

MÓDULO ELÁSTICO DE PINO Y EUCALIPTO URUGUAYO A PARTIR DE LA FRECUENCIA LONGITUDINAL DE VIBRACIÓN

ESTIMATION OF THE MODULUS OF ELASTICITY OF URUGUAYAN PINE AND EUCALYPTUS FROM LONGITUDINAL NATURAL FREQUENCY

Baño, Vanesa ⁽¹⁾; Moltini, Gonzalo ⁽²⁾ *; Aulet, Alina ⁽³⁾; Cetrangolo, Gonzalo ⁽⁴⁾; Quagliotti, Sebastián ⁽⁵⁾; Moya, Laura ⁽⁶⁾

⁽¹⁾Dr. Ing. Montes. Fac. de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay / CESