

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

**PROPIEDADES, SECADO, TRABAJABILIDAD Y CONTROL
GENÉTICO DE LA MADERA DE NUEVE CLONES DE *Swietenia
macrophylla* DE 8 AÑOS, SARAPIQUÍ, COSTA RICA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON EL GRADO
ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

MAUREEN MICHEL ABARCA ALVARADO

CARTAGO, COSTA RICA, 2021

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

**PROPIEDADES, SECADO, TRABAJABILIDAD Y CONTROL
GENÉTICO DE LA MADERA DE NUEVE CLONES DE *Swietenia
macrophylla* DE 8 AÑOS, SARAPIQUÍ, COSTA RICA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON EL GRADO
ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

MAUREEN MICHEL ABARCA ALVARADO

CARTAGO, COSTA RICA, 2021

Propiedades, secado, trabajabilidad y control genético de la madera de nueve clones de *Swietenia Macrophylla* de 8 años, Sarapiquí, Costa Rica

Properties, drying, workability and genetic control of nine-clone wood the 8 year old *Swietenia Macrophylla*, Sarapiquí, Costa Rica

Maureen Michel Abarca Alvarado *

RESUMEN

Swietenia macrophylla es una especie forestal con alto valor comercial en el mercado nacional e internacional, su madera se destaca por la belleza y la alta durabilidad. En los últimos años ha formado parte de programas de mejoramiento genético en Costa Rica, con el fin de aumentar la rentabilidad del cultivo, mejorando la forma de los árboles y la resistencia a plagas y enfermedades. El presente estudio detalla información de las propiedades morfológicas, físicas, mecánicas, de secado, aserrío y trabajabilidad de madera proveniente de plantaciones clonales. La variación de las propiedades con respecto a la altura mostro que el porcentaje de duramen disminuye y el porcentaje de albura aumenta conforme el crecimiento de los árboles. El clon 115 mostró el mejor peso específico básico, a su vez, obtuvo el mejor comportamiento en las pruebas mecánicas realizadas, con excepción del módulo de elasticidad. Las contracciones evaluadas presentan valores bajos para la mayoría de los clones. En el proceso de secado y aserrío, la incidencia de los defectos fue baja, aumentando las rajaduras, acanaladura y alabeo después del secado. Además, todos los clones presentaron buen comportamiento en las pruebas de trabajabilidad. Finalmente, los parámetros genéticos evaluados muestran una alta heredabilidad media del clon, resaltando nuevamente las variables de peso específico y propiedades mecánicas lo que permite inferir la buena calidad de los programas de mejoramiento genético. Los resultados anteriores indican que los clones evaluados tienen características óptimas para ser utilizados en la reforestación comercial en Costa Rica debido a la alta calidad que presenta su madera.

Palabras clave: Control genético, secado, propiedades, trabajabilidad de la madera.

ABSTRAC

Swietenia macrophylla is a forest species with high commercial value in the national and international market, its wood stands out for its beauty and high durability. In recent years, it has been part of genetic improvement programs in Costa Rica, in order to increase crop profitability, improving tree shape and resistance to pests and diseases. This study details information on morphological, physical, mechanical, drying, sawdy and wood workability from clonal plantations. The variation in properties, with respect to height, showed that the percentage of duramen decreases and the percentage of alburnum increases as trees grow. Clone 115 showed the best basic specific weight and at the same time, obtained the best performance in the mechanical tests performed, with the exception of the elasticity module. The contractions evaluated have low values for most clones. In the drying and sawing process, the incidence of defects was low, increasing cracks, groove and roll after drying. In addition, all clones showed good behavior in the workability tests. Finally, the genetic parameters evaluated show a high average heredability of the clone, highlighting again the variables of specific weight and mechanical properties which allows to infer the good quality of genetic improvement programs. The above results indicate that the clones evaluated have optimal characteristics to be used in commercial reforestation in Costa Rica due to the high quality presented by its wood.

Keywords: Genetic control, drying, properties, wood workability.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional.

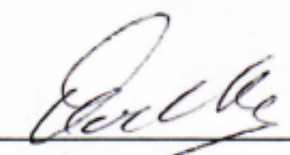
*M. Abarca, “Propiedades, secado, trabajabilidad y control genético de la madera de nueve clones de *Swietenia Macrophylla* de 8 años, Sarapiquí, Costa Rica”, Tesis de Licenciatura, Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 2021.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

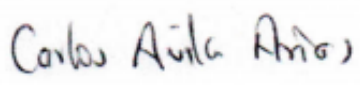
Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por Dr. Róger Moya Roque, M.Sc. Carolina Tenorio Monge, Lic. Orlando Chinchilla Mora y M.Sc. Carlos Ávila Arias como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Dr. Róger Moya Roque
Director de tesis


M.Sc. Carolina Tenorio Monge
Lector



Lic. Orlando Chinchilla Mora
Lector



M.Sc. Carlos Ávila Arias
Lector



Maureen Michel Abarca Alvarado
Estudiante

Dorian Carvajal Vanegas
Coordinador Trabajos Finales de Graduación

DEDICATORIA

A Dios por ser mi fuerza y mi guía.

A mi mamá Maureen Alvarado Molina por su apoyo, amor incondicional y ser mi mayor motivación.

A mi ángel en el cielo Arnoldo Alvarado Quirós por confiar en mí y cuidarme en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá, mis hermanos, mis sobrinos y a Luis Diego por ser un pilar fundamental en este proceso.

A mi tutor Róger Moya Roque por la paciencia y el apoyo que me brindo durante este proceso y a todo el equipo del Laboratorio de Biomateriales del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) por la asistencia que me brindaron.

Al tribunal evaluador Carolina Tenorio Monge, Orlando Chinchilla Mora y Carlos Ávila Arias por confiar en mí y brindarme la oportunidad de desarrollar mi Trabajo Final de Graduación en esta área.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Forestal por la paciencia y el conocimiento brindado todo este tiempo. Agradezco a muchos de ellos por sus consejos y por brindarme su apoyo cuando más lo necesite.

A cada uno de mis amigos por sus consejos e impulsarme a seguir adelante. Especialmente a Adriana, Ana Lucía y Monserrath por estar conmigo en las buenas y en las malas y apoyarme tanto emocional como académicamente.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRAC	ii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INTRODUCCIÓN	1
MATERIAL Y MÉTODOS	3
Sitio de estudio	3
Descripción y establecimiento del ensayo.....	3
Manejo del ensayo	4
Estudio de propiedades de la madera	4
Muestreo dentro del árbol.....	5
Propiedades morfológicas.....	6
Propiedades físicas y mecánicas.....	6
Proceso de secado y aserrío	8
Propiedades de trabajabilidad.....	9
Análisis estadístico	9
RESULTADOS	10
Propiedades morfológicas.....	10
Propiedades físicas	12
Propiedades mecánicas	16
Proceso de secado y aserrío	17
Propiedades de trabajabilidad.....	19
Análisis genético.....	21
DISCUSIÓN	23
CONCLUSIONES	29
RECOMENDACIONES	30
REFERENCIAS	31

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Parámetros dasométricos de clones de <i>Swietenia macrophylla</i> , Sarapiquí, Costa Rica.	5
Cuadro 2. Propiedades morfológicas al DAP para cada uno de los genotipos de <i>Swietenia macrophylla</i> .	11
Cuadro 3. Propiedades físicas al DAP según genotipos de <i>Swietenia macrophylla</i> .	13
Cuadro 4. Densidad real de los genotipos de <i>Swietenia macrophylla</i> mediante el método de rayos x.	15
Cuadro 5. Diferencia del color de duramen en los diferentes genotipos de <i>Swietenia macrophylla</i> .	16
Cuadro 6. Propiedades mecánicas de <i>Swietenia macrophylla</i> por genotipo.	17
Cuadro 7. Defectos de la madera en clones de <i>S. macrophylla</i> ubicados en Sarapiquí, Costa Rica.	18
Cuadro 8. Propiedades de trabajabilidad de la madera de 9 genotipos de <i>Swietenia macrophylla</i> .	20
Cuadro 9. Parámetros genéticos de las propiedades de la madera en genotipos de <i>Swietenia macrophylla</i> , Sarapiquí, Costa Rica.	21
Cuadro 10. Ranking y estabilidad genética para las propiedades de la madera analizadas entre clones de <i>Swietenia macrophylla</i> en Sarapiquí, Costa Rica.	22

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de plantación clonal de <i>Swietenia macrophylla</i> , Sarapiquí, Heredia, Costa Rica.	3
Figura 2. Muestreo de árboles (A), medidas morfológicas (B) y determinación de propiedades físicas y contracciones (C-D).	6
Figura 3. Variación de las características morfológicas a diferentes alturas según clones de <i>Swietenia macrophylla</i> en Sarapiquí, Costa Rica.	12
Figura 4. Variación de propiedades físicas a) peso específico básico, b) contenido de humedad y c) densidad verde a diferentes posiciones de la altura comercial.	14

INTRODUCCIÓN

Costa Rica presenta una alta variabilidad de condiciones ambientales a lo largo del país, lo que permite la reforestación con gran cantidad de especies forestales [1]. Estas especies abastecen la demanda de madera mediante plantaciones forestales [2]. A través de los años se han realizado estudios con diversas especies como, por ejemplo, *Tectona grandis* (teca) y *Gmelina arborea* (melina), *Acacia mangium* (acacia), *Dipteryx panamensis*. (almendro), *Vochysia ferruginea* (botarama), *Cupressus lusitanica* (ciprés) entre otros [2]- [3]. Actualmente, las especies más utilizadas en la reforestación son la *Gmelina arborea* y *Tectona grandis*, esta última dominando la actividad de la reforestación en el país [4].

Años atrás algunas especies maderables de bosque natural, debido a la belleza de su madera, fueron utilizadas por la industria forestal, lo que provocó que disminuyeran las poblaciones naturales de ciertas especies, llegando muchas de ellas a ser categorizadas en peligro o especies vedadas en nuestro país [5]. Entre estas especies destaca *Swietenia macrophylla* (caoba), la cual su madera se caracteriza por tener un alto valor comercial en el mercado nacional e internacional [6], siendo apreciada dada la alta durabilidad y excelente calidad [7]. Esta madera es empleada en puertas, ventanas, acabados de interiores, artesanías, madera contrachapada, muebles de alta calidad, ebanistería, paneles, pisos, carrocerías de automóviles, molduras interiores de barcos, armarios de radio y fonógrafos, cuerpos de instrumentos musicales, entre otros [8]-[9].

Años atrás la comercialización de la especie tuvo gran auge y en la actualidad, en el mercado internacional ha disminuido considerablemente [10]. Cabe destacar que, esta especie se encuentra en el Apéndice II de CITES [11], en donde se caracteriza por tener un comercio estrictamente controlado. Además, en Costa Rica tiene veda total de su aprovechamiento [12].

A nivel mundial, la especie crece naturalmente en varios países del mundo, sin embargo, el estado actual de las poblaciones de *S. macrophylla* ha disminuido en las áreas naturales. Actualmente está casi extinta en Ecuador, Colombia, Panamá y Costa Rica, cerca de la extinción en Bolivia, disminuyendo en México, Belice y Brasil y con un fuerte declive en Guatemala Perú, Nicaragua y Honduras [13].

En Costa Rica se puede cultivar desde el nivel del mar hasta los 1300 msnm, tanto en zonas de baja precipitación como zonas de alta precipitación [6]. Ha sido introducida y utilizada como especie de reforestación, se puede encontrar asociada a diferentes cultivos en sistemas

agroforestales y en plantaciones puras que se han establecido como ensayos clonales ubicados en las provincias de Heredia, San José, Limón y Guanacaste [6]- [14].

En la reproducción de las plántulas, pueden ser obtenidas por siembra directa de semilla, raíz desnuda, en pseudoestacas, incluso actualmente se puede propagar in vitro e injertos [14]- [15]. En este sentido, los programas de mejoramiento genético aplicado a caoba u otras especies han tenido un rol importante [16]. En este se puede aumentar la rentabilidad del cultivo mejorando la forma de los árboles, su productividad, el color de la madera, las propiedades físicas y mecánicas, y la resistencia a plagas y enfermedades [17].

S. macrophylla, ha formado parte de algunos programas de mejoramiento genético de varias instituciones de Costa Rica como el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y el Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR) de la Universidad Nacional de Costa Rica [6]. Los resultados han mostrado clones con buen crecimiento del fuste y adecuados porcentajes de supervivencia [6]. Además, las trozas de los árboles provenientes de plantaciones forestales muestran un buen desempeño en el aserrío de trozas, un secado rápido y buena trabajabilidad [18].

A pesar de que existen estudios relacionados con las propiedades de *S. macrophylla*, la información disponible sobre las propiedades y el comportamiento ante procesos industriales se limita a pocos estudios, lo cual restringe el uso de la madera [1]-[19]. Además, cabe recalcar que estos estudios llevados a cabo en Costa Rica no consideran madera de plantaciones clonales. Por lo que nace la necesidad, de generar conocimiento en relación con el desempeño de clones de *S. macrophylla* en plantaciones mejoradas, como los ensayos establecidos en la región del trópico húmedo de Costa Rica. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar las propiedades, el secado, la trabajabilidad y el control genético en madera de *S. macrophylla* de nueve genotipos provenientes de una plantación de ocho años genéticamente mejorada. El contar con esta información permitirá optimizar los rendimientos en procesos industriales de tal forma que su madera pueda ser utilizada de manera sostenible por diferentes productores a mediano y largo plazo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Sitio de estudio

La plantación con los diferentes clones se ubica en Sarapiquí, Heredia, Costa Rica ($10^{\circ}18'56.5''$ N y $-83^{\circ}55'13.9''$ O) (Figura 1). Pertenece a la zona de vida Bosque Muy Húmedo Tropical [20]. Dicha zona presenta una altitud de 68 msnm, una temperatura media y precipitaciones que oscilan entre $20,3^{\circ}\text{C} - 30,3^{\circ}\text{C}$ y 4000-5000 mm respectivamente [21]. El sitio presenta una pendiente leve, de 0% hasta 8% y el tipo de suelo es del orden inceptisol, caracterizado por tener un pH ácido y un alto contenido de materia orgánica [22].

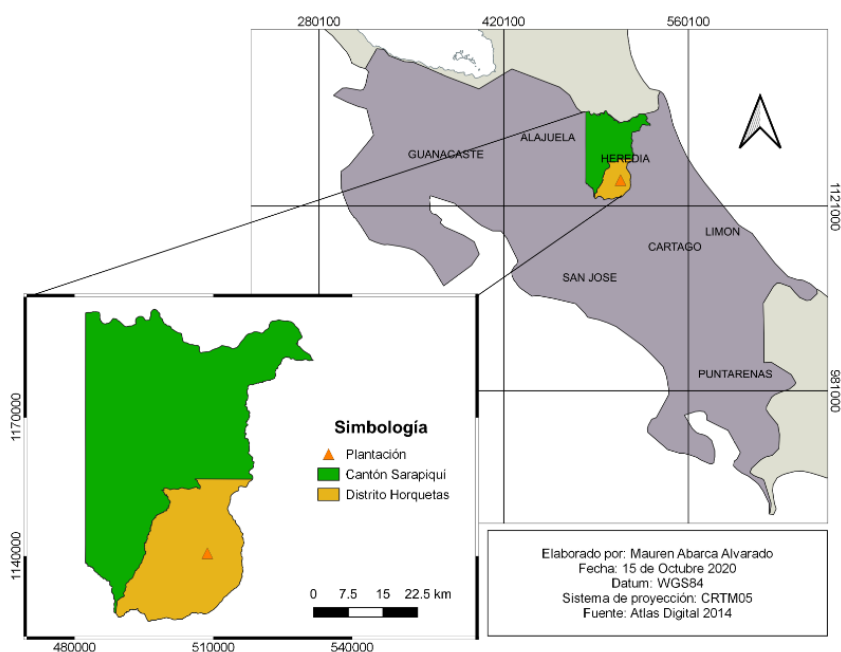


Figura 1. Ubicación geográfica de plantación clonal de *Swietenia macrophylla*, Sarapiquí, Heredia, Costa Rica.

Descripción y establecimiento del ensayo

El ensayo se estableció en agosto del 2012, utilizando clones con procedencia de Bolivia y Costa Rica. En el momento de realizar la evaluación de la madera, esta presentaba una edad de 8 años. En el establecimiento inicial, de una colección de 308 genotipos de la especie *S. macrophylla*, se plantaron 26, nueve repeticiones por clon, para una densidad inicial de 234 árboles en total. Se utilizó un diseño de siembra en zig-zag con un distanciamiento entre árboles de 3x3 metros.

Manejo del ensayo

En relación con el manejo de la plantación, se han realizado varias aplicaciones de fertilizante: en Setiembre del 2012 se aplicó Osmocote, un fertilizante químico en forma de granulo con igual concentración de nitrógeno, fósforo y potasio; este fertilizante se aplicó a razón de 10 gramos por árbol y una vez aplicado se libera gradualmente mediante un proceso de Osmosis. En diciembre del primer año se aplicó otro fertilizante químico en una concentración de 10-30-10 de nitrógeno, fosforo y potasio respectivamente a razón de 30 gramos por árbol. En agosto 2013, un año después de establecido, se aplicó nuevamente fertilizante 10-30-10 a razón de 30 gramos por árbol. Asimismo, para finales de agosto 2012 y febrero 2014 se han aplicado cinco rodajeas y tres limpiezas del sitio, con el fin de eliminar la vegetación no deseable y la competencia que se genera en los primeros años de crecimiento. A su vez, en el año 2017 se realizó un raleo a una intensidad de 50%. En agosto y setiembre del 2013 se realizó una aplicación de herbicida para el control de la maleza. Además, al año 1 hubo un ataque de *Hypsipyla grandella*, donde se realizó la eliminación manual del barrenador y se practicaron podas de formación con el fin de establecer un tronco fuerte. Seguidamente, se aplicó Cypermethrin (insecticida peretroide) a razón de un ml por cada litro de agua cada 15 días con prioridad en las hojas nuevas, con el objetivo de controlar las diferentes plagas que podrían presentarse.

Estudio de propiedades de la madera

Selección de clones: de los 26 genotipos establecidos en la plantación, nueve de ellos se encuentran dentro de los 15 mejores clones de acuerdo como a estudios realizados por el Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR) de la Universidad Nacional de Costa Rica, considerando variables como la tasa de crecimiento, resistencia a plagas y enfermedades, longitud y forma de fuste. Estos nueve, representan los clones utilizados para el presente estudio. La selección de los árboles muestreados se realizó según la rectitud y el vigor de cada árbol.

Muestreo: se realizó la selección de 18 árboles en total, dos por clon. En cada árbol se midió el diámetro a la altura del pecho (D_p) y altura total (h_T); una vez volteado el árbol se determinó la altura comercial (h_C), la altura de la primera rama (h_R) y la altura máxima a la cual está presente el duramen (h_D). El cuadro 1 muestra los parámetros dasométricos de cada uno de los árboles utilizados en este estudio.

Cuadro 1. Parámetros dasométricos de clones de *Swietenia macrophylla*, Sarapiquí, Costa Rica.

Fila	Clon	Dap (cm)	h _T (m)	h _C (m)	h _R (m)	h _D (m)
1	4	13,70	12,70	5,85	5,85	-
2	1	16,10	12,80	6,80	5,00	-
2	5	12,60	12,10	3,40	3,60	-
3	13	14,40	10,70	4,45	3,65	-
4	6	20,10	15,90	7,30	-	8,00
5	4	12,10	9,80	3,40	3,15	-
3	2	15,80	13,80	5,05	-	-
8	115	16,00	12,40	6,60	5,00	8,65
8	79	12,60	9,90	6,30	2,30	7,30
8	6	14,70	12,90	5,10	2,50	8,90
9	207	17,90	13,70	6,90	5,10	11,10
9	1	17,40	14,60	5,80	3,70	7,90
9	5	14,70	13,75	6,65	4,30	7,10
9	115	15,20	11,80	5,40	-	-
10	2	12,20	14,20	5,70	3,90	-
10	13	15,00	10,60	4,10	3,00	-
10	79	13,90	12,90	5,80	2,60	-
11	207	13,30	11,70	4,95	4,15	5,80

Nota: - Altura de primera rama no estaba presente y altura máxima de duramen coincidía con la altura comercial.

Muestreo dentro del árbol

De cada árbol muestreado, fueron cortadas secciones transversales de aproximadamente 2 cm de espesor en la base del árbol, a 1,30 m de la base (DAP), al 25%, al 50%, 75% y 100% de la altura comercial (Figura 2) y dos o tres trozas con diámetro mayor a 10 cm. Es importante mencionar que, por la altura de los árboles, el disco al 25% de la altura comercial, correspondió a un segundo disco tomado a la altura del dap. Las secciones transversales se utilizaron para la determinación de propiedades físicas y morfológicas; y las trozas para el análisis de propiedades mecánicas, secado y trabajabilidad.

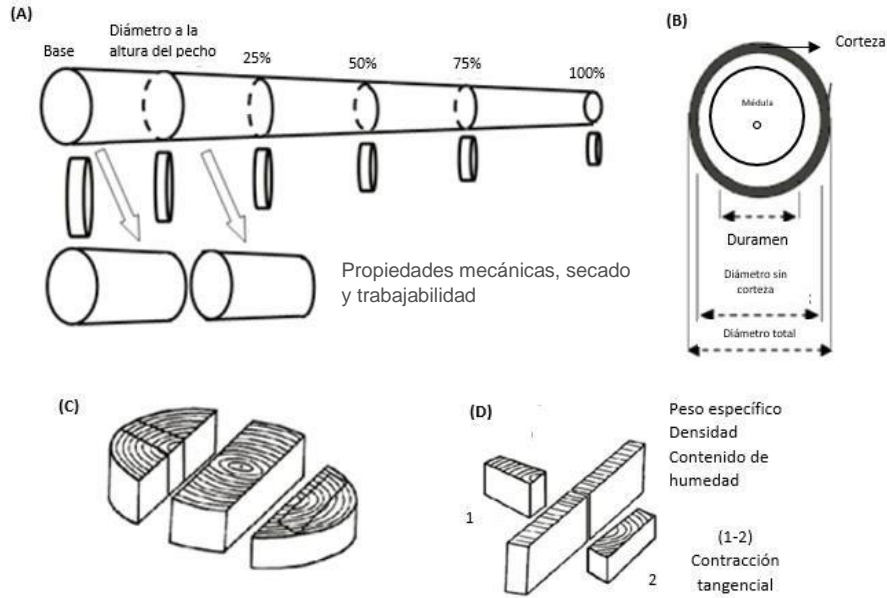


Figura 2. Muestreo de árboles (A), medidas morfológicas (B) y determinación de propiedades físicas y contracciones (C-D). [3].

Propiedades morfológicas

En cada sección transversal se dibujó una línea en dirección norte-sur y otra perpendicular a esta en dirección este-oeste, ambas pasando por el centro de la médula. En estas dos direcciones, se midió el diámetro total, el diámetro sin corteza y el diámetro del duramen. De acuerdo con estas mediciones, se calculó el diámetro total, diámetro sin corteza, diámetro de duramen, porcentaje de duramen, albura y corteza. Los porcentajes se calcularon en relación con el área total del disco, y el espesor de corteza; finalmente la albura se determinó mediante la diferencia entre diámetro total y el diámetro de corteza y duramen, respectivamente.

