaje de duramen, PE12% y espesor de albura, donde la correlación fue 0,47, 0,44, 0,41, 0,38 y 0,28, respectivamente. La variable porcentaje de corteza presentó la correlación negativa de -0,48 más alta, lo que implica que, a valores altos de diámetro, el porcentaje de corteza disminuye. Los parámetros de color a^* y ΔE también mostraron correlación significativa baja.

La proporción del duramen también mostró una correlación alta de 0,89 con porcentaje duramen, además se encuentra correlacionado con densidad verde y PE12% (0,46 y 0,22), mientras que con las variables ΔE , porcentaje de corteza, espesor de albura, color b^* y color a^* , presentan un valor inversamente proporcional al duramen (-0,42, -0,57, -0,38, -0,2 y -0,22, respectivamente). El porcentaje de duramen muestra un comportamiento genéticamente positivo solo con la variable densidad verde (0,34) y contenido de humedad verde (0,23), mientras que se correlacionó negativamente con el espesor albura (-0,73), cambio de color ΔE (-0,44), porcentaje de corteza (-0,39) y por último con el parámetro de color b^* (0,34) (Cuadro 9).

El espesor de corteza está bien relacionado con el porcentaje corteza con una correlación positiva de 0,50, seguido del espesor de albura, color b^* y PEB en la base (0,29, 0,27 y 0,24). Otras de las variables analizadas fueron porcentaje de corteza y espesor de albura, donde la correlación más significativa fueron con el parámetro b^*

con 0,32 y 0,24. PEB a los 2,5 m de altura del fuste del árbol fue el parámetro más relacionado con otras propiedades analizadas, PEB del árbol y contenido de humedad verde fueron los que presentaron los coeficientes más altos, de 0,93 y -0,86 respectivamente, aunque esta última fue inversamente proporcional. Por otro lado, tiene correlación positiva con PEB en la base, PEB a 5 m de altura del árbol, PE12% y densidad verde (0,72, 0,75, 0,67 y 0,63), también se correlacionó negativamente con el parámetro a^* (0,31).

El parámetro PEB en la base muestra una correlación positiva de 0,85 con PEB, de 0,61 con peso específico al 12%, 0,59 con densidad verde, 0,51 con peso específico a los 5 m de altura, 0,28 con a^* y una correlación negativa de -0,75 con contenido de humedad verde. De igual forma, el PEB a 5 m presenta una correlación con PEB, densidad verde, PE al 12%, b^* y contenido de humedad verde (0,85, 0,56, 0,50, 0,21 y -0,80, respectivamente). Además, se encontró que el PE12% fue positivamente relacionado con PEB y densidad verde mientras que negativamente relacionado con contenido de humedad verde y color a^* (0,68, 0,57 y -0,57, -0,40).

En cuanto al PEB, este se correlaciona con densidad verde y b^* (0,67 y 0,24), presenta un alto grado de correlación negativa de -0,92 con contenido de humedad, por lo tanto, a un alto PEB, el contenido de humedad verde será bajo. Con el parámetro a^* presentó correlación negativa de -0,22. Para densidad verde la correlación fue significativa, aunque inversamente proporcional con contenido de humedad verde, ΔE y a^* (-0,34, -0,24, -0,23, respectivamente). Contenido de humedad verde muestra una correlación negativa con b^* (-0,34).

Para los parámetros que determinan el color del duramen, se obtuvo que para luminosidad (L^*) tuvo una correlación genética con a^* de -0,77, b^* de -0,23 y ΔE de 0,48. En cuanto al color rojo determinado por a^* , tiene una correlación positiva con b^* (0,34) mientras que negativa con ΔE de -0,44. El parámetro b^* tuvo una correlación inversamente proporcional al cambio de color ΔE de -0,22.

Cuadro 9. Correlación genética entre propiedades de la madera en una colección clonal de *T. grandis* en Upala, Zona Norte, Costa Rica (N=48).

	D	Diám Duramen	% Duramen	Cort	% Cort	Espes Albu	PEB2,5	PEBb	PEB5	PE12%	PEB	Dens Verde	CHV	L*	a*	b*	ΔE
D	1																
Diám Duramen	0,75*	1															
%Duramen	0,41*	0,89*	1														
Cort	0,47*	0,10	-0,06	1													
%Cor	-0,48*	-0,57*	-0,39*	0,50*	1												
Espes Albu	0,28*	-0,38*	-0,73*	0,29*	-0,07	1											
PEB2,5	0,15	0,09	-0,01	0,15	-0,03	0,11	1										
PEBb	0,13	-0,06	-0,14	0,24*	0,10	0,21*	0,72*	1									
PEB5	0,03	0,08	0,04	0,02	-0,05	-0,01	0,75*	0,51*	1								
PE12%	0,38*	0,22*	0,05	0,17	-0,20*	0,23*	0,67*	0,61*	0,50*	1							
PEB	0,13	0,05	-0,04	0,17	0,01	0,11	0,93*	0,85*	0,85*	0,68*	1						
Dens Verde	0,44*	0,46*	0,34*	0,11	-0,28*	-0,04	0,63*	0,59*	0,56*	0,57*	0,67*	1					
CHV	0,08	0,17	0,23*	-0,10	-0,11	-0,17	-0,86*	-0,75*	-0,80*	-0,57*	-0,92*	-0,34*	1				
L*	0,02	0,16	0,14	-0,17	-0,21*	-0,07	0,06	-0,01	-0,14	0,04	-0,04	0,03	0,06	1			
a*	-0,24*	-0,22*	-0,13	0,03	0,26*	-0,10	-0,31*	-0,19	-0,07	-0,40*	-0,22*	-0,23*	0,14	-0,77*	1		
b*	-0,08	-0,29*	-0,34*	0,27*	0,32*	0,24*	0,19	0,28*	0,21*	-0,11	0,24*	-0,04	-0,34*	-0,23*	0,34*	1	
ΔE	-0,33*	-0,42*	-0,44*	-0,17	0,11	0,23*	0,00	0,03	-0,14	-0,05	-0,03	-0,24*	-0,08	0,48*	-0,44*	-0,22*	1

Nota: * estadísticamente significativo al 95%; D: diámetro altura de pecho, Diám Duramen: diámetro duramen, % Duramen: Porcentaje de duramen, Cort: corteza, % Cort: porcentaje de corteza, Espes Alb: espesor de albura, PEB2,5: peso específico básico a 2,5 m de altura del árbol, PEBb: peso específico básico en la base del árbol, PEB5: peso específico básico a 5 m de altura del árbol, PE12%: peso específico al 12%, PEB: peso específico básico promedio del árbol, Dens Verde: Densidad Verde, CHV: contenido de humedad verde, L*: parámetro de luminosidad, a*: parámetro color rojo, b*: parámetro color rojo, ΔE: cambio de color.

Efecto clon/bloque en las propiedades de la madera

El efecto del clon y el bloque sobre las propiedades de la madera es presentado en el Cuadro 10.

Con respecto al efecto del clon de árboles de *T. grandis*, se encontró un efecto genético significativo para todas las variables ($\alpha < 0,001$) excepto para el peso específico al 12%. La varianza de los datos atribuida al clon varía de 19,72 a 100,00% (Cuadro 10). La varianza atribuida al efecto clon, explicaba el 100,0% para las variables PEB 2,5, PEB y Contenido de humedad en verde.

En el efecto bloque se encontró un efecto significativo para las variables porcentaje de duramen, espesor y porcentaje de corteza y espesor de albura ($\alpha < 0,001$), además, la varianza rondó desde 0,00% a 80,28% en el caso de espesor de corteza.

Heredabilidad de las propiedades de la madera

En el Cuadro 10, se puede observar los parámetros genéticos obtenidos con SELEGEN para las diferentes propiedades generales y físicas de los clones. Solamente las variables físicas de duramen, porcentaje de duramen, diámetro, albura, y otras variables físicas (a^* y PEB) presentan valores de H^2 superior a 0,30 y similar a 0,39. Las demás variables presentaron valores que rondaron entre 0,10 a 0,26.

Las propiedades que presentaron valores buenos de heredabilidad media del clon ($> 0,75$) fueron duramen, porcentaje de duramen, parámetro de color a^* , diámetro, albura y PEB. Mientras que la propiedad que mostró el valor más bajo fue espesor de corteza, cuyo valor no pasó de los 0,40. Para el caso del parámetro genético exactitud, hubo valores menores que 0,80, sin embargo, la mayoría de los datos estuvieron por encima de este valor que es considerado como aceptable.

VARIABLES como duramen, índice del cambio de color, porcentaje de duramen, espesor de albura y el parámetro de color a*, presentaron los valores más altos en lo que respecta al coeficiente de variación genética, el rango fue 19,54, 17,68, 17,62, 13,40 y 10,94, respectivamente.

Cuadro 10. Resultado del análisis de varianza y los valores de los parámetros genéticos para las diferentes variables estudiadas en el ensayo clonal de *T. grandis* en Upala, Zona Norte, Costa Rica.

Propiedades de la madera	Efecto clon		Efecto Bloque		Parámetros genéticos			
	Valor F	% VAR	Valor F	% VAR	H ² g	H ² mc	Exactitud	Cv _{gi} %
D	4,32*	96,22	2,06 ^{ns}	3,78	0,36±0,10	0,77	0,88	8,44
Duramen	4,80*	93,97	2,74 ^{ns}	6,03	0,39±0,11	0,79	0,89	19,54
% Duramen	4,62*	84,59	5,90*	15,41	0,38±0,10	0,78	0,89	17,62
Corteza	1,63*	19,72	22,00*	80,28	0,10±0,05	0,40	0,63	6,16
% Corteza	2,52*	42,96	17,54*	57,04	0,19±0,07	0,59	0,77	6,46
Albura	4,13*	76,10	8,57*	23,90	0,34±0,10	0,76	0,87	13,40
PEB 2,5	3,08*	100,00	0,95 ^{ns}	0,00	0,26±0,09	0,68	0,82	3,47
PEB base	2,61*	99,50	1,06 ^{ns}	0,50	0,21±0,08	0,62	0,79	3,40
PEB 5	2,84*	99,75	0,95 ^{ns}	0,25	0,24±0,08	0,65	0,81	3,35
PEB	4,05*	100,00	0,89 ^{ns}	0,00	0,34±0,10	0,75	0,87	3,24
PE12%	1,86 ^{ns}	72,29	3,81 ^{ns}	27,71	0,13±0,06	0,47	0,69	2,96
Densidad Verde	2,30*	80,50	3,28 ^{ns}	19,50	0,18±0,07	0,56	0,75	1,14
CH Verde	3,10*	100,00	0,50 ^{ns}	0,00	0,26±0,09	0,68	0,82	4,35
Parámetro L*	2,52*	96,20	1,53 ^{ns}	3,80	0,21±0,08	0,61	0,78	3,41
Parámetro a*	2,89*	93,75	2,02 ^{ns}	6,25	0,37±0,11	0,78	0,88	10,94
Parámetro b*	2,54*	93,86	1,84 ^{ns}	6,14	0,17±0,07	0,54	0,74	4,29
Parámetro ΔE	2,68*	89,04	2,65 ^{ns}	10,96	0,22±0,08	0,63	0,79	17,68

Nota: *estadísticamente significativo 99%.

DISCUSIÓN

Propiedades generales

Es importante resaltar, que el diámetro varía de 12 a 19 cm con una edad aproximada de 4,5 años, en estudios posteriores el diámetro (cm) aumenta como es de esperarse a edades mayores, un ejemplo claro, fue el realizado por Moya, Marín, Murillo y Leandro (2013) y Arce (2013), donde el diámetro varió 15,1 a 22,6 cm y de 19,82 a 30,13 cm, respectivamente, teniendo en cuenta que dichas plantaciones tenían 11 y 15 años.

Goh, Chaix, Bailleres y Monteuuis (2007), resaltan que en la reforestación con material clonal se debe buscar clones que aumenten el valor comercial de la plantación, mayor crecimiento y mayor calidad, así se busca la menor variabilidad posible de las características de calidad dentro de un mismo material genético. Se encontró que el coeficiente de variación para el clon 11c es bastante bajo (2%), lo que implica que para este clon específico la característica de diámetro es poco variable (Figura 12). De esta manera podríamos esperar que los árboles de este clon presenten un crecimiento diametral más uniforme que el resto de los clones. Ahora bien, los árboles de los clones con alta variación (5M, 3M, 17e, 30x y 4), se pueden considerar pocos estables (Arce, 2013). En el aspecto industrial, un diámetro del árbol alto permite un mayor aprovechamiento de la troza y una disminución de los desperdicios (Quirós, Chinchilla, y Gómez, 2005).

De acuerdo con Pérez y Kanninen (2003), conforme aumenta la edad el espesor de albura disminuye, que comparado con los valores obtenidos en este estudio (2,3 a 4,9 cm) se pueden considerar aceptables y que se espera disminuyan con el tiempo, ya que según Moya (2001) los árboles entre 7 y 9 años presentan un espesor de 3,05 a 2,79 cm, respectivamente. Así mismo, Rivero y Moya (2006), presentan valores entre 4 y 5 cm, difiriendo con los reportados por Moya (2001).

Según Kokutse, Bailleres, Stokes y Kokou (2004), el espesor de albura en plantaciones comerciales, debe ser de una baja proporción, esto para términos de comercialización, estética y durabilidad. Para este estudio, cabe resaltar que el clon que presentó mayor porcentaje de duramen (55e) presentó un espesor de albura bajo, y presentó un diámetro alto.

En lo que respecta al duramen, en este estudio el porcentaje rondó de 27,1% a 62,9%, sin embargo, hay que considerar la presencia de 46 clones, mientras que para el estudio realizado por Arce (2013), dicho rango fue 49,8 a 60%, en la cual se analizaron 56 clones en 5 bloques solamente. Además, Pérez y Kanninen (2003), en su estudio reporta un rango de porcentaje de duramen de 0,4 a 61%.

Al comparar el promedio de porcentaje de duramen obtenido en este estudio (47%) con otras investigaciones realizadas se observa que dicho porcentaje es alto al ser un ensayo de árboles clonados (Pérez y Kanninen, 2003), en árboles no clonados en Bangladés, se reportan porcentajes similares a los de árboles clonados, sin embargo, con mayor edad (Latif y Younus, 1981). Otros estudios mencionan que la teca presenta una proporción de duramen de 55% a los 30 años, aumentando logarítmicamente conforme avanza la edad y consecuentemente conforme aumenta el diámetro. Valores de 33 a 37% de duramen se reportan para árboles de 10 años de edad en la región seca de Costa Rica, cifras similares se registran a la misma edad en la región húmeda (Fonseca, 2004). Otros estudios realizados por Víquez y Pérez (2005) en árboles de 7 y 8 años, presentan valores de porcentaje de duramen de 14 a 25%, originando una disminución del duramen con la altura del árbol, pasando de 40% en la base del árbol a 15% en la parte alta (Moya, 2001).

La cantidad de duramen crece conforme aumenta la edad del árbol, sin embargo, no todos los clones se comportan igual, en general éste varía conforme el lugar donde sea tomado en el árbol, ya que como lo estudió Pérez y Kanninen (2003), el duramen, la albura y la corteza varía en diferentes alturas del fuste entre árboles (Figura 18 y 19), además, el duramen puede presentar un aumento exponencial con el aumento del diámetro. En árboles en las plantaciones de alta densidad se espera

que produzca mayores proporciones de duramen que los árboles en plantaciones con bajas densidades, ya que las copas son más pequeñas y, en consecuencia, influiría en la formación de más duramen (Pérez y Kanninen, 2003).

Con respecto al porcentaje de corteza, éste presenta una disminución significativa, ya que los clones a la edad de 4,5 años presentan porcentajes de 14,41% hasta 20,25%, mientras que Moya, Marín, Murillo y Leandro (2013), encontraron clones que a la edad de 11 años, presentan una variación de 15,9% a 27,3%. En cuanto a los reportados por Arce (2013), al tener los clones 15 años presentan porcentajes de 6,23% hasta 12,30% considerablemente bajos respecto a este estudio. En otros estudios realizados, el porcentaje de corteza fue de 16,92 % (Flórez, Trugilho, Lima, Hein, y Silva, 2014), mientras que para árboles de entre 10 y 15 años de edad el porcentaje fue de 20% (Pérez y Kanninen, 2003). De manera general, presenta una disminución de la corteza conforme aumenta la edad de los árboles.

Propiedades físicas

Al considerar el análisis mediante la propiedad de peso específico al 12%, Rivero y Moya (2006), encontraron valores de 0,52 en el estudio llevado a cabo en Bolivia, ahora bien, en este estudio realizado en Upala en Costa Rica, el peso específico al 12% dio valores dentro del rango de 0,46 a 0,57, con un promedio de 0,51. Mediante este valor dicha madera puede ser considerada como moderadamente pesada (Rivero y Moya, 2006).

El contenido de humedad verde (Figura 22) y densidad verde (Figura 21) reportado en este estudio fue de 121,07 hasta 159,14% y 1,04 g/cm³ 1,13 g/cm³ mientras que los reportados por Moya y Marín (2011), en clones de 11 años de edad fue 89,8% hasta 158,0 % y de 1,0 g/cm³ a 1,2 g/cm³.

Se debe tener en cuenta, que el peso específico del árbol de teca aumenta conforme el crecimiento de los árboles en plantaciones de altas densidades de siembra (Moya, Pérez y Arce, 2003). Como lo menciona León (2010), el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de la madera pueden estar determinadas por el

peso específico, catalogándola como una característica relevante. Castro y Raigosa (2000), encontraron valores para peso específico básico de 0,58, mientras que Moya, Pérez y Arce (2003), en otro estudio reportaron 0,40, por lo que, el peso específico básico que se obtuvo en esta investigación está dentro del rango, ya que los valores varían de 0,41 a 0,50.

En otros estudios provenientes de una plantación de teca de ocho años de edad en Cochabamba, Bolivia, también muestran valores de 0,50 (Rivero y Moya, 2006). Según Arce (2013), es importante enfatizar que aquellos clones que presenten un alto peso específico básico probablemente presenten mayor resistencia mecánica, algunas operaciones de trabajabilidad adecuadas y mayor durabilidad. Así, los clones 24e, 4c y 5x presentan los valores más altos de peso específico y al mismo tiempo los valores más bajos de contenido de humedad verde, repercutiendo en menos problemas en labores del secado.

El análisis de color realizado en los árboles de 4,5 años puede compararse con los valores encontrados cuando los árboles presentaban 11 años, ya que Moya y Marín (2011), reportaron valores de color promedio para L^* de 62,0, para valores de a^* de 9,9 y para valores de b^* de 29,5. Aunque son diferentes a los encontrados en este estudio (Figura 25) 61,71, (Figura 26) 9,08 y (Figura 27) 21,21 respectivamente. Al comparar dichos valores se observa que el parámetro de color L^* y a^* disminuyeron ligeramente, el parámetro b^* también disminuyó considerablemente. Dichas variaciones en los parámetros de color explican que la luminosidad de los clones disminuyó junto con la tonalidad del color amarillo, por lo tanto, el color es ligeramente más claro que los árboles a la edad de 11 años. Moya y Berrocal (2010), concluyen en su estudio que, al haber una disminución en el valor de L^* e incremento del valor b^* el color del duramen tiende a ser más oscuro, esto se da conforme el árbol envejece.

Cabe resaltar que, los coeficientes de variación de los parámetros de luminosidad (L^*), rojo (a^*) y amarillo (b^*) (Figura 25, 26 y 27), muestran valores bajos y elevados para diferentes clones. Sin embargo, los coeficientes de variación aumentan para el

cambio de color ΔE (Figura 28), en este caso el coeficiente de variación llega hasta un valor de 67% para el clon 23p. Esto indica que los clones son poco variables para los valores de L^* , a^* y b^* pero un poco más variables con respecto a la percepción de color respecto al patrón.

Se debe tener en cuenta que el cambio de color (ΔE) respecto al patrón de color de teca, debe ser un valor bajo. En este estudio los clones como 51p, 33p, 8c, 33e y 30c presentan los valores más bajos de ΔE , debido a los bajos valores de luminosidad (L^*), altos en rojo (a^*) y valores medios a bajos en amarillo (b^*), como resultado colores más oscuros. La madera con tonalidades más rojas (bajos valores a^*) y bajos valores de luminosidad (altos valores b^*) producen colores más oscuros (Moya y Berrocal 2010), dando como resultado probablemente madera visualmente atractiva para el usuario final (Arce, 2013).

Cui, Kamdem, y Rypstra (2007), definen la percepción del color en diferentes niveles. Valor de cambio entre 0 y 0,5 lo define como imperceptible; entre 0,5 y 1,5 es poco perceptible; entre 1,5 y 3 es notable; entre 3 y 6 es perceptible y entre 6 y 12 es muy perceptible. Teniendo en cuenta lo anterior, para todos los clones, los cambios respecto al patrón son superior a 12, por tanto, los clones estudiados presentan cambios considerados perceptibles respecto al color natural de la teca en hábitats naturales. Así, para que los clones analizados en este estudio, aún se encuentran lejos de tener el color natural de la madera de teca de acuerdo del color patrón.

Análisis de correlación

Como lo estudió Moya, Marín, Murillo y Obando (2010), muchas de las características de la madera, pueden estar muy relacionadas entre ellas, sin embargo, al igual que en esta investigación el porcentaje de duramen no presentaron correlaciones significativas con el peso específico básico, aunque sí presentó una correlación significativa con el porcentaje de corteza (Cuadro 9).

Hannrup et al. (2004), cita que la baja correlación genética existentes entre los parámetros morfológicos y propiedades físicas de la madera en edades tempranas, puede explicarse por la presencia de madera juvenil, repercutiendo en que las correlaciones se vean afectadas (Montes, Beaulieu y Hernández, 2007; Kumar, Jayawickrama, Lee y Lausberg 2002).

