

MÉTODO BASADO EN VIBRACIÓN TRANSVERSAL PARA CLASIFICACIÓN DE *Camposperma panamensis* DESTINADO A LA ELABORACIÓN DE MLE

METHOD BASED ON TRANSVERSAL VIBRATION FOR CLASSIFICATION OF *Camposperma panamensis* AIMED AT THE MANUFACTURE OF GLULAM

César Polanco Tapia ^{(1) (2)} (P), José Nivaldo García ⁽²⁾

(1) Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D.C., Colombia

(2) Universidad de Sao Paulo (USP), Escuela Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Piracicaba, Sao Paulo, Brasil

Dirección de contacto: cpolanco@udistrital.edu.co; (P) Presentador

Código de identificación: T3-33

Resumen

La elaboración de madera laminada encolada (MLE) precisa una clasificación previa del material a fin de asegurar la calidad del producto final a través del estricto control durante todo el proceso de obtención. Inicialmente, las evaluaciones visuales son una herramienta valiosa para descartar aquel material que no cumpla la normatividad local. En Colombia la NSR-10 recomienda seguir una clasificación visual para definir el tipo estructural. Los procedimientos visuales en madera pueden ser tendenciosos e inducir errores, por ello metodologías alternativas como pruebas no destructivas (NDT) constituyen una herramienta valiosa y complementaria en la clasificación que involucra el módulo de elasticidad dinámico (E_d). Este trabajo tiene como objetivo implementar NDT para clasificar *Camposperma panamensis*, usando la metodología de vibración transversal desarrollada por el CIRAD de Francia. Se usaron tres tamaños diferentes: 2000x65x42mm, 800x65x42mm y 410x25x25mm, denominándose lamelas, blocks y probetas, respectivamente. Se busca validar las NDT para clasificación en el área de MLE. Para comprobación del método, la madera de menor dimensión también fue sometida a la prueba de flexión estática en tres puntos (ASTM D143), encontrando alta correlación en el módulo de elasticidad estático y dinámico.

Para las piezas de 800 mm el método arrojó que las piezas descartadas visualmente para uso estructural poseían valores de E_d cercanos a los de la madera sin defectos. Las lamelas de 2000 mm presentaron un E_d muy similar en los tres tipos de calidad, por lo que se cree que las uniones *finger joint* paliaron el efecto de las anomalías.

Palabras clave: maderas de Colombia; pruebas no destructivas; pruebas destructivas; Sajo; *finger joint*

Abstract

*The development of glued laminated timber (GLULAM) requires prior classification of the material in order to ensure the quality of the final product through strict control throughout the procurement process. Initially, visual evaluations are a valuable tool for discarding material that does not meet local regulations. In Colombia the NSR-10 recommends following a visual classification to define the structural types. Wood visual procedures can be biased and error-inducing, so alternative methodologies such as nondestructive testing (NDT) are a valuable and complementary tool in the classification involving the dynamic modulus of elasticity (E_d). This work aims to implement NDT to classify *Camposperma panamensis*, using the transversal vibration methodology developed by CIRAD of France. Three different sizes were used: 2000x65x42mm, 800x65x42mm and 410x25x25mm, denominated lamellas, blocks and test pieces, respectively. We try to validate the NDT for classification in the GLULAM area. To verify the method, the smaller dimension wood was also subjected to the test of static bending in three points (ASTM D143), finding high correlation in the static and dynamic modulus of elasticity.*

For the 800 mm pieces the method showed that the pieces discarded visually for structural use had E_d values close to those of the flawless wood. The 2000 mm lamellae presented a very similar E_d in all three quality types, so it is believed that finger joint joints alleviated the effect of the anomalies.

Keywords: Colombian timber; destructive tests; non-destructive testing; Sajo; *finger joint*

1. INTRODUCCIÓN

La especie *C. panamensis* es una de las más usadas en Colombia por la industria maderera. Los volúmenes de consumo anual rondan los 100 mil m³, constituyéndose en una de las especies madereras más demandadas en el país [1], [2]. Estas características hacen que la madera en mención genere una oferta que puede ser usada masivamente en la fabricación de edificaciones con aplicación estructural y de manera competitiva.

De otro lado, los productos en madera para construcción deben someterse a pruebas de resistencia que otorguen información a los ingenieros calculistas. Tradicionalmente estas pruebas son de tipo destructivo, lo que implica altos costos, consumo de tiempo y la necesidad de laboratorios especializados, que no siempre responden a las expectativas del sector privado. Dicho esto, desde los años 50's se vienen adelantando trabajos en el sentido de caracterizar las piezas en madera a través de metodologías no destructivas como la vibración transversal (usada en este trabajo), el ultrasonido, las tomografías acústicas y el escaneo láser [3], con las que se pretende obtener información de la totalidad de piezas a ser usadas, con alto grado de confiabilidad, lo que no descarta la comprobación con algunos test destructivos.