Propiedades físicas y mecánicas

Las propiedades físicas se determinaron según la norma D2395 de la Sociedad Americana de Pruebas de Materiales [23]. Es importante mencionar que se realizó una variación de la norma, entendiéndose que todas las pruebas físicas al 12% fueron realizadas al 14% de contenido de humedad debido a que no se logró alcanzar dichas condiciones. De cada sección diametral

tomada a diferentes alturas del árbol, se cortó una sección en dirección norte-sur (incluyendo la médula) con un ancho de 2,5 cm (Figura 2C-D). Se dividió esta sección en el centro, generando dos subsecciones. Estas muestras fueron utilizadas para determinar el peso específico básico, la densidad verde, la densidad al 12% (seco al aire) y el contenido de humedad verde. De los sobrantes de los discos al DAP, se tomaron dos muestras, una en sentido radial y otra en sentido tangencial (Figura 2D) para determinar la contracción normal (verde hasta un 12% de contenido de humedad), la total (verde hasta seca al horno) y la razón de contracción. En ambas subsecciones mencionadas anteriormente (contracciones y propiedades físicas) se determinó la contracción volumétrica. La contracción radial, tangencial y volumétrica al 12% se determinó como la diferencia de longitud entre condición verde y condición al 12%, y la contracción total como la diferencia de longitud entre condición verde y condición anhidra.

Cada muestra se pesó utilizando una balanza digital y mediante inmersión en agua se determinó su volumen, esto fue realizado bajo tres condiciones de contenido de humedad: verde, seca al 12% y anhidra (0%). Las muestras alcanzaron un 12% de contenido de humedad dado que se acondicionaron en una cámara a una temperatura de 21°C y una humedad relativa de 71% durante 15 días aproximadamente. Para determinar el peso y el volumen en condición anhidra, las muestras fueron llevadas al horno por 24 horas a 100°C.

Densidad por densitometría de rayos x: las secciones diametrales al 25% se utilizaron en la determinación de la densidad normal. Se cortó una sección en dirección norte-sur (incluyendo la médula) de aproximadamente 1 cm de ancho. Esta sección fue dividida en dos partes iguales. De cada muestra, se obtuvieron secciones transversales (láminas) de 1,5 mm de espesor, las cuales fueron acondicionadas en una cámara de acondicionamiento a una temperatura de 21°C y una humedad relativa de 71% hasta alcanzar un 12% de contenido de humedad. Finalmente, se pesaron y se determinó la densidad normal utilizando un escáner de rayos x (Quintek Measurement Systems Inc., QTRS-01X), el cual brinda los valores de densidad basado en diferentes lecturas realizadas durante un segundo cada 40 µm.

Color de duramen: se determinó el color en el área de duramen de las tablas de 2,54 cm y 5,00 cm de espesor aproximadamente, provenientes del aserrío de las trozas a diferentes alturas. Se utilizó un MiniScan EZ 4500L el cual estima el color en tres coordenadas brillo (L^*), rojo (a^*), y amarillo

(b*). Con la finalidad de determinar la variación del color de la madera de duramen de los diferentes clones, se usó como referencia (testigo) las muestras de *S. macrophylla* de bosque natural que posee la xiloteca del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TECW), las cuales presentaron parámetros promedio de $L^*=54,43$, $a^*=14,85$ y $b^*=28,97$. La diferencia de color de la madera antes y después del proceso de secado se calculó mediante la suma de la diferencia cuadrática de cada una de las coordenadas (Ecuación 1). Dicha variable fue analizada en 162 tablas en total.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (1)$$

Donde:

ΔE = diferencia de color, $\Delta L = L_{\text{muestra secada}} - L_{\text{muestra sin secar}}$, $\Delta a = a_{\text{muestra secada}} - a_{\text{muestra sin secar}}$ y $\Delta b = b_{\text{muestra secada}} - b_{\text{muestra sin secar}}$

Propiedades mecánicas: de las trozas obtenidas de los árboles muestreados (Figura 2A) se realizaron las muestras de cada ensayo utilizando las tablas de mayor espesor. Las dimensiones de las probetas utilizadas fueron 2,5 cm de ancho x 2,5 cm de espesor x 45 cm de largo; 2,5 cm de ancho x 2,5 cm de espesor x 10 cm de largo y 5 cm de ancho x 5 cm de espesor x 6,3 cm de largo para el ensayo de flexión, compresión paralela y cortante respectivamente. Cada ensayo fue realizado conforme los estándares ASTM D-143 [24], obteniendo valores de esfuerzo máximo en cortante y compresión paralela a la fibra; módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) en el ensayo de flexión. Se preparó un rango de muestras las cuales variaron según el ensayo y el material disponible, cada una a un 14% de contenido de humedad. Considerando todos los clones, se evaluaron 226, 240 y 225 muestras para el ensayo de flexión, cortante y compresión paralela respectivamente.

Proceso de secado y aserrío

Se empleó el patrón de corte para diámetros pequeños utilizados en Costa Rica [18]. Posteriormente, la madera fue sometida a un proceso de secado utilizando una secadora convencional NARDI con una capacidad de 6 m³. Se siguió el programa de secado propuesto para la especie [18] con una duración de 16 días de secado en total.

La calidad de ambos procesos se evaluó mediante la determinación de defectos presentes en la madera: grietas, rajaduras, encorvadura, arqueadura, acanaladura y alabeo. Los defectos se determinaron según la metodología propuesta por [25] y [26] indicando la cantidad y la magnitud. Con los valores obtenidos se determinó la incidencia para cada uno de los defectos según el clon correspondiente. Para esto se determinó la cantidad de tablas que presentaban el defecto, en relación con el total de tablas evaluadas. Asimismo, la magnitud del defecto fue un valor promediado, debido a que una tabla podría presentar un tipo de defecto en dos secciones distintas.

Propiedades de trabajabilidad

Los procesos de trabajabilidad: cepillado, lijado y torneado; se realizaron según la norma ASTM-D-1666 [27]. En el caso de cepillado se determinó el número de defectos, evaluando la presencia de grano arrancado, velloso y rugoso. Con estos valores se determinó el área libre de defectos de acuerdo con lo que indica la norma, para clasificar según cinco categorías de calidad.

En la prueba de lijado, se evaluó la calidad de superficie lijada mediante la apariencia de rayas y vellosidad. Asimismo, se determinó la remoción y la temperatura asociadas al proceso. La norma no sugiere nada para la clasificación de lijado, por lo tanto, se aplicó la clasificación propuesta por [18]. Finalmente, la prueba de torneado se realizó en plano paralelo y perpendicular, utilizando gubias con ángulos de 0°, 15°, 40° y 60°. Se evaluó la presencia de efectos como grano arrancado, grano velloso y asperezas, clasificando los defectos visualmente en una escala de 1 al 5, donde 1 es excelente y 5 muy mala.

Análisis estadístico

Se realizó una estadística descriptiva de las pruebas realizadas, considerando parámetros como el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Mediante el programa estadístico SAS se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) donde se comparó las propiedades morfológicas, físicas, mecánicas y el color de duramen entre genotipos. Las diferencias entre las variables se determinaron realizando una prueba Tukey ($P < 0,05$).

Se realizó un análisis genético en relación con las propiedades morfológicas, físicas y mecánicas de los diferentes clones, utilizando el software SELEGEN [28]. Los clones fueron evaluados

mediante el modelo 2 (Ecuación 2) para clones en un solo sitio, y con más de una planta en la unidad experimental. Mediante este modelo se realizó el análisis de las variables en forma individual para obtener los parámetros genéticos para cada variable investigada, así como el ranking respectivo de los genotipos evaluados.

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

Donde:

Y=vector de datos, r= vector efectos de repetición, g= vector efectos genéticos, p= vector efectos de parcela, e= vector de error, X y Z son matrices de incidencia de estos efectos.

Los parámetros genéticos considerados fueron: variación genotípica entre clones (V_g); heredabilidad individual en el sentido amplio (h^2_g), es decir, del efecto del genotipo; heredabilidad media del clon promedio (h^2_{mc}) y la precisión de la selección de clones (Ac_{clon}), el promedio general del experimento.

RESULTADOS

Propiedades morfológicas

El cuadro 2 presenta las características morfológicas al DAP para cada uno de los clones analizados. El coeficiente de variación entre los diferentes clones evaluados es de 14,76% para el diámetro total, 15,94% diámetro de duramen, 11,93% para el porcentaje de duramen, 19,24% para el porcentaje de albura y 23,67% para el porcentaje de corteza. Al evaluar estadísticamente las diferencias entre las medias de cada clon, se observa que no existen diferencias significativas entre las variables analizadas. El clon 6 presenta el mayor diámetro total y de duramen, seguido del clon 1. Estadísticamente todos los clones evaluados presentan un porcentaje de duramen al DAP similar, y los clones 5 y 115 muestran el mayor porcentaje de albura y corteza respectivamente, pero nuevamente sin diferencia estadística entre los diferentes clones

Cuadro 2. Propiedades morfológicas al DAP para cada uno de los genotipos de *Swietenia macrophylla*.

Clon	Diámetro total (cm)	Diámetro de duramen (cm)	Duramen (%)	Albura (%)	Corteza (%)
1	16,28 ^B	12,30 ^B	56,99 ^B	24,45 ^B	18,56 ^B
2	13,68 ^B	9,20 ^B	45,48 ^B	39,38 ^B	15,14 ^B
4	12,33 ^B	8,83 ^B	51,28 ^B	40,62 ^B	11,10 ^B
5	13,20 ^B	8,48 ^B	41,14 ^B	43,86 ^B	15,00 ^B
6	17,13 ^B	12,40 ^B	52,79 ^B	33,13 ^B	14,08 ^B
13	14,10 ^B	10,33 ^B	53,70 ^B	28,07 ^B	18,23 ^B
79	13,80 ^B	9,70 ^B	49,15 ^B	31,74 ^B	19,12 ^B
115	14,90 ^B	10,33 ^B	48,07 ^B	31,30 ^B	20,63 ^B
207	15,20 ^B	11,28 ^B	55,56 ^B	28,94 ^B	15,50 ^B

Nota: Diferentes letras en la misma columna son estadísticamente diferentes al 95%.

La variación a diferentes alturas del árbol para las características morfológicas según clones del ensayo genético de *S. macrophylla* de 8 años se muestran en la figura 3. Estadísticamente, a la altura de 0%, 25%, 50% y 100% no existen diferencias significativas entre los clones según las variables analizadas. Los clones 6 y 13 a la altura de 75% muestran una diferencia significativa entre ellos, ubicándose en el límite superior e inferior respectivamente. El diámetro total y el diámetro de duramen disminuyen con el aumento de la altura del árbol. Para todas las variables evaluadas, el clon 13 tiene la altura máxima a un 75%, presentando a esa altura un valor de 0 cm y 0% para el diámetro de duramen y porcentaje, asimismo, el mayor porcentaje de albura. Al 100% los clones 2, 4 y 115 llegan a un valor de 0 cm en la variable diámetro de duramen y porcentaje de este, no se visualiza bien en el gráfico 3b y 3c debido a la poca variación que existe entre los valores. El porcentaje de albura aumenta conforme aumenta la altura del árbol, presentando leves variaciones entre los clones a diferentes alturas, de igual forma el porcentaje de corteza varía según el clon a diferentes alturas del árbol. Sin embargo, estas diferencias no son significativas estadísticamente.

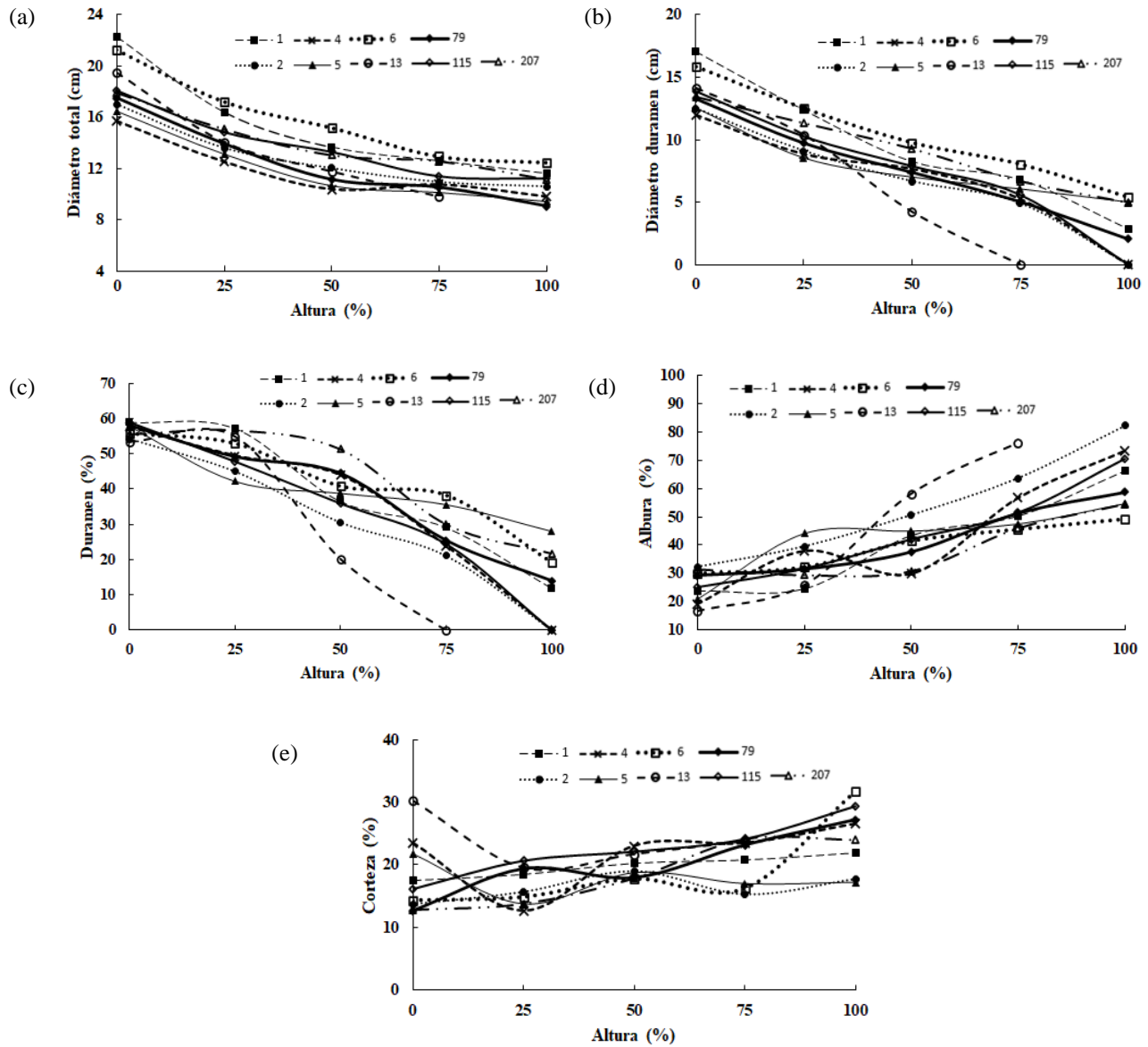


Figura 3. Variación de las características morfológicas a diferentes alturas según clones de *Swietenia macrophylla* en Sarapiquí, Costa Rica.

Propiedades físicas

En el cuadro 3 se muestran las propiedades físicas analizadas al DAP de los diferentes genotipos de *S. macrophylla*. Los coeficientes de variación presentes para el PEB (peso específico básico), densidad verde y contenido de humedad verde es de 3,61%, 3,11% y 4,79% respectivamente. Estadísticamente, para la variable del PEB y la densidad verde, el clon 6 y 115 tienen diferencias

significativas entre ellos y con los demás clones. El mismo caso ocurre con los clones 13 y 79 en el contenido de humedad verde, debido a que la mayor diferencia se encuentra entre ellos. Al evaluar las contracciones (tangencial, radial y volumétrica) y la razón de contracción se observa que la única variable que tiene diferencias significativas es la contracción volumétrica al 12%, siendo las contracciones de los clones 6 y 2 diferentes a los demás. Los valores de contracción tangencial normal y total se clasifican como muy bajas y bajas, con excepción del clon 6 que presenta una contracción de total de 5,14 lo cual se clasifica como contracción mediana. En el caso de las contracciones radiales normales (12%), los valores obtenidos hacen que tengan la misma clasificación que la anterior. Para la contracción radial total (0%), los valores que se encuentran dentro de un rango de 2,1 - 3,0 son catalogados como bajos, entre 3,1 - 4,0 son de contracción mediana como lo es el caso de los clones 2, 13, 79 y 115. Al evaluar las contracciones volumétricas, los valores obtenidos al 0% son clasificados como bajos; al 12% la mayoría de los clones presentan una contracción baja, menos los clones 2, 4 y 6 los cuales presentan una contracción mediana. Finalmente, en la variable de razón de contracción, los valores por debajo de 1,7 se clasifican como una razón baja y entre 1,71 - 2,3 una razón alta, clasificación que presenta el clon 1 con un valor de 2,32 [29].

Cuadro 3. Propiedades físicas al DAP según genotipos de *Swietenia macrophylla*.

Clon	Peso específico básico (g/m ³)	Densidad verde (g/cm ³)	Contenido de humedad verde (%)	Contracción tangencial		Contracción radial		Contracción volumétrica		R/T (al aire)	
				12%	0%	12%	0%	12%	0%	12%	0%
1	0,48 ^{BC}	0,80 ^{BCD}	67,45 ^{AB}	1,81 ^B	4,52 ^B	2,22 ^B	2,72 ^B	3,46 ^{AB}	7,47 ^B	0,82 ^B	2,32 ^B
2	0,48 ^{BC}	0,78 ^{BCD}	62,16 ^{BC}	2,46 ^B	4,81 ^B	1,38 ^B	3,44 ^B	3,96 ^{AB}	8,09 ^B	3,86 ^B	1,53 ^B
4	0,48 ^{BC}	0,77 ^{CD}	61,26 ^{BC}	2,10 ^B	4,92 ^B	2,17 ^B	2,73 ^B	3,70 ^{AB}	8,17 ^B	0,97 ^B	1,80 ^B
5	0,47 ^{BC}	0,78 ^{BCD}	65,40 ^{ABC}	2,42 ^B	4,86 ^B	1,80 ^B	4,68 ^B	3,51 ^{AB}	7,76 ^B	1,60 ^B	1,08 ^B
6	0,45 ^C	0,75 ^C	67,60 ^{AB}	2,34 ^B	5,14 ^B	2,31 ^B	4,95 ^B	4,72 ^A	8,78 ^B	1,00 ^B	1,13 ^B
13	0,49 ^{AB}	0,84 ^{AB}	69,88 ^A	1,70 ^B	4,33 ^B	1,71 ^B	3,84 ^B	3,43 ^{AB}	6,92 ^B	1,34 ^B	1,55 ^B
79	0,50 ^{AB}	0,79 ^{BCD}	59,07 ^C	1,82 ^B	4,02 ^B	2,99 ^B	3,69 ^B	2,58 ^B	6,50 ^B	0,61 ^B	1,29 ^B
115	0,53 ^A	0,87 ^A	62,78 ^{ABC}	1,38 ^B	4,63 ^B	1,23 ^B	3,29 ^B	3,44 ^{AB}	7,43 ^B	2,48 ^B	1,50 ^B
207	0,50 ^{AB}	0,82 ^{ABC}	62,59 ^{ABC}	2,29 ^B	4,60 ^B	0,57 ^B	2,72 ^B	4,21 ^{AB}	7,98 ^B	4,26 ^B	1,69 ^B

Nota: Diferentes letras en la misma columna son estadísticamente diferentes al 95%.

La variación de PEB, contenido de humedad y densidad verde en relación con la variación a diferentes alturas del árbol se observa en la figura 4. En la base del árbol, se muestran diferencias significativas para densidad verde entre la mayoría de los clones, a diferencia de los clones 5, 79

y 207. A esta misma altura, para el peso específico se encuentran diferencias significativas únicamente entre los clones 2, 4, 6 y 115. Para el contenido de humedad verde, no hay diferencias significativas de esta variable entre los clones. A la altura de 25% y 50% existen diferencias significativas entre la mayoría de los clones evaluados, a excepción del 50% para el contenido de humedad verde, donde estadísticamente no hay diferencias significativas entre las medias de los clones. Al 75% únicamente se muestran diferencias para el contenido de humedad verde entre los clones 1, 4, 6 y 207. Finalmente, a la altura de 100% se muestran diferencias significativas para el contenido de humedad verde entre los clones 1, 4 y 207. El peso específico disminuye en todos los clones conforme aumenta la altura del árbol (figura 4b) hasta un 50%. Después su comportamiento es irregular. A la altura de 25% la mayor diferencia significativa en la densidad verde y el PEB se observa entre los clones 6 y 115 posicionándose en el límite inferior y superior respectivamente. El mismo comportamiento ocurre al 50% pero esta vez con los clones 13 y 115.

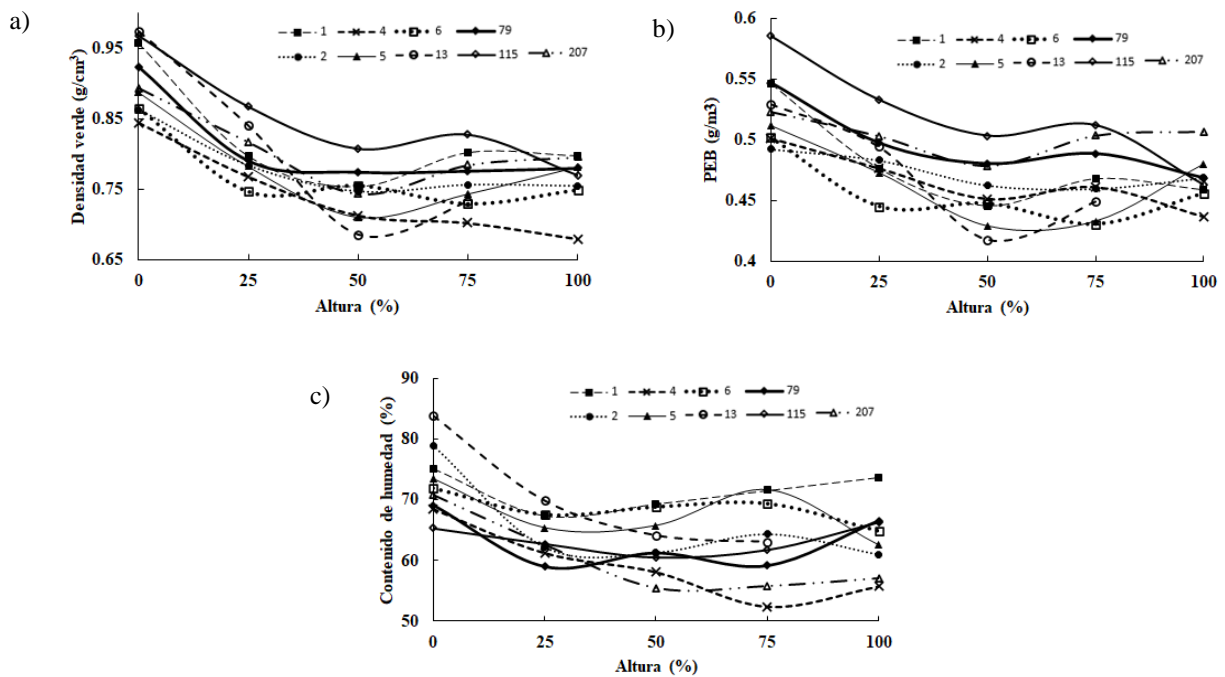


Figura 4. Variación de propiedades físicas a) peso específico básico, b) contenido de humedad y c) densidad verde a diferentes posiciones de la altura comercial.

La variación de densidad por densitometría de rayos x para los diferentes genotipos a la altura de 25% se muestra en el cuadro 4. El coeficiente de variación de la densidad normal promedio es de 11,79%. A pesar de que se observa en algunos clones una variación entre los valores de densidad

normal en las direcciones norte y sur, evaluando estadísticamente, no existen diferencias significativas de acuerdo con los valores promedio obtenidos para la densidad normal. Por el contrario, se observan diferencias significativas en los coeficientes de variación, esto puede deberse a la gran cantidad de lecturas que se realizan en cada muestra. Estadísticamente los clones 1-2-5-13 y 115 no tienen diferencias significativas entre ellos, de igual forma los clones 4-6 y 79-207. Pero si existen diferencias significativas si se compara entre los diferentes grupos. La densidad con el valor más alto la presenta el clon 115 con una densidad normal de 0,519 g/cm³ y la menor con un valor de 0,393 g/cm³ en el clon 79.

Cuadro 4. Densidad real de los genotipos de *Swietenia macrophylla* mediante el método de rayos x.

Clon	Densidad normal (g/cm ³)		Promedio	CV (%)
	Norte	Sur		
1	0,465	0,381	0,434 ^B	23,34 ^{BC}
2	0,505	0,509	0,507 ^B	11,20 ^{BC}
4	0,483	0,470	0,476 ^B	8,92 ^C
5	0,485	0,481	0,483 ^B	8,56 ^C
6	0,392	0,472	0,431 ^B	14,69 ^{BC}
13	0,493	0,505	0,498 ^B	10,65 ^{BC}
79	0,390	0,391	0,393 ^B	20,36 ^{BC}
115	0,549	0,486	0,519 ^B	16,90 ^B
207	0,445	0,484	0,468 ^B	18,88 ^B

Nota: Diferentes letras en la misma columna son estadísticamente diferentes al 95%.

El cuadro 5 muestra el cambio de color por genotipo en relación con el color de la madera de un árbol procedente de bosque natural. El coeficiente de variación para la variable analizada presenta un valor de 61,26%. Se observa que el clon con mayor ΔE lo presenta el clon 4, seguido del 207. En el menor cambio se ubica el clon 13 con un valor de 6,93. Sin embargo, estadísticamente, no existen diferencias significativas entre los clones. Es importante mencionar que los valores de L* evaluados por segunda vez disminuyeron para todos los clones, mientras los valores de a* y b* fueron variables, no tenían un patrón definido, algunos valores se mantenían, mientras otros disminuían o aumentaban, sin embargo, esos valores de diferencia por clon son mínimos.

Cuadro 5. Diferencia del color de duramen en los diferentes genotipos de *Swietenia macrophylla*.

ΔE	Clon								
	1	2	4	5	6	13	79	115	207
	8,80 ^B	9,66 ^B	11,50 ^B	8,57 ^B	7,37 ^B	6,93 ^B	6,92 ^B	7,89 ^B	9,59 ^B

Nota: Diferentes letras en la misma columna son estadísticamente diferentes al 95%.

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas para cada uno de los genotipos evaluados se presentan en el cuadro 6. El coeficiente de variación para el módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE) es de 14,47 % y 15,91% respectivamente. Estadísticamente, se observa que existen diferencias significativas entre las medias de cada clon para la variable del MOR y MOE. Evaluando el MOR entre los diferentes genotipos, se observa que el clon 115 tiene diferencias significativas con los 8 clones restantes. Los clones con mayor módulo de ruptura son el 2 y 115 con valores de 73,38Mpa y 74,31Mpa respectivamente. Los clones 2 y 13 presentaron el mayor y menor módulo de elasticidad, presentando valores de 8,40Gpa y 5,70 Gpa.

En el ensayo de compresión paralela, el esfuerzo presenta un coeficiente de variación de 15,10%, obteniendo el mayor esfuerzo en el clon 115 con un valor de 42,95 Mpa. Al evaluar las diferencias, se refleja que existen diferencias significativas entre los dos grupos grandes grupos (A y B). Finalmente, se obtiene un coeficiente de variación de 10,48% para el ensayo de cortante. En donde se evidencia diferencias significativas entre los clones, el clon 4 y 115 presentan la diferencia más alta debido a que se encuentran en los límites superior e inferior.

Cuadro 6. Propiedades mecánicas de *Swietenia macrophylla* por genotipo.

Clon	Flexión		Compresión paralela	Cortante
	MOR (Mpa)	MOE (Gpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
1	55,40 ^C	6,33 ^B	35,76 ^B	13,97 ^B
2	73,38 ^B	8,40 ^C	41,47 ^C	15,01 ^B
4	65,31 ^B	7,92 ^C	35,90 ^B	12,46 ^C
5	65,13 ^{BC}	7,62 ^C	35,96 ^B	13,04 ^{BD}
6	64,07 ^{BC}	7,65 ^C	35,76 ^B	13,13 ^{BD}
13	56,63 ^C	5,70 ^B	34,42 ^B	12,97 ^{BD}
79	65,18 ^B	7,11 ^{BC}	42,40 ^C	14,33 ^B
115	74,31 ^A	7,13 ^{BC}	42,95 ^C	15,20 ^A
207	68,70 ^B	7,29 ^{BC}	38,58 ^B	14,03 ^B

Nota: Diferentes letras en la misma columna son estadísticamente diferentes al 95%.

Proceso de secado y aserrío

Los defectos antes y después del secado por cada genotipo de *S. macrophylla* analizado en el presente estudio se muestran en el cuadro 7. Al evaluar la calidad de estos procesos, se mostró que las grietas estuvieron presentes en un porcentaje cercano al 25% de la totalidad de las tablas evaluadas, con una longitud máxima de 17 mm y 90 mm antes y después del secado, siendo el clon 5 el que mayor magnitud presentó luego del secado. Los clones 4 y 13 no presentaron defectos de grietas en condición verde. La magnitud y el porcentaje de defecto aumentó en la variable de rajaduras para la mayoría de los clones, muchas de las tablas que presentaron grietas en la primera evaluación, se convirtieron en rajaduras. Los clones 1 y 5 fueron los de mayor magnitud de rajadura con valores de 199 mm y 198 mm respectivamente. La arqueadura y encorvadura varió para todos los clones analizados. En el caso de la encorvadura, los clones 1, 5, 79 y 115 evidencian que el porcentaje de este defecto aumento después del secado, sin embargo, en una magnitud muy baja. Para todos los clones, los defectos de alabeo y de acanalado no se presentaron en madera verde. Después del secado, este defecto tuvo presencia en algunos clones con un porcentaje menor al 25% en el caso de acanaladura. El alabeo por su parte estuvo presente en todos los clones, exceptuando el clon 13. La magnitud presente en promedio para este defecto fue de 2mm. Cabe destacar que las piezas de mayor espesor presentaron problemas con la presencia de médula, sin embargo, fue de baja incidencia.

Cuadro 7. Defectos de la madera en clones de *S. macrophylla* ubicados en Sarapiquí, Costa Rica.

Clon	Parámetro	Grietas		Rajadura		Encorvadura		Arqueadura		Acanaladura		Alabeo	
		Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
1	% tablas*	25	15	10	40	35	45	40	65	0	25	0	20
	Promedio (mm)	13	41	9	199	1	2	2	3	0	0	0	2
2	% tablas	25	15	15	40	65	55	65	25	0	0	0	15
	Promedio (mm)	1	13	56	7	134	2	1	2	0	0	0	0
4	% tablas	0	6	29	7	36	7	57	64	0	14	0	7
	Promedio (mm)	0	20	23	128	1	1	4	6	0	0	0	0
5	% tablas	7	27	7	33	20	27	47	27	0	27	0	33
	Promedio (mm)	3	90	5	198	1	1	4	3	0	0	0	3
6	% tablas	4	14	29	39	39	29	64	64	0	25	0	25
	Promedio (mm)	1	27	45	135	1	1	4	5	0	1	0	2
13	% tablas	0	15	0	23	69	38	62	23	0	8	0	0
	Promedio (mm)	0	5	0	55	3	2	4	2	0	0	0	0
79	% tablas	21	21	21	36	21	29	43	43	0	0	0	36
	Promedio (mm)	9	29	23	86	1	1	3	3	0	0	0	2
115	% tablas	20	15	25	40	30	50	50	40	0	20	0	10
	Promedio (mm)	17	33	20	127	1	1	2	2	0	0	0	1
207	% tablas	14	14	24	38	57	52	57	57	0	19	0	24
	Promedio (mm)	7	46	33	159	1	1	3	4	0	0	0	2

Nota: * El porcentaje del total de tablas con el defecto.

Propiedades de trabajabilidad

El comportamiento de la madera en cada uno de los ensayos realizados, se reflejan en el cuadro 8. Según se observa en la prueba de cepillado, no existen diferencias significativas al evaluar con las diferentes velocidades de alimentación, todos los clones se encuentran dentro de la clasificación de excelente, lo cual representa un área libre de defectos entre 80% y 100%. Asimismo, se observa que la calidad para 20 m/min disminuye para la mayoría de los clones, pero a un porcentaje muy bajo. A excepción del clon 6, que tuvo la misma calidad en ambas velocidades.

Para las variables temperatura y remoción de polvo en la prueba de lijado, no se observan diferencias significativas entre los clones. La temperatura para todos los casos se clasifica como baja, además, se clasifica dentro de la categoría de fácil lijado.

En la prueba de torneado, la calidad de superficie generalmente varía de excelente a buena, en algunos casos específicos es posible encontrar una calidad regular, pero son muy pocos los casos. En el plano paralelo es posible observar que a medida que aumenta la inclinación en grados, la calidad disminuye presentando defectos en las superficies de la madera. Caso contrario ocurre en el plano perpendicular, el cual muestra muy buenas superficies, con mínimos defectos. Las mejores calidades en la mayoría de los clones se encuentran en el plano paralelo en ángulos de 0° y 15°, a excepción de los clones 5, 6 y 79 donde fue posible observar algún tipo de defecto, bajando la calidad de este.

Cuadro 8. Propiedades de trabajabilidad de la madera de 9 genotipos de *Swietenia macropylla*.