Parámetros genéticos de las propiedades de la madera

Cabe subrayar que los estudios relacionados con parámetros genéticos en las propiedades de la madera son escasos, y la mayor parte solo se enfocan a las variables más comunes y de fácil medición (Callister y Collins, 2008). Además se llevan a cabo en árboles con edades próximas a su aprovechamiento comercial (Montes, Beaulieu y Hernández, 2007), por otro lado, Pande y Singh (2005), mencionan que las propiedades de la madera sufren cambios significativos entre clones.

En los estudios de Callister y Collins (2008) y Solórzano (2010), realizados en *T. grandis* a los 3,5 y 4 años, se encontraron heredabilidades similares al encontrado en este estudio respecto a la variable diámetro (0,36 y 0,37). En cuanto a la variable duramen, existen pocos estudios genéticos que lo respaldan (Moya, Marín Murillo y Leandro 2010; Murillo y Badilla 2009), sin embargo, se obtuvo el valor más elevado de heredabilidad con 0,37, siendo mayor al presentado por Solórzano (2010) y Murillo y Badilla (2009), donde el valor no pasó de 0,30, eso puede estar atribuido a la cantidad de árboles que se emplearon en cada estudio (Solórzano, 2010), cabe resaltar que este es uno de los parámetros más importantes comercialmente (Callister y Collins, 2008).

Según Tawara (1996), se debe considerar que los pocos años de edad de un ensayo clonal, podría ser la causa que afecte el desarrollo y la expresión del potencial del material genético, ya que puede verse como una edad muy temprana para observar las diferencias significativas, por lo tanto, a pesar del presente estudio y los realizados por Callister y Collins (2008) y Solórzano (2010), no es posible

establecer controles genéticos sobre propiedades generales y físicas de los árboles. En estudios realizados en teca a edades superiores a los 10 años por Moya, Marín, Murillo y Leandro (2010) y Murillo y Badilla (2009), se han encontrado valores de heredabilidad más estables en diferentes propiedades de la madera.

CONCLUSIONES

Los clones 9x, 30e, 11c, 26e y 3x son los que presentan los mejores valores en diámetro, con lo que respecta a porcentaje de duramen, los clones con mayores valores son 55e, 22x, 27e, 20e y 9x, además, presentando los valores más bajos de espesor de albura. Los clones que presentaron los menores valores de porcentaje de corteza son 49x, 3x, 27e, 9x y 30c. El porcentaje de duramen en teca es una de las características de la madera más importante para la comercialización de esta especie por lo que, al realizar el manejo adecuado de las plantaciones se debe buscar de producir grandes diámetros y altos volúmenes.

Los clones 24e, 4c y 5x presentan los valores más altos de peso específico y al mismo tiempo los valores más bajos de contenido de humedad verde, lo que conlleva a determinar un alto rendimiento en labores de secado y por ende de aserrío.

Los 46 clones junto con los 2 testigos analizados en este estudio, presentan diferencias significativas respecto al color natural del duramen de los árboles de teca. Se debe tener en cuenta que los clones con 4,5 años de edad presentan un color más claro que el color patrón, producto de la disminución de la luminosidad (L^*) y disminución de los tonos amarillos (b^*) y rojos (a^*). Sin embargo, se le puede otorgar diferentes usos comerciales a la madera, esperando que conforme aumente la edad de los clones, el color sea más semejante al de los árboles en su hábitat natural.

El cambio de color (ΔE) respecto al patrón de color de teca, es recomendable un valor bajo. En este estudio, se puede destacar a los clones 51p, 33p, 8c, 33e y 30c. Estos presentaron los valores más bajos de ΔE , debido a los bajos valores de luminosidad (L^*), altos en rojo (a^*) y valores medios a bajos en amarillo (b^*), repercutiendo en colores más oscuros, dando como resultado madera visualmente atractiva para el usuario final (Moya y Berrocal, 2010).

La variable PEB a los 2,5 m de altura del árbol, estuvo más correlacionada significativamente con las demás variables. En cuanto al diámetro, esta presentó

una correlación fuerte con duramen además fue inversamente proporcional con el espesor de corteza.

Se encontró diferencias significativas dentro de clones, aunque dentro de los bloques hubo diferencias significativas, estas fueron en menor cantidad.

VARIABLES COMO DIÁMETRO, DURAMEN, PORCENTAJE DE DURAMEN, ALBURA, PEB Y EL PARÁMETRO DE COLOR a^* , PRESENTARON VALORES DE HEREDABILIDADES SUPERIOR A 0,3. MIENTRAS QUE, PROPIEDADES COMO LA CORTEZA, PE12%, CONTENIDO DE HUMEDAD VERDE, DENSIDAD VERDE, ΔE PRESENTARON VALORES DE HEREDABILIDAD BAJOS, MENOR A 0,3, ESTOS SON RELEVANTES PARA EL CONTROL GENÉTICO.