En este sentido y teniendo en cuenta que los códigos de construcción exigen una caracterización plena del material [4], [5], para segmentarlo y asignarlo a una clase resistente [6], este trabajo pretende comparar las propiedades elásticas de la madera a través de pruebas no destructivas para tres tamaños diferentes con destino a la fabricación de la madera laminada encolada (MLE) (410x25x25mm, 800x62x45mm, 2000x62x45mm), además de tres tipos de clasificación por calidad (Grado A, Grado B y Grado C).

2. METODOLOGÍA

2.1 Procedencia

El material fue obtenido en la ciudad de Bogotá D.C. en un depósito que compra la madera a intermediarios que provienen del Pacífico colombiano, donde es oriunda la especie. La madera viene en presentación de bloques (2700x300x200mm) con la respectiva licencia de aprovechamiento. La totalidad de las piezas obtenidas se tomaron de un trabajo que pretende construir MLE de 7500 mm de longitud con aplicación estructural.

2.2 Maquinado

Los procesos de transformación por los que pasó la madera fueron aserrado a 47 mm de espesor, secado en cámara siguiendo las recomendaciones de la Junta del Acuerdo de Cartagena [7], planeado en dos caras ortogonales, reaserrado y dimensionamiento en longitud. Hasta este punto se obtuvieron piezas con dimensiones homogéneas (800x65x42mm), las cuales se conocen como “Blocks”, posteriormente fueron clasificadas siguiendo los criterios de las Tabla 1, en Grados A, B y C. Una vez el material fue clasificado, se fresaron sus extremos con herramientas *finger joint* (FJ) de 11-12 mm de longitud, para luego ser encoladas con adhesivo melamínico (MUF) a razón de 250 g.m⁻², procediendo con su unión longitudinal y prensado hasta obtener “Lamelas” de 6000 mm de longitud.

La última etapa del maquinado consistió en el fresado FJ y prensado del material para la obtención de lamelas tipo “Extremo”, las cuales correspondían a la unión longitudinal de blocks grado A de 800 mm; lamelas tipo “Intermedio” fabricadas con blocks de 800 mm grado A, B y blocks cortos (<800 mm) grado B. Finalmente, se elaboraron lamelas tipo “Centro” con la unión longitudinal FJ de blocks largos grado B y blocks cortos grado A y B. Una semana después, estas lamelas fueron divididas en tres porciones, obteniendo piezas de 2000 mm, aproximadamente, que fueron usadas en este trabajo. Los laminados tradicionales usan blocks de 800 mm de longitud en

todos los tipos de lamelas, como este trabajo pretende ser la base de investigaciones futuras, la longitud y grados de calidad de los blocks fue modificada para las lamelas tipo intermedio y centro.

2.3 Obtención de probetas

Los blocks grado C de 800 mm, fueron dimensionados en longitud para convertirlos en grado A y grado B, descartando los defectos incompatibles con la elaboración de MLE. A partir de estos blocks se obtuvieron las probetas de 410x25x25 mm que satisfacían los criterios de clasificación en los Grados A, B y C, mencionados en la Tabla 1. Es de aclarar que esta clasificación es meramente cualitativa, excepto en las dimensiones y perforaciones. Las cantidades del material obtenido según el grado al que pertenece se pueden visualizar en la Tabla 2.

Tabla 1: Clasificación Visual General para la especie *Camposperma panamensis*.

Grado A	Grado B	Grado C
Ausencia de nudos	Presencia de nudos vivos sin desprendimiento	Presencia de nudos vivos con desprendimiento y/o nudos muertos
Aristas completas	Presencia de arista faltante sin comprometer dimensiones del producto final	Presencia de arista faltante comprometiendo dimensiones del producto final
Ausencia de médula centrada o en caras	Presencia de médula en las caras y/o en el borde de las secciones transversales	Presencia de médula en las caras y/o en el borde y/o en el centro de las secciones transversales
Ausencia de rajaduras	Ausencia de rajaduras mayores al ancho de la pieza	Presencia de rajaduras en cualquier dimensión
Ausencia de perforaciones	Ausencia de perforaciones grandes (>3mm)	Presencia de perforaciones en cualquier tamaño
	Presencia de perforaciones pequeñas (≤ 3 mm) ya curadas	Presencia de perforaciones vigentes
Homogeneidad de color, tonos y matices	Heterogeneidad de color, tonos y matices	Heterogeneidad de color, tonos y matices
Presencia de mancha azul	Presencia de mancha azul	Presencia de mancha azul
Ausencia de pudriciones	Ausencia de pudriciones	Presencia de pudriciones localizadas
Ausencia de escamadura	Presencia de escamadura sin comprometer dimensiones del producto final	Presencia de escamadura comprometiendo dimensiones del producto final
Homogeneidad en dimensiones	Homogeneidad en dimensiones con o sin presencia de alabeos	Heterogeneidad en dimensiones