Ensayo	Parámetro	Condición	Clon								
			1	2	4	5	6	13	79	115	207
Cepillado	15° ángulo de corte	6m/min	95 ^B EX	99 ^B EX	95 ^B EX	96 ^B EX	98 ^B EX	95 ^B EX	98 ^B EX	97 ^B EX	96 ^B EX
		20m/min	92 ^B EX	98 ^B EX	91 ^B EX	97 ^B EX	98 ^B EX	98 ^B EX	94 ^B EX	95 ^B EX	94 ^B EX
Lijado	Temperatura		28,32 ^B B	27,83 ^B B	28,29 ^B B	27,22 ^B B	28,15 ^B B	27,58 ^B B	26,46 ^B B	27,55 ^B B	27,34 ^B B
	Remoción de polvo		2,09 ^B VE	1,72 ^B VE	1,85 ^B VE	1,99 ^B VE	2,56 ^B VE	2,06 ^B VE	2,37 ^B VE	1,71 ^B VE	1,80 ^B VE
Torneado	0°	Paralelo	EX(AD)	EX (AD)	EX(AD)	EX (AD)	GO (RS)	EX (AD)	EX (AD)	EX(AD)	EX (AD)
	15°	Paralelo	EX(AD)	EX (AD)	EX(AD)	GO (RS)	GO (RS)	EX (AD)	GO (RS)	EX(AD)	EX (AD)
	40°	Paralelo	GO(RG)	GO (RS)	GO (RS)	GO (RG)	GO (RG)	GO (RS)	GO (RS)	GO (RS)	GO (RS)
		Perpendicular	EX(AD)	GO (RG)	EX(AD)	EX (AD)	EX (AD)	EX (AD)	GO (RG)	EX(AD)	GO (RG)
	60°	Paralelo	GO (RS)	FA (RG)	GO (RS)	GO (RS)	GO (RG)	FA (RG)	FA (RG)	FA (RG)	GO (RG)
		Perpendicular	GO(RG)	EX (AD)	EX(AD)	EX (AD)	EX (AD)	EX (AD)	EX (AD)	EX(AD)	EX (AD)

Nota: Diferentes letras en la misma columna son estadísticamente diferentes al 95%. Letras entre paréntesis representan calidad y clasificación. Para la temperatura y remoción de polvo en la prueba de lijado; L: bajo, medio: H: alto, L-M: bajo a medio, M-H: medio a alto, VE: muy fácil, VD: muy difícil. En cepillado y torneado: EX: excelente, GO: bueno, FA: regular. En la prueba de torneado: RG: grano rasgado, AD: Cualquier defecto, RS: superficie rugosa

Análisis genético

El cuadro 9 muestra los parámetros genéticos de algunas de las propiedades físicas, mecánicas y morfológicas de la madera según los diferentes genéticos de *Swietenia macrophylla* analizados en el presente estudio. Las variables contracción al 12%, contracción total, parámetros de color y cambio de color presentan una heredabilidad individual y heredabilidad entre clones muy baja, con valores menores a 5%, lo que indica que no existen diferencias entre clones para dichas variables. El peso específico básico, la densidad verde y al 12%, el módulo de ruptura y módulo de elasticidad y el esfuerzo muestran los valores más altos de heredabilidad media entre clones. Las variables diámetro sin corteza, diámetro de duramen, módulo de elasticidad y esfuerzo de compresión tienen un coeficiente genético muy bueno entre los diferentes clones, con un valor superior a 10%.

Cuadro 9. Parámetros genéticos de las propiedades de la madera en genotipos de *Swietenia macrophylla*, Sarapiquí, Costa Rica.

Variables	Parámetros genéticos			
	h2g	h2mc	Acclon	CVg%
Diámetro con corteza	0,354	0,805	0,919	9,829
Diámetro sin corteza	0,362	0,849	0,922	10,395
Diámetro de duramen	0,356	0,846	0,919	12,358
Peso específico básico	0,331	0,908	0,953	4,367
Densidad verde	0,357	0,917	0,958	3,955
Contenido de humedad verde	0,309	0,899	0,948	7,077
Densidad al 12%	0,363	0,919	0,958	4,182
Contracción al 12%	0,005	0,019	0,139	2,926
Contracción total	0,002	0,010	0,102	1,444
Parámetro de color L*	0,094	0,767	0,876	5,024
Parámetro de color a*	0,013	0,302	0,549	1,437
Parámetro de color b*	0,008	0,204	0,451	1,994
Cambio de color ΔE	0,003	0,096	0,31	3,911
Módulo de ruptura	0,316	0,924	0,961	9,711
Módulo de elasticidad	0,308	0,919	0,958	10,801
Esfuerzo de compresión (Mpa)	0,213	0,863	0,929	11,853
Esfuerzo (Mpa)	0,281	0,918	0,958	6,662

Nota: h2g es heredabilidad individual, h2mc es heredabilidad media entre clones, CVg es el coeficiente de variación genético y Acclon es la exactitud de selección de clones.

El ranking genético y la estabilidad de las clones para las variables analizadas anteriormente se muestran en el cuadro 10. Según los resultados obtenidos, se considera un top 5, donde se

encuentran las mejores posiciones según el clon y las variables evaluadas. La estabilidad de los clones 1,2,3,4 y 5 para las variables de diámetro con corteza, sin corteza y duramen es buena, debido a que, se encuentran en la misma posición en el ranking. En relación con las otras variables, se observa que todos los clones cambian de posición en el ranking según la variable en estudio, lo cual refleja poca estabilidad. El clon 115 se ubica en la posición número 1 para las variables de PEB, densidad verde y al 12%, módulo de ruptura (MOR), esfuerzo de compresión y esfuerzo en el ensayo de cortante.

Cuadro 10. Ranking y estabilidad genética para las propiedades de la madera analizadas entre clones de *Swietenia macrophylla* en Sarapiquí, Costa Rica.

Diámetro con corteza	Diámetro sin corteza	Diámetro de duramen	Peso específico básico	Densidad verde	Contenido de humedad verde	Densidad al 12%	Contracción al 12%	Contracción total	Parámetro de L*	Parámetro de a*	Parámetro de b*	Cambio de color ΔE	Módulo de ruptura	Módulo de elasticidad	Esfuerzo de compresión (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
C1 ²	C1 ²	C1 ²	C1 ⁴	C1 ³	C1 ²	C1 ⁴	C1 ⁵	C1 ⁹	C1 ¹	C1 ⁴	C1 ³	C1 ⁴	C1 ⁹	C1 ⁸	C1 ⁷	C1 ⁵
C2 ⁶	C2 ⁵	C2 ⁸	C2 ⁵	C2 ⁶	C2 ⁵	C2 ⁵	C2 ⁶	C2 ³	C2 ⁷	C2 ³	C2 ⁶	C2 ²	C2 ²	C2 ¹	C2 ³	C2 ²
C4 ⁹	C4 ⁹	C4 ⁹	C4 ⁷	C4 ⁹	C4 ⁹	C4 ⁷	C4 ³	C4 ⁷	C4 ⁵	C4 ⁹	C4 ⁸	C4 ¹	C4 ⁵	C4 ²	C4 ⁶	C4 ⁹
C5 ⁸	C5 ⁸	C5 ⁷	C5 ⁸	C5 ⁷	C5 ⁴	C5 ⁸	C5 ⁴	C5 ²	C5 ²	C5 ²	C5 ²	C5 ⁵	C5 ⁴	C5 ⁴	C5 ⁵	C5 ⁷
C6 ¹	C6 ¹	C6 ¹	C6 ⁹	C6 ⁸	C6 ³	C6 ⁹	C6 ²	C6 ¹	C6 ³	C6 ⁷	C6 ¹	C6 ⁷	C6 ⁷	C6 ³	C6 ⁸	C6 ⁶
C13 ⁵	C13 ⁶	C13 ⁵	C13 ⁶	C13 ²	C13 ¹	C13 ⁶	C13 ⁷	C13 ⁴	C13 ⁶	C13 ⁵	C13 ⁴	C13 ⁸	C13 ⁸	C13 ⁹	C13 ⁹	C13 ⁸
C79 ⁷	C79 ⁷	C79 ⁶	C79 ³	C79 ⁴	C79 ⁶	C79 ³	C79 ¹	C79 ⁶	C79 ⁹	C79 ⁶	C79 ⁹	C79 ⁹	C79 ⁶	C79 ⁷	C79 ²	C79 ³
C115 ⁴	C115 ⁴	C115 ⁴	C115 ¹	C115 ¹	C115 ⁷	C115 ¹	C115 ⁹	C115 ⁵	C115 ⁸	C115 ¹	C115 ⁷	C115 ⁶	C115 ¹	C115 ⁶	C115 ¹	C115 ¹
C207 ³	C207 ³	C207 ³	C207 ²	C207 ⁵	C207 ⁸	C207 ²	C207 ⁸	C207 ⁸	C207 ⁴	C207 ⁸	C207 ⁵	C207 ³	C207 ³	C207 ⁵	C207 ⁴	C207 ⁴

Nota: El número junto a cada clon indica la clasificación genética de dicha para cada variable, donde 1 es la más alta y 9 la más baja.

DISCUSIÓN

Propiedades morfológicas, físicas y mecánicas. En *S. macrophylla* el contraste entre albura y duramen es abrupto, presentando un alto porcentaje de duramen [18]. Este resultado es congruente con lo encontrado en el Sur de India con árboles de 88 años, que muestra un porcentaje de duramen de 89% [30]. En el presente estudio se obtiene un valor promedio de 40% para porcentaje de duramen presente en los clones evaluados. Considerando la edad de la plantación, el valor presente es significativo, un alto porcentaje de duramen aumenta el valor comercial de la especie [18]. A su vez [3] señala que el porcentaje de duramen disminuye conforme aumenta la altura del árbol y el porcentaje de corteza aumenta; el mismo comportamiento se obtuvo en este estudio para el porcentaje de duramen, sin embargo, el porcentaje de corteza tuvo un comportamiento irregular.

La diferencia entre la albura y el duramen está directamente relacionada con el color de la madera, característica importante que se utiliza en la madera de uso comercial [31]. *Tectona grandis* se caracteriza por ser una especie atractiva y muy apetecida en el mercado debido al color que presenta su madera [32]. Algunas investigaciones reflejan que la madera de *S. macrophylla* (albura y duramen) en condición seca se torna de color amarillo y café respectivamente [18]. Sin embargo, en el presente análisis el color del duramen tuvo un comportamiento diferente bajo la misma condición. Debido a que presentó un color marrón claro en el caso del duramen.

La calidad del color se muestra según los resultados obtenidos de la diferencia de color (ΔE^*) con respecto al patrón de color, brillo (L^*), rojo (a^*) y amarillo (b^*) [33]. Si los valores de cambio de color varían entre 0,5 y 1,5 no es apreciable, entre 1,5 y 3,0 es notable en la superficie, entre 3,0 y 6,0 es apreciable y si varía entre 6,0 y 12,0 significa que el cambio de color es muy notable [33]-[34]. De acuerdo con los resultados del cuadro 5, el cambio de color para cada uno de los clones estudiados se caracteriza por tener un cambio de color muy notable. Los valores promedio reportados para el presente estudio después del proceso de secado corresponden a L^* 53,21, a^* 18,42 y b^* 27,31. Al comparar estos valores con la muestra testigo, se evidencian que el valor de L^* y b^* disminuyen, mientras el valor de a^* aumenta. Generalmente, la madera con tonalidades rojas (valores bajos de a^*) y valores de brillo bajos (valores altos de b^*) producen colores oscuros, tonos atractivos para el usuario final [35].

A su vez, el peso específico básico es una de las propiedades más importantes de la madera, debido a que permite inferir en otras propiedades físico-mecánicas como contracciones, trabajabilidad y comportamiento en acabados [36]. Generalmente, mayores valores de peso específico básico se asocian a mayores resistencias mecánicas, debido a que se relaciona directamente con el contenido de celulosa presente [36]. En este estudio, los clones presentaron un peso específico básico promedio de 0,48 inferior al reportado por [18] a una edad de 10 años, el cual es de 0,51 clasificando la especie como madera pesada. El valor reportado en el presente estudio clasifica la madera como moderadamente pesada [29].