BIBLIOGRAFÍA

- Arce, N. (2013). Determinación de propiedades generales, físicas y de color para 20 clones de *Tectona grandis* en la zona de Peñas Blancas Guanacaste, Costa Rica.
- Bhat, K., Priya, P., y Rugmini, P. (2001). Characterisation of juvenile wood in teak. *Wood Science and Technology*, 34(6), 517-532.
- Callister, A., y Collins, S. (2008). Genetic parameter estimates in a clonally replicated progeny test of teak (*Tectona grandis* Linn. f.). *Tree Genetics y Genomes*, 4(2), 237.
- Castro, F., y Raigosa, J. (2000). Crecimiento y propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis*) de 17 años de edad en San Joaquín de Abangares, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 24(2).
- Cui, W., Kamdem, P., y Rypstra, T. (2007). Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy (DRIFT) and color changes of artificial weathered wood. *Wood and Fiber Science*, 36(3), 291-301.
- Flórez, J., Trugilho, P., Lima, J., Hein, P., y Silva, J. (2014). Caracterización de la madera joven de *Tectona grandis* L. f. plantada en Brasil. *Madera y Bosques*, 20, 11-20.
- Fonseca, W. (2004). Manual para productores de teca (*Tectona grandis* L. f) en Costa Rica. Heredia, Costa Rica.
- Giraldo, C., Diana, L., Nieto, R., Victor, M., Sarmiento, M., y Borralho, N. (2014). Estimación indirecta de la densidad de la madera mediante el uso de Pilodyn en la selección de clones de *Eucalyptus pellita* F. Muell. *Colombia Forestal*, 17(2), 181-192.
- Goh, D., Chaix, G., Baillères, H., y Monteuis, O. (2007). Mass production and quality control of teak clones for tropical plantations: The Yayasan Sabah Group and CIRAD Joint Project as a case study. *Bois et forêts des tropiques*(293), 65-77.
- Hannrup, B., Cahalan, C., Chantre, G., Grabner, M., Karlsson, B., Bayon, I. L., . . . Rodrigues, J. C. (2004). Genetic parameters of growth and wood quality traits in *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(1), 14-29.

- Holdridge, L. (1987). Ecología basada en zonas de vida. San José, Costa Rica.
- Hunterlab. (1995). Use measurement of appearance. A Welly-Interscience publication, Welly and Sond, New York.
- Imaña, J., y Encinas, O. (2008). Epidometria forestal. Universidade de Brasília, departamento de Engenharia Florestal. Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales.
- Inc, S. I. (2001). SAS Campus Drive, Cary, North Carolina 27513.
- ITTO. (2004). Perspectivas para la teca de plantaciones. *Actualidad Forestal Tropical*, V. 12(No. 1).
- Jett, J. (1995). Genetics of Wood Production: Springer-Verlag, Berlin.
- Kokutse, A., Bailleres, H., Stokes, A., y Kokou, K. (2004). Proportion and quality of heartwood in Togolese teak (*Tectona grandis* Lf). *Forest Ecology and Management*, 189(1), 37-48.
- Kumar, S., Jayawickrama, K., Lee, J., y Lausberg, M. (2002). Direct and indirect measures of stiffness and strength show high heritability in a wind-pollinated radiata pine progeny test in New Zealand. *Silvae Genetica*, 51(5-6), 256-261.
- Latif, M., y Younus, B. (1981). Pressure treatment of teak poles with nail-borne preservative. *Bano Biggyan Patrika*, 10, 27-32.
- León, W. (2010). Anatomía y densidad o peso específico de la madera. *Revista Forestal Venezolana*, 1(054).
- Montes, C., Beaulieu, J., y Hernández, R. (2007). Genetic variation in wood mechanical properties of *Calycophyllum spruceanum* at an early age in the Peruvian Amazon. *Wood and Fiber Science*, 39(4), 578-590.
- Monteuuis, O., y Maître, H. (2006). Los últimos avances realizados en la clonación de teca permiten mejorar la calidad del material de plantación, OIMT *Actualidad Forestal Trop* 2006.
- Moya, R. (2001). Características de la madera de Teca (*Tectona grandis*) de 5, 7 y 9 años de edad creciendo en el Atlántico de Costa Rica. Paper presented at the Congreso Forestal Centroamericano (4to, Managua, NI). Resúmenes de ponencias, Managua, NI.