Tabla 2: Número de piezas utilizadas en el estudio para cada tamaño y grado

Tamaño (mm)	Número de piezas para el ensayo			
	Grado A/ Extremo*	Grado B/ Intermedio*	Grado C/ Centro*	Total
410x25x25	35	15	10	60
800x65x42	30	29	30	89
2000x65x42*	27	8	16	51

*Aplica solo para el caso de las Lamelas de 2000mm

2.4 Programa BING y ejecución del ensayo

Este programa denominado *Beam Identification by Nondestructive Grading*, fue desarrollado por el CIRAD en Francia [8] y determina las propiedades elásticas del material a partir de parámetros geométricos y físicos de las piezas de madera de hasta 4000 mm de longitud, además de los modos de vibración cuando se es excitado con un golpe. Tal excitación en uno de los extremos genera una serie de vibraciones que son capturadas en el extremo opuesto por un micrófono del tipo cardiode unidireccional. Siguiendo las teorías de Euler y Bernoulli [9], en cuanto a los valores de carga-deformación, y los postulados de Timoshenko [10], en lo que respecta al modelo general de vigas, las frecuencias de vibración capturadas son medidas y transformadas por el programa en propiedades mecánicas del material, obteniendo de esta manera un módulo de elasticidad dinámico (E_d), que se corresponde con el módulo de elasticidad estático (MoE) [11].

Es de aclarar que debe darse previamente una especie de “calibración” del material, con varios intentos hasta que la frecuencia de vibración se vuelva repetitiva. La Figura 1 (izquierda) da a conocer la forma en que se ejecutó esta prueba no destructiva.

2.5 Pruebas Destructivas

Las pruebas destructivas se practicaron en probetas pequeñas de 410x25x25 mm siguiendo los criterios de la normativa ASTM D 143-12 [12]. Se calcularon las variables carga máxima, deformaciones, cargas en el límite de la proporcionalidad, tipo de falla y densidad seca al aire. Las pruebas fueron ejecutadas en la Escuela Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ-USP) de la ciudad de Piracicaba, usando para ello la máquina universal Contenco UMC 300 con la celda de carga de 5 t. La Figura 1 (derecha) permite tener una idea de la forma en que fue ejecutado el ensayo.



Figura 1: Montaje de referencia para NDT (izquierda) usando el programa BING y para la prueba de flexión longitudinal (derecha) con probetas de 410x25x25 mm de la especie *C. panamensis*

2.6 Análisis estadístico de la información

Los datos obtenidos fueron densidad seca al aire, contenido de humedad, módulo de elasticidad dinámico en todos los tamaños de probetas y módulo de elasticidad estático para el caso de las piezas de 410 mm. Se realizaron las estadísticas descriptivas, también se aplicaron pruebas de normalidad por Shapiro-Will y Kolmogorov-Smirnov, además se evaluaron las pruebas de Levene para homogeneidad de varianzas. En los casos donde no se aceptó la normalidad, se practicaron pruebas no paramétricas de Kruskal Wallis. Las diferencias entre los tratamientos fueron evaluadas por el test de Mann-Whitney-Wilcoxon [13], a un 95% de confiabilidad. Por último, se implementaron correlaciones no paramétricas (Spearman) entre los tratamientos seleccionados para los factores y las variables E_d y D_{sa} . El programa usado para el análisis de los datos fue IBM SPSS *Statistics* 24 [14].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el caso del material experimental más pequeño se obtuvo una correlación altamente significativa ($\rho < 0.01$) entre los valores de MoE y E_d la cual llegó al 62.7%. Los resultados medios del módulo de elasticidad para cada tratamiento en la madera maciza por el método de la norma ASTM D 143 y el método de la NDT fueron 9.434,38 (± 1831) MPa y 10.318,43 ($\pm 2313,7$) MPa, respectivamente. La expresión para representar un valor en función del otro se da a conocer en la Ecuación 1 y aplica para unidades en MPa.

$$MoE = E_d * 0,50905 + 4.148,4 \quad (1)$$

Los valores de densidad seca al aire (D_{sa}) y E_d se dan a conocer en la Tabla 3. Allí se visualiza el número de probetas obtenido por tratamiento. A simple vista, los valores de densidad son muy similares para todos los tratamientos o lo que es lo mismo combinaciones de grados y tamaños, mientras que los valores de E_d tienen un rango de variación más amplio.

Tabla 3: Valores medios de densidad seca al aire (Kg.m^{-3}) y módulo de elasticidad (MPa) obtenido por el procedimiento no destructivo

Tamaño de <i>C. panamensis</i> (mm)	Grados de Clasificación	Número de Probetas	Densidad seca al aire (D_{sa})		Módulo de Elasticidad dinámico (E_d)	
			Media (Kg.m^{-3})	Desviación estándar (Kg.m^{-3})	Media (MPa)	Desviación estándar (MPa)
410x25x25	Grado A	35	422,9	61,8	10732	2005
	Grado B	15	435,7	85,8	10569	2842
	Grado C	10	399,8	56,6	8495	1668
810x62x45	Grado A	30	420,8	45,0	10530	1378
	Grado B	29	421,5	59,1	9175	2199
	Grado C	30	439,3	59,0	9971	1985
2000x62x45	Grado A	27	429,5	32,4	11927	1207
	Grado B	8	441,7	32,4	11885	2644
	Grado C	16	432,1	40,1	12038	1880

Los valores para cada variable fueron puestos en forma de barras de caja y bigote en la Figura 2, allí se visualiza el comportamiento para cada variable. En términos generales los dos menores

tamaños de material muestran un patrón similar en el E_d . Mientras que para las piezas de 2000 mm de longitud esta variable presenta valores más altos. En lo que respecta a la densidad, los valores medios son muy similares en todos los tamaños.

Para validar los datos y determinar el camino a seguir en la selección de los modelos estadísticos, se aplicaron los test de normalidad de la Tabla 4 y el test de homogeneidad de varianzas de la Tabla 5. No obteniendo normalidad en todos los casos, se optó por presentar los resultados agregados para cada variable y correr modelos no paramétricos para presentar valores de salida de las dos variables de manera conjugada. Los datos de estos modelos se presentan en el Anexo A.

Tabla 4: Pruebas de normalidad para las dos variables evaluadas segmentadas por tamaño

Variables	Tamaño (mm)	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Parámetro	g.l.	Sig.	Parámetro	g.l.	Sig.
E_d	410X25X25	0,123	60	0,024	0,967	60	0,108
	810x62x45	0,050	89	0,200*	0,979	89	0,170
	2000x62x45	0,092	51	0,200*	0,987	51	0,858
D_{sa}	410X25X25	0,115	60	0,049	0,959	60	0,040
	810x62x45	0,095	89	0,046	0,970	89	0,035
	2000x62x45	0,090	51	0,200*	0,984	51	0,700

a.: Con la corrección significativa de Lilliefors. *Límite inferior de la significación verdadera. g.l.: Grados de libertad. Sig.: Significancia

Al aplicar la prueba no paramétrica Mann-Whitney-Wilcoxon se obtuvieron diferencias significativas entre tamaños al interior de la variable E_d , mas no en la variable D_{sa} . Gráficamente se puede verificar esta información (Figura 3). Se nota que el E_d es muy sensible al grado de clasificación de la madera, sobre todo en las probetas de 410 y 800 mm de longitud; no así en las piezas FJ de 2000 mm, donde las variaciones del E_d no fueron considerables a pesar de la clasificación diferenciada en los grados del material. En los dos primeros casos (410 y 800 mm) existe una aparente correlación entre los valores medios de E_d con la D_{sa} ; pero dicho efecto se ve disipado en el modelo general cuando se adiciona la información de las piezas de mayor tamaño. La Tabla 6 evidencia una correlación positiva y significativa entre las dos variables del estudio ($\rho < 0.001$) cuando se aplica el estadístico de Spearman. Lo mismo sucede entre el tamaño y la E_d . La correlación entre el grado y la E_d sigue siendo significativa ($\rho < 0.05$), aunque negativa, lo cual representa que el E_d disminuye en el sentido de los grados A, B, C.

De otro lado, los valores de D_{sa} evidenciaron similaridad estadística, aunque las piezas de 410 mm con defectos no admisibles para uso estructural (Grado C), mostraron la media de tratamiento más baja y esta puede ser una justificación para los menores valores medios en la variable E_d .

Tabla 5: Pruebas de Levene para homogeneidad de varianzas en las dos variables evaluadas y su interacción*

	F	g.l.1	g.l.2	Sig.
E_d	2,207	8	191	0,029
D_{sa}	3,361	8	191	0,001

*Prueba la hipótesis nula de que la varianza de error de la variable dependiente es igual entre grupos.
g.l.: Grados de libertad. Sig.: Significancia

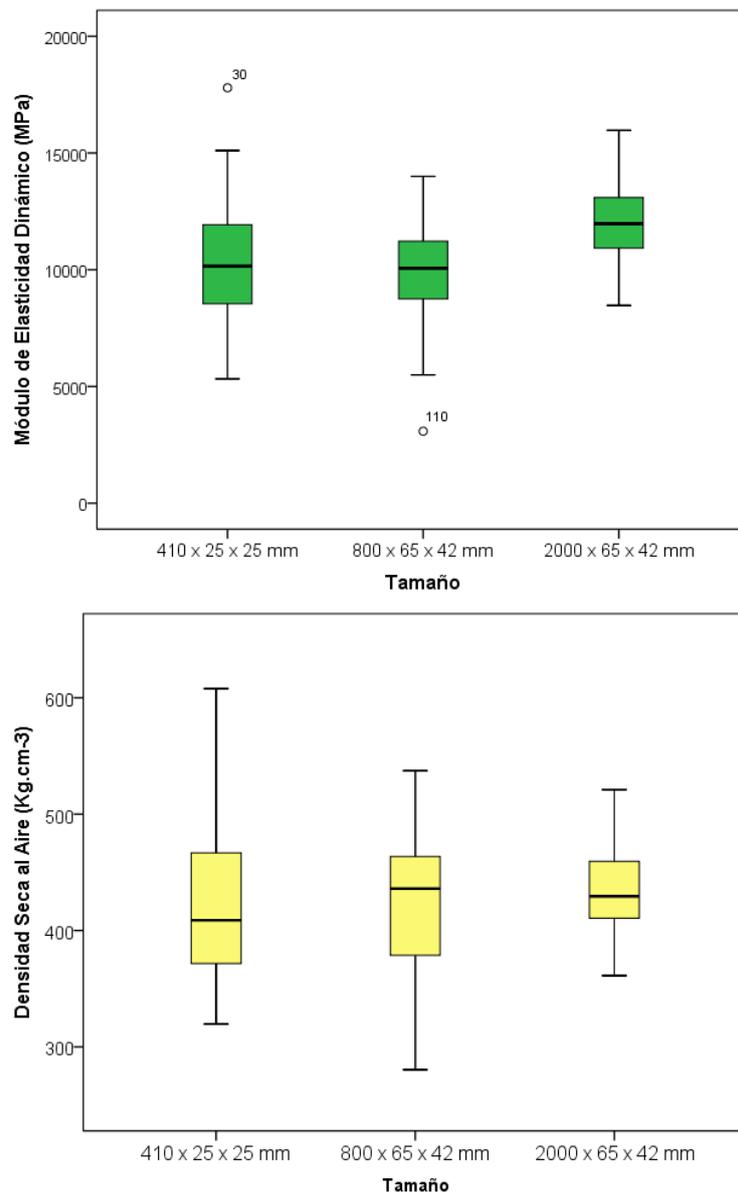


Figura 2: Diagramas de caja y bigote para el módulo de elasticidad dinámico (arriba) y la densidad seca al aire (abajo)

Comparando piezas de 2000 y 410 mm se puede entrever que en la medida que se disminuye el tamaño hay una mayor sensibilidad ante la presencia de defectos. Por ejemplo, piezas de 2000 mm con atributos del grado A, B y C¹ parecen incorporar mejor las diferencias anatómicas, expresando E_d menos diferenciados. No sucede lo mismo en piezas de 410 mm, donde la presencia de los mismos atributos tiene mayor posibilidad de disturbar tejidos y reducir los valores del E_d , al incidir por ejemplo, en toda la sección transversal y disipar la señal de excitación. En piezas más grandes (2000 mm), donde las características del grado C fueron eliminadas, se encontraron los mayores valores de E_d , a pesar del mayor número de uniones FJ, lo que abre una ventana acerca de la baja a nula influencia que sobre el E_d puede representar el tamaño del block en la conformación de lamelas, bajo las condiciones del presente trabajo.

¹ En este caso, el grado C hace referencia a lamelas con *blocks* grado A y B en dimensiones menores a 800 mm (180-700 mm), intercalados con *blocks* tipo B de 800 mm.

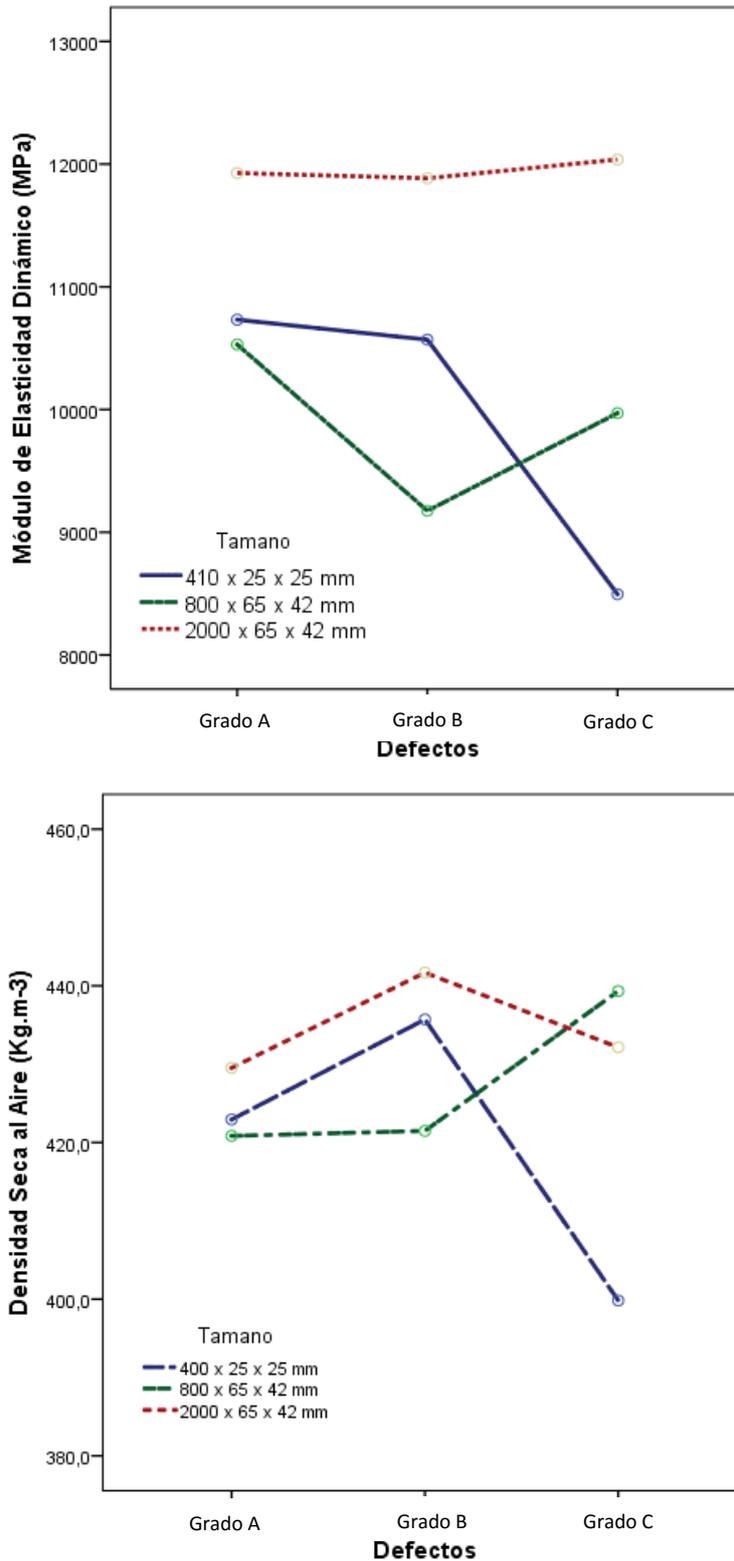


Figura 3: Módulo de elasticidad dinámico para cada tamaño de probetas y grado de calidad (arriba) y densidad seca al aire para cada tamaño de probetas y grado de calidad (abajo)

Una consecuencia de eliminar las características típicas del grado C, es la obtención de piezas más cortas y el aumento de uniones FJ para llegar a 2000 mm; este procedimiento puede despertar el interés entre los fabricantes de MLE, ya que podrían incorporar piezas pequeñas a la vez que se conservan los estándares elásticos². Una alternativa prudente puede ser la inclusión de este nuevo material en áreas cercanas al eje neutro de las vigas, donde tendrían una menor exigencia estructural [14], [15], [16].

Tabla 6: Correlación de Spearman para los tratamientos y variables del estudio

Prueba	Variación	Parámetros	Tamaño	Grado	E_d	D_{sa}	
Rho de Spearman	Tamaño	Coefficiente de correlación	1,0	0,097	0,288(**)	0,103	
		Significación (bilateral)	.	0,174	0,000	0,146	
		N	200	200	200	200	
	Grado	Coefficiente de correlación			1,0	-,173(*)	0,057
		Significación (bilateral)			.	0,014	0,423
		N			200	200	200
	E_d	Coefficiente de correlación				1,0	0,592(**)
		Significación (bilateral)				.	0,000
		N				200	200
	D_{sa}	Coefficiente de correlación					1,0
		Significación (bilateral)					.
		N					200

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

En las piezas medianas de 800 mm, la respuesta es contrastante, pues características visuales en el material asociado a rechazo (grado C), presentaron un mejor E_d , respecto a aquellas piezas clasificadas como grado B, obteniendo valores cercanos al grado A; circunstancia que pone en entredicho el uso exclusivo del procedimiento visual como herramienta de clasificación. Una causa a esta situación es que gran parte del material en este tamaño con grado C, presenta nudos, médula, dimensiones menores, entre otros (Ver Figura 4 y Tabla 1), que son características típicas del tejido cercano a la región central de estos árboles. Si se evalúa transversalmente, es una zona que se caracteriza por una mayor densidad, como es típico de las latifoliadas, y de ahí puede desprenderse un mayor valor del E_d , cuyo valor final depende proporcionalmente de este parámetro [18]. El Anexo A da a conocer los resultados detallados de las comparaciones por métodos no paramétricos entre los diferentes tratamientos, para las dos variables seleccionadas.