La densidad está directamente relacionada con el peso específico. Teóricamente la madera de *S. macrophylla* posee una densidad seca al aire de 0,70 g/cm³. Este valor es similar a especies de maderables de bosque húmedo y muy húmedo como, por ejemplo, *Huberodendron allenii* (Cucharilla), *Hieronyma alchorneoides* (Pilón), *Elaeoluma glabrescens* (Carey), las cuales presentan la misma densidad de la caoba. Dicho valor hace que la madera de estas especies sea de muy buena calidad [37]. Asimismo, se reportan valores de densidad de 0,472 g/m³ y 0,549 g/m³ para árboles de plantaciones con edades menores y mayores de 40 años. Además, se encuentra que en bosque natural la especie puede poseer una densidad de 0,612 g/m³. A pesar de las diferencias existentes entre los valores de densidad, se considera que la madera de plantación es de excelente calidad, con un valor comercial muy importante [38]. Para este estudio se obtienen valores de densidad promedio verde, seca al aire y anhidra de 0,80 g/cm³, 0,57 g/cm³ y 0,52 g/cm³. Dichos valores son cercanos a los reportados en estudios anteriores para plantaciones forestales no clonales [37]. Utilizando el método de densitometría de rayos x, se alcanza una densidad normal de 0,47 g/cm³, valor que se encuentra muy por debajo de los mencionados anteriormente.

Los valores promedio obtenidos para contracciones en el presente estudio corresponden a 2,04% y 4,65% para contracción tangencial al 12% y 0% de contenido de humedad respectivamente. Estos valores se encuentran dentro de la clasificación baja. Las contracciones radiales reflejan valores de 1,82% y 3,57%; perteneciendo a la clasificación baja y media respectivamente [29]. Asimismo, los valores promedio de contracción volumétrica y razón contracción (T/R) pertenecen a la clasificación baja, con excepción de la razón de contracción al 12% la cual se cataloga como alta con un valor de 1,88. Según estudios anteriores, se han reportado diferencias en las contracciones radiales y tangenciales de plantaciones forestales y de bosque natural en *S. macrophylla*. Los

árboles jóvenes, menores de 40 años muestran contracciones de 6,4% y 3,6%; los árboles adultos mayores de 40 años presentan 5,4% y 3,5% y finalmente, la contracción para árboles de bosque natural corresponde a 3,5% y 2,5% dichos valores corresponden a la contracción tangencial y radial respectivamente [38]. Los resultados muestran que conforme los árboles se vuelven adultos las contracciones son menores, esto debido a que el porcentaje de madera juvenil es muy poco.

Proceso de aserrío y secado. En el secado de la madera, el agua se mueve de una zona de alta a baja concentración, debido a esto el contenido de humedad inicial es una variable importante que influye directamente en el proceso, además, el tiempo de secado varía según el contenido de humedad inicial y el espesor de la madera [1]. Producto de este movimiento se presentan cambios de las propiedades físico-mecánicas [19]. Algunos autores señalan que especies con bajo contenido de humedad inicial son deseables debido a su bajo tiempo de secado [19]. *Cordia alliodora* y *Vochysia ferruginea* se caracterizan por tener un contenido de humedad inicial alto, 166% y 112% respectivamente, sin embargo, el agua es de fácil eliminación por lo que son especies con velocidad de secado media. Caso contrario sucede con *Terminalia oblonga* y *S. macrophylla*, las cuales presentan un contenido de humedad relativamente bajo, considerándose especies de secado moderado a lento [18].

Según se observa en la figura 4c, el contenido de inicial para los clones varió en un rango de 65% a 85%. El proceso de secado duro 9 días más de lo propuesto por [18], esto debido a que se tenían piezas de 2,54 cm y 5 cm de espesor aproximadamente. En el aserrío, algunas de las trozas presentaron problemas en el acomodo debido a la presencia de nudos y forma irregular, lo cual ocasionó problemas en el acomodo y volteo de la troza. Ambos procesos fueron evaluados mediante la presencia de defectos, donde se observa que la mayoría de los clones presentan defectos antes y después del secado, incrementando el defecto de acanaladura y alabeo en la segunda evaluación (madera seca al 12%). Ciertos autores mencionan que la madera joven es sensible a cambios dimensionales, lo que puede ocasionar defectos en esta [38]. Por lo tanto, la alta presencia de rajaduras después del secado puede deberse a lo mencionado anteriormente. [33] mencionan que, al aumentar la edad de árboles clonales, la madera se vuelve más estable dimensionalmente y pueden presentar menos deformaciones durante el secado.

A. acuminata, *B. quinata*, *S. macrophylla* y *T. grandis* a una edad inferior de 14 años, reportan en un porcentaje de alabeo superior al 40% con una magnitud de 3 mm, siendo *S. macrophylla* la especie con el porcentaje de alabeo más alto. Antes del secado, dicha especie no presenta rajaduras [39]. Después del secado, especies como *A. mangium*, *A. acuminata*, *S. macrophylla*, *T. grandis* y *T. oblonga* evidencian una disminución en el porcentaje de arqueamiento. En cambio, especies como de *G. arborea*, *T. amazonia* y *V. guatemalensis*, el arqueamiento aumenta con el secado [39]. En el caso del presente estudio, los clones 4 y 5 tuvieron el mismo comportamiento de *V. guatemalensis* aumentando el arqueamiento después del secado. El alabeo se encuentra por debajo del reportado anteriormente y al igual, no se presentan rajaduras en condición verde.

Propiedades de trabajabilidad. El comportamiento de la madera en procesos de trabajabilidad puede variar entre especies. Generalmente, especies de baja densidad presentan mayores problemas de trabajabilidad, mientras especies de densidad media tienen de excelentes a buenas propiedades [1]. En procesos de cepillado se han encontrado diferencias según ángulos de corte y tasas de alimentación. *A. acuminata* con una densidad seca al aire de $0,43 \text{ g/m}^3$ y *B. quinata* con densidad de $0,30 \text{ g/m}^3$ [40] a un ángulo de corte de 15° reportan mayores áreas libres de defectos; por su parte, lo mismo ocurre para *C. lusitanica* y *S. macrophylla* pero con un ángulo de 30° [1] - [18]. En relación con la alimentación, los mejores porcentajes de área se obtienen a una velocidad en pies de 6 m/min excepto para especies como *A. acuminata* y *C. lusitanica* a un ángulo de corte de 15° [1]. Las especies *C. alliodora*, *D. panamensis*, *E. cyclocarpum*, *H. alchorneoides*, *S. saman* y *V. ferrugínea* también presentan porcentajes de área muy buenos cuando se trabaja con una velocidad de 6 m/min, sin embargo, esta calidad disminuye para *D. panamensis* y *E. cyclocarpum* si esta velocidad aumenta a 20 m/min [3]. En el proceso de lijado, se reportan varias clasificaciones. *S. macrophylla* y *B. quinata* se caracterizan por ser especies de fácil lijado y especies como *A. mangium*, *A. acuminata* y *V. guatemalensis* son consideradas de mediana facilidad de lijado [1]. *S. macrophylla* en comparación con *T. amazonia* presenta mejor remoción de polvo a una baja temperatura; en cambio, *T. amazonia* presenta baja remoción a temperaturas altas. Esta última especie se encuentra dentro del grupo de especies más difíciles de lijar [1]. Sin embargo, esto no significa que para todas las especies a una baja temperatura hay mayor remoción de polvo. Por ejemplo, *C. alliodora*, *D. panamensis*, *E. cyclocarpum*, *H. alchorneoides*, *S. saman* y *V. ferrugínea* son especies de fácil lijado en un rango de temperatura de 30°C a 40°C [3].

De acuerdo con la prueba de torneado, las especies *A. acuminata*, *C. lusitanica* y *T. amazonia* presentan baja calidad de superficie. A su vez, *T. oblonga* y *V. guatemalensis* tienen una calidad superficial de regular a bueno, debido a que normalmente se tiene presencia de grano arrancado y una superficie rugosa. Por su parte, *B. quinata* y *S. macrophylla* sobresalen nuevamente, reportando excelentes calidades de superficies, y de presentarse defectos, son mínimos [1]. Especies como *S. saman*, *E. cyclocarpum*, y *C. alliodora* presentan también una excelente calidad en la superficie de torneado [3].

En el presente estudio, para la prueba de cepillado únicamente se trabajó con un ángulo de corte de 15° utilizando velocidades de 6 m/min y 20 m/min. [18] menciona que cuando se trabaja con un ángulo de corte de 15° y una velocidad de alimentación de 20 m/min en madera de corte tangencial, la calidad del proceso disminuye hasta en un 15%, mostrando mayor presencia de defectos. Dichos resultados no se ratifican en este estudio porque a pesar de que se obtienen diferencias mínimas en el área libre de defectos entre una u otra velocidad, la clasificación de ambas se encuentra como excelente, presentando un área libre de defectos entre 80% y 100%.

Los valores de remoción por clon en el proceso de lijado son muy buenos, sin embargo, se presentaron embotamientos de lija y el desbaste se logró con varias pasadas. Los defectos presentes, mostraron baja incidencia, con excepción de algunas tablas donde en una misma tabla, estaban presentes todos los defectos analizados de forma continua. Los resultados obtenidos en el proceso de torneado fueron relativamente buenos debido a que la presencia de defectos es muy baja, presentado los mejores resultados en el plano paralelo a 0° y 15°. [1] menciona que *S. macrophylla* presenta muy buena calidad de torneado. A su vez, [18] reporta que, si se utiliza la gubia de forma horizontal, la calidad es excelente. Sin embargo, al inclinarla se pierde hasta un 50% de la calidad de superficie. Asimismo, menciona que al introducir la gubia de forma inclinada se produce grano arrancado y quemaduras en la superficie torneada. Comportamiento que se presentó en este mismo estudio, debido a que, en el plano perpendicular, a 40° y 60° la presencia de quemaduras se mostró en algunas de las superficies torneadas.

Análisis genético. Los valores de heredabilidad individual (h^2g) reportados en el presente estudio son valores muy buenos en la mayoría de las variables evaluadas, a excepción de algunas variables con un porcentaje de heredabilidad menor a 5%. Este factor se puede deber a la edad juvenil de los

clones evaluados, [30] menciona que, para *S. macrophylla* a mayor madurez del árbol, el color de la madera mejora significativamente, lo cual le da un valor agregado a la especie. Para *G. arborea* en un estudio realizado con clones en Cariari de Pococí se reflejan valores de heredabilidad individual bajos, [41] menciona que esto puede deberse a la edad de la plantación, debido a que a 10, 22 y 34 meses de edad, la plantación no ha expresado su potencial genético [42]. En dicho estudio se analizaron parámetros relacionados con diámetro a la altura del pecho (DAP), altura comercial, volumen comercial y calidad del fuste; donde se observa mayor heredabilidad individual en sentido amplio para las variables de volumen comercial y dap [42]. Otro estudio realizado con semilla mejorada y clones híbridos de la especie *Eucalyptus grandis* en Argentina, reflejan heredabilidades en sentido amplio de moderadas a altas; los clones híbridos al ser comparados con la semilla mejorada evidenciaron alta proporción de corteza, alta densidad de la madera, aceptables tensiones de crecimiento y una estabilidad dimensional aceptable a pesar de presentar altos valores de contractibilidad radial y tangencial [43]. Cabe destacar que, aunque se han realizado estudios relacionados con las propiedades de la madera de *S. macrophylla*, no se había contemplado hasta el momento el control genético sobre dichas propiedades. Es posible encontrar diversos estudios con especies como *G. arborea*, *T. grandis*, *A. mangium* y *D. panamensis*; sin embargo, los esfuerzos se han enfocado en pocas especies entre las cuales destaca *G. arborea* [16].

En términos de ranking genético, en el estudio de *G. arborea*, los clones 17 y 34 mostraron ser los mejores en el volumen comercial; el clon 19 se ubicó en las últimas posiciones del ranking. Además, la variabilidad genética de los clones estudiados permite obtener ganancias genéticas importantes [42]. Para el presente estudio, en relación con las propiedades morfológicas (diámetro con corteza, diámetro sin corteza y diámetro de duramen) sobresalen los clones 1, 6, 115 y 207 posicionándose en las mejores 4 posiciones. La quinta posición varía entre los clones 13 y 2 para estas variables. A su vez, evaluando las mejores posiciones en relación con las propiedades mecánicas, los clones 115, 2, 6, 207, 5, 4, 79, y 1 presentan las mejores posiciones en el top 5 del ranking genético.