- Moya, R. (2002). Influencia de la edad del cambium, tasa de crecimiento y nivel de precipitación sobre la densidad básica de la teca en Costa Rica. *Madera y Bosques*, 8(1).
- Moya, R., Arce, V., Gonzalez, E., Olivares, C., y Rios, V. (2010). Efecto de las propiedades físicas y químicas del suelo en algunas propiedades de la madera de teca (*Tectona grandis*). 34(6).
- Moya, R., y Berrocal, A. (2010). Wood colour variation in sapwood and heartwood of young trees of *Tectona grandis* and its relationship with plantation characteristics, site, and decay resistance. *Annals of Forest Science*, 67(1), 109.
- Moya, R., y Marín, J. (2011). Grouping of *Tectona grandis* (Lf) clones using wood color and stiffness
- Moya, R., Marin, J., Murillo, O., y Leandro, L. (2010). Genetic study of several physical properties, wood color, decay resistance and stiffness of *Tectona grandis* clones. *Tree Genet Genom* (submitted).
- Moya, R., Marin, J., Murillo, O., y Leandro, L. (2013). Wood physical properties, color, decay resistance and stiffness in *Tectona grandis* clones with evidence of genetic control. *Silvae Genetica*, 62(3), 142-152.
- Moya, R., y Marín, J. (2011). Grouping of *Tectona grandis* (Lf) clones using wood color and stiffness. *New forests*, 42(3), 329-345.
- Moya, R., Pérez, L., y Arce, V. (2003). Wood density of *Tectona grandis* at two plantation spacings in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Products*, 9(1/2), 153-161.
- Moya, R., y Tenorio, C. (2013). Características de combustibilidad de diez especies de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 10(24), 26-33.
- Murillo, O., y Badilla, Y. (2004). Calidad y valoración de plantaciones forestales. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica.

- Murillo, O., y Badilla, Y. (2009). Mejora genética de la teca: avances y tendencias en los últimos 10 años. En: I Congreso Internacional del Cultivo de teca. Universidad de Quevedo, Ecuador. 16-17 de setiembre, 2009.
- Murillo, O., Obando, G., Badilla, Y., y Araya, E. (2001). Estrategia de mejoramiento genético para el Programa de Conservación y Mejoramiento Genético de Especies Forestales del ITCR/Fundecor, Costa Rica. *Revista Forestal Latinoamericana* (Venezuela). 16 (30). 275-285.
- Ortiz, E., y Cordero, S. (2014). Atlas Digital de Costa Rica. CD-ROM. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Pande, P., y Singh, M. (2005). Inter-clonal, intra-clonal, and single tree variations of wood anatomical properties and specific gravity of clonal ramets of *Dalbergia sissoo* Roxb. *Wood Science and Technology*, 39(5), 351-366.
- Pérez, L., y Kanninen, M. (2003). Heartwood, sapwood and bark content, and wood dry density of young and mature teak (*Tectona grandis*) trees grown in Costa Rica. *Silva Fennica.*, 37(1), 45-54.
- Quirós, R., Chinchilla, O., y Gómez, M. (2005). Rendimiento en aserrío y procesamiento primario de madera proveniente de plantaciones forestales. *Agronomía Costarricense*, 29(2).
- Resende, M. (2007). SELEGEN-REML/BLUP: Sistema Estatístico e Seleção Genética Computadorizada (Software). Brasilia, Brasil: EMBRAPA.
- Rivero, J., y Moya, R. (2006). Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F.(teca), proveniente de una plantación de ocho años de edad en Cochabamba, Bolivia. *Kurú Revista Forestal*, 3(9), 1-14.
- Solórzano, S. (2010). Evaluación a los 4 años de edad de variables dasométricas, calidad del fuste y propiedades de la madera en clones de *Tectona grandis* L., Los Chiles, Costa Rica. (Licenciatura en Ingeniería Forestal), Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Tawara, C. S. (1996). Variação clonal de melina (*G. arborea* Roxb) na Costa Rica Clonal variation of *Gmelina arborea* Roxb. in Costa Rica: CATIE, Turrialba (Costa Rica).

- Thulasidas, P., Bhat, K., y 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.
- Villalobos, R., Jiménez, E., Hernández, K., Córdova, J., y Solano, P. (2013). Descripción del clima. Cantón de Upala. Costa Rica.
- Viquez, E., y Pérez, D. (2005). Effect of pruning on tree growth, yield, and wood properties of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Silva Fennica*, 39(3), 381.
- Zobel, B., y Sprague, J. (2012). Juvenile wood in forest trees.
- Zobel, B., y Talbert, J. (1984). Applied forest tree improvement: John Wiley y Sons.