Como consideración final puede decirse que desde los inicios de la formulación de las normas de clasificación de la madera en Colombia, que coinciden con los primeros resultados de la JUNAC [19], a inicios de los 80's, cuando aún existían grandes áreas de bosques prístinos proveedores de material, se ha sido muy estricto con este noble material de construcción. En otras palabras, se ha

² Se debe verificar si los estándares de resistencia máxima y en el límite proporcional también se mantienen.

seguido con una política en extremo exigente con los términos de referencia que debe cumplir la madera, para que sea digna como pieza estructural. Situación que ha conllevado a que grandes volúmenes de madera sean rechazados en las plantas de transformación porque no cumplen las normativas, desestimulando su uso por la acumulación de productos no conformes y elevados costos en su obtención por cuenta de este rechazo.

Una alternativa corresponde a nuevas propuestas de clasificación de rápida evaluación y la incorporación en conjuntos estructurales como la MLE. Esto brindará la posibilidad de un producto normalizado y más competitivo que los productos y procesos antecesores. Es aquí donde los resultados de esta propuesta cobran relevancia. Pues de manera preliminar, es evidente el mejor comportamiento de la madera cuando hace parte de un conjunto FJ (2000 mm- Grados A, B y C) versus piezas individuales de menor tamaño, especialmente cuando presentan defectos (410 mm- Grado C y 800 mm- Grados B y C), otorgando así la posibilidad de mejorar en muchos sentidos, las perspectivas de utilización de la madera, cuya naturaleza es anisotrópica y de amplia variabilidad; eso sí, sin olvidar los aspectos más relevantes de fabricación, uso y mantenimiento [20]. En todo caso deberán definirse, cuantificarse y respetarse los límites de los defectos para cada grado y para cada especie, como ya lo proponen algunas normativas en Norteamérica [21].



Figura 4: Piezas de *C. panamensis* de 800 mm de longitud clasificadas como grado C.

4. CONCLUSIONES

Es posible representar el módulo de elasticidad estático de la madera a partir del módulo de elasticidad dinámico, calculado a partir de NDT en piezas de 410x2,5x2,5 mm, usando para ello el modelo econométrico presentado.

Los valores de densidad seca al aire se mantuvieron constantes en todos los tratamientos independientemente de los diferentes tamaños y grados de calidad. A pesar de visualizar una reducción drástica de esta variable en las piezas de menor tamaño cuando presentan defectos, no puede considerarse una situación estadísticamente significativa.

Los valores de elasticidad por vibración presentaron diferencias significativas cuando se compararon los grados de calidad. Así la madera grado A presentó la media más alta y se diferenció estadísticamente de los grados B y C, que no lograron diferencias entre ellos. Ver anexo A.

Por otro lado, la madera de 2000 mm presentó los mayores valores de E_d , diferenciándose estadísticamente de los tamaños 800 y 410 mm, que exhibieron igualdad entre ellos. Ver anexo A.

Las NDT's pueden ser consideradas con potencial de uso para la caracterización y clasificación de la madera de *C. panamensis* con destino a la fabricación de MLE en Colombia, por lo que se recomienda incluir su utilización en las normativas de carácter nacional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su total agradecimiento a los organizadores de este evento tan importante para Latinoamérica, a los evaluadores anónimos por sus valiosas contribuciones, así como a las entidades que realizaron aportes para el desarrollo y culminación de este trabajo, entre ellos: Interquim S.A (Subsidiaria de AKZO NOBEL), Organización de Maderas Aponte, Ripoll Laminados, Laboratorio de Engenharia da Madeira (LEM) de la ESALQ-USP, Organización de los Estados Americanos (OEA), CAPES y especialmente a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