CONCLUSIONES

Las características morfológicas presentan diferencias significativas únicamente al 75% de la altura. El diámetro total y el diámetro de duramen disminuyen y el porcentaje de albura aumenta con el aumento de la altura del árbol, mientras el porcentaje de corteza tiene un comportamiento inestable en la mayoría de las alturas evaluadas. El peso específico y la densidad verde disminuye en todos los clones conforme aumenta la altura del árbol hasta un 50%, después su comportamiento es irregular. A la altura del DAP, el promedio de PEB para los clones evaluados es de 0,48 perteneciendo a la clasificación de madera moderadamente pesada. Los valores de contracciones tangenciales, radiales, volumétricas y razón de contracción reportados para este estudio se clasifican como bajos, con excepción en algunos casos mínimos donde la contracción pasa de baja a media. Finalmente, los valores de ΔE reflejan un cambio notable en todos los clones evaluados.

Los valores obtenidos muestran que los genotipos evaluados en este estudio presentan muy buenas propiedades mecánicas a la edad de 8 años. Presentando valores superiores a 1Mpa y 150Mpa en MOR y MOE para el ensayo de flexión. A su vez, valores de esfuerzo por encima de 2,5Mpa y 8Mpa en compresión paralela y cortante respectivamente.

Las propiedades de trabajabilidad para cada uno de los clones son muy buenas, considerando que todos los clones tienen alta presencia de madera juvenil. Los defectos con mayor incidencia luego del secado fueron las rajaduras, alabeo y acanaladura, esta última con un porcentaje de incidencia muy bajo.

Los parámetros genéticos obtenidos para los clones de *S. macrophylla* muestran valores de heredabilidad media del clon muy buenos, con excepción en las variables de contracciones donde la heredabilidad es baja. Los valores con alta heredabilidad permiten inferir el potencial del mejoramiento genético para la especie.

RECOMENDACIONES

Se recomienda para futuras investigaciones, hacer uso de métodos no destructivos como por ejemplo barrenos de fuste o ultrasonidos, esto con el fin de obtener las muestras sin la necesidad de cortar el árbol.

Dar seguimiento a este estudio, incluyendo análisis de propiedades químicas y anatómicas, para tener una información más amplia sobre las propiedades y trabajabilidad de la madera de *S. macrophylla* proveniente de plantaciones clonales juveniles, debido a que la información existente en Costa Rica es nula.

En procesos de trabajabilidad, se recomienda un espesor cercano a 2,54 cm para minimizar la incidencia de rajaduras presentes en tablas de mayor espesor. A su vez, en el proceso de lijado se recomienda después de utilizar lija #60, utilizar una lija superior a 100 para lograr superficies de excelente calidad, lo cual se descartó en este estudio por falta de tiempo.

REFERENCIAS

- [1] R. Moya, C. Salas, A. Berrocal and JC. Valverde, "Evaluation of chemical compositions, air-dry, preservation and workability of eight fast-growing plantation species in Costa Rica", *Maderas y Bosques*, vol. 21, no. (especial), pp. 31-47, 2015.
- [2] R. Moya and G. Gonzales, "Esfuerzos admisibles de diseño por grado estructural para nueve maderas de plantación de Costa Rica", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 11, no. 26, pp. 1-11, 2013.
- [3] R. Moya, C. Tenorio, C. Salas and A. Berrocal, "Evaluation of wood properties from six native species of forest plantations in Costa Rica", *Bosque*, vol. 37, no. 1, pp. 71-84, 2016.
- [4] Instituto Nacional de Estadística y Censos, VI Censo Nacional Agropecuario: resultados generales, 1 ed., San José. C.R.: INEC, 2015.
- [5] R. Moya, M. Wiemann and C. Olivares, "Identification of endangered or threatened Costa Rican tree species by wood anatomy and fluorescence activity", *Revista Biológica Forestal*, vol. 61, no. 3, pp. 1133-1156, 2013.
- [6] E. Corea, "Selección de clones superiores de caoba (*Swietenia macrophylla*) para sistemas agroforestales" *Ambientico*, Nov, pp. 42-47. 2012.
- [7] M. Carranza, H. Reyes, W. Mora, O. Cevallos, A. Escobar, M. Cadme, J. Nieto and J. Morante, "PROPAGACIÓN CLONAL in vitro DE *Swietenia macrophylla* King (CAOBA)", *Ciencia y Tecnología*, vol.6, no.2, pp. 1-8, 2013.
- [8] H. Krisnawati, M. Kallio and M. Kanninen, *Swietenia macrophylla* King: ecology, silviculture and productivity, CIFOR, Bogor, Indonesia, 2011.
- [9] J. Pérez, "Manual para el cultivo de la caoba", Centro de Investigación, Enseñanza y Producción Agroforestal (CEPIAGRY), 2017.
- [10] G. Navarro, O. Santamaría, L. Vargas and V. Quesada, "Análisis del comercio internacional de productos de madera y su gobernanza administrativa", UICN, 2014.
- [11] A. Puig, C. Aguilar and Y. Villalón, "Propuesta de la comercialización de semillas de *Swietenia macrophylla* King mejoradas genéticamente en la UCTB Estación Experimental Agroforestal Guisa" *Revista Cubana de ciencias forestales*, vol. 1, no. 2, 2012.
- [12] MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía), Decreto Ejecutivo N° 25167-MINAE, "Declara veda total el aprovechamiento de árboles en peligro extinción", San José, Costa Rica. 1997.
- [13] D. Gilbero, W. Abasolo, M. Ueda and H. Yamamoto, "Surface growth stress and wood properties of 8-year-old planted Big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla* King) from different landrace provenances and trial sites in the Philippines", *Wood Science*, vol. 65, no. 35, pp. 1-12, 2019.

- [14] H. Martínez, *Especies para Sistemas Agroforestales: condiciones para su cultivo*. Moravia, Costa Rica, 2015.
- [15] A. Rojas and A. Hine, “Micropropagation of Superior Clones of Mahogany (*Swietenia macrophylla* King) from Nodal Segments”, *Ciencias ambientales*, vol.53, no. 2, pp. 47-59, 2019.
- [16] O. Murillo and V. Guevara, *Estado de los Recursos Genéticos Forestales de Costa Rica 2012, 2013*.
- [17] O. Murillo, Y. Badilla, M. Villalobos and F. Rojas, “Optimización de la tecnología vegetativa in vivo y plantación de teca y pilón. Informe final de proyecto de investigación”, Cartago, Costa Rica. 2013.
- [18] R. Moya, C. Tenorio, C. Salas, A. Berrocal and F. Muñoz, *Tecnologías de la madera: plantaciones forestales*, Editorial Tecnológico de Costa Rica, 2019.
- [19] R. Moya and F. Muñoz, “Physical and mechanical properties of eight species from fast-growth plantation in Costa Rica”, *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 22, no. 3, pp. 317-328, 2010.
- [20] L. Holdridge, *Life Zones Ecology*, San José, Costa Rica: Tropical Scientific Center, 1967.
- [21] A. Vega, “Caracterización Territorio Sarapiquí”, Instituto de Desarrollo Rural, Sarapiquí, Costa Rica, 2014.
- [22] Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, *Suelos de Costa Rica: orden inceptisol*, San José, Costa Rica: INTA, 2015.
- [23] American Society for Testing and Materials, US (ASTM), D2395 standard test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials, Philadelphia, USA, 2017.
- [24] American Society for Testing and Materials, US (ASTM), D143 standard test methods for small clear specimens of timber, Philadelphia, USA, 2014.
- [25] H. Hallock and F. Malcolm, *Sawing to reduce warp in plantation red pine studs*, EE. UU, Madison: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1972.
- [26] M. Milota, “Method of measurement of bow and crook”, *Forest Products Journal*, vol. 41, no. 9, pp. 65-68, 1996.
- [27] American Society for Testing and Materials, US (ASTM), D1666 standard test methods for conducting machining test of wood and wood-base panel materials, Philadelphia, USA, 2017.
- [28] M. D. Resende, “Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding”, *Crop Breed. Appl. Biotechnol.*, vol. 16, no. 4, 2016.

- [29] G. Bárcenas, “Recomendaciones para el uso de 80 maderas de acuerdo con su estabilidad dimensional”, Xalapa, México: Instituto de investigaciones sobre recursos Bióticos. Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la madera, 1985.
- [30] E. V. Anoop, C. M. Jijeesh, C. R. Sindhumanthi and C. E. Jayasree, “Wood physical, Anatomical and Mechanical properties of Big Leaf Mahogany (*Swietenia macrophylla* Roxb) a potential exotic for South India”, *Research Journal of Agriculture and Forestry Sciences*, vol. 2, no.8, pp. 7-13, 2014.
- [31] M. F. Obando and R. Moya, “Silviculture conditions and wood properties of *Samanea saman* and *Enterolobium cyclocarpum* in 19-year-old mixed plantations”, *Forest Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 58-70, 2013.
- [32] W. Kollert and L. Cherubini, “Recursos de teca y evaluación de mercado. Documentos sobre bosques y árboles plantados”, FAO, 2012.
- [33] N. Arce and R. Moya, “Wood characterization of adult clones of *Tectona grandis* growing in Costa Rica”, *Cerne*, vol. 21, no. 3, pp. 353-362, 2015.
- [34] J. C. Valverde and R. Moya, “Efectos de la intemperie del color de la madera en el color de dos acabados aplicados en madera de *Cedrela odorata* y *Carapa Guianensis*”, *Maderas Ciencia y Tecnología*, vol. 12, no. 3, pp. 171-180, 2010.
- [35] R. Moya and A. Berrocal, “Wood colour variation in sapwood and heartwood of young trees of *Tectona grandis* and its relationship with plantation characteristics, site, and decay resistance”, *Annual Forest Science*, Jan., pp. 109-120, 2010.
- [36] W. León, “Anatomía y densidad o peso específico de la madera”, *Revista Forestal Venezolana*, vol. 54, no. 1, pp. 67-76, 2010.
- [37] R. Moya, A. Rodríguez and C. Olivares, *Árboles maderables de la Península de Osa: madera y corteza* Cartago, Costa Rica, Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2014.
- [38] P. Langbour, J. Gerard, M. J. Roda and D. Guibal, “Comparison of wood properties of planted big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla*) in Martinique island with naturally grown mahogany from Brazil, Mexico and Peru”, *Journal of tropical Forest Science*, vol. 23, no. 3, pp. 252-259, 2011.
- [39] R. Moya, E. Urueña, C. Salas, F. Muñoz and O. Espinoza, “Kiln drying behavior of lumber from ten fast-growth plantation species in Costa Rica”, *Wood Material Science & Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 37-45, 2013.
- [40] R. Moya, C. Salas, and L. Leandro, “Pochote: *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand. Bombacaceae” Editorial Corporación Garro y Moya, 2010.

[41] C. Ávila, R. Murillo, O. Murillo and C. Sandoval, “Desarrollo juvenil de clones de *Gmelina arborea* Roxb. De dos procedencias, en sitios planos del Pacifico Sur de Costa Rica”, *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 12, no. 28, pp. 23-35, 2015.

[42] W. Hernández, Y. Badilla and O. Murillo, “Estimación de parámetros genéticos de *Gmelina arborea* Roxb. (melina) en el Caribe de Costa Rica”, *Uniciencia*, vol. 35, no. 1, pp. 352-366, 2021.

[43] J. A. López, “Variación genética de clones híbridos de *Eucalyptus*”, *Revista de Ciencias Forestales*, vol. 24, no. 1, 2016.