REFERENCIAS

- [1] K. Van Eynde and T. Blomley, *Causas de la ilegalidad de la madera en colombia*, WWF-Colomb. Reino Unido, 2015.
- [2] A. Colorado, "SAJO : El Valioso desconocido," *Rev. M&M*, vol. 44, pp. 1–6, 2004.
- [3] R. J. Ross, "Nondestructive Testing and Evaluation of Wood," in *Nondestructive Evaluation of Wood. General Technical Report FPL-GTR-238*, Second Edi., R. J. Ross, Ed. Madison, WI:U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory., 2015, p. 167.
- [4] A. American Society for Testing and Materials, *ASTM D3737-93c. Standard practice for Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber (GLULAM)*. United States, 2012, p. 40.
- [5] R. Argüelles, F. Arriaga, and J. J. Martínez, *Estructuras de Madera Diseño y Cálculo*, 2a ed. Madrid, España: AiTiM, 2000.
- [6] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, *NSR-10, Título G Norma Sismoresistente Colombiana*. Colombia, 2010, p. 168.
- [7] J. del A. de C. JUNAC, *Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas*. Cali, Colombia, 1989.
- [8] CIRAD, "BING®, wood quality analysis system," *A non-destructive system for measuring the mechanical characteristics of wood and wood products*, 2015. [Online]. Available: <http://www.cirad.fr/en/innovation-expertise/products-and-services/equipment-and-processes/bing-r-wood-quality-analysis-system>.
- [9] R. J. Bernhard, F. A. Milner, and G. Rabbiolo, "Vibrations of a beam and related statistical properties," *Math. Comput. Model.*, vol. 34, no. 5–6, pp. 657–675, Sep. 2001.
- [10] S. Timoshenko, *Resistencia de Materiales. Primera Parte: Teoría Elemental y problemas*, 2a. Madrid, España, 1957.
- [11] L. B. Otani, P. G. de A. Segundinho, E. A. M. Morales, and A. H. A. Pereira, "Elastic moduli characterization of wood and wood products using the impulse excitation technique," 2015.
- [12] A. American Society for Testing and Materials, *ASTM D 143. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*, vol. 94, no. C. USA, 2010, pp. 1–31.
- [13] H. B. Mann and D. R. Whitney, "On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other," *Ann. Math. Stat.*, vol. 18, no. 1, pp. 50–60, 1947.
- [14] M. Norusis, "IBM SPSS Statistics 24 Brief Guide." IBM Corporation, Tokio, Japan, p. 108, 2011.
- [15] H. Yang, D. Ju, W. Liu, and W. Lu, "Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 109, pp. 73–83, Apr. 2016.
- [16] A. Nubissie, E. Kingne Talla, and P. Wofo, "Effects of the combined action of axial and transversal loads on the failure time of a wooden beam under fire," *Mater. Des.*, vol. 40, pp. 331–335, Sep. 2012.
- [17] W. Lu, Z. Ling, Q. Geng, W. Liu, H. Yang, and K. Yue, "Study on flexural behaviour of glulam beams reinforced by Near Surface Mounted (NSM) CFRP laminates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 91, pp. 23–31, Aug. 2015.
- [18] M. Roohnia, A. Tajdini, and N. Manouchehri, "Assessing wood in sounding boards considering the ratio of acoustical anisotropy," *NDT E Int.*, vol. 44, no. 1, pp. 13–20, Jan. 2011.
- [19] F. J. Keenan and M. Tejada, *Tropical Timber for Building Materials in the Andean Group Countries of South America*. 1984.
- [20] P. Dietsch and T. Tannert, "Assessing the integrity of glued-laminated timber elements," *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 1259–1270, 2015.
- [21] A. American Society for Testing and Materials, *ASTM D 245. Standard Practice for Establishing*

Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber. USA, 2006, p. 16.

ANEXO A

Tabla A1. Comparaciones no paramétricas entre los diferentes tamaños

Tamaño 410mm vs 2000mm				Tamaño 410mm vs 800mm				Tamaño 800mm vs 2000mm			
	Grados	E_d	D_{sa}		Grados	E_d	D_{sa}		Grados	E_d	D_{sa}
Mann-Whitney U	1367,5	831,5	1249,0	Mann-Whitney U	1932,500	2495,0	2421,5	Mann-Whitney U	1945,000	965,0	2198,0
Wilcoxon W	3197,5	2661,5	3079,0	Wilcoxon W	3762,500	6500,0	4251,5	Wilcoxon W	3271,000	4970,0	6203,0
Z	-1,072	-4,1	-1,663	Z	-3,057	-0,7	-0,962	Z	-1,499	-5,6	-0,310
Asymp. Sig. (2-tailed)*	0,284	0,000	0,096	Asymp. Sig. (2-tailed)*	0,002	0,498	0,336	Asymp. Sig. (2-tailed)*	0,134	0,000	0,757

*Significancia asintótica para dos muestras

Tabla A2. Comparaciones no paramétricas entre los diferentes grados

Grados A vs C				Grados A vs B				Grados B vs C			
	Tamaño	E_d	D_{sa}		Tamaño	E_d	D_{sa}		Tamaño	E_d	D_{sa}
Mann-Whitney U	2221,0	2065,5	2381,0	Mann-Whitney U	2340,500	1684,5	2273,5	Mann-Whitney U	1184,000	1307,5	1415,0
Wilcoxon W	6499,0	3661,5	6659,0	Wilcoxon W	3718,500	3062,5	6551,5	Wilcoxon W	2562,000	2685,5	2793,0
Z	-1,5	-2,0	-0,8	Z	-0,229	-2,9	-0,493	Z	-1,854	-0,9	-0,252
Asymp. Sig. (2-tailed)*	0,135	0,044	0,441	Asymp. Sig. (2-tailed)*	0,819	0,003	0,622	Asymp. Sig. (2-tailed)*	0,064	0,361	0,801

*Significancia asintótica para dos muestras

: Representa diferencias significativas ($\rho < 0.05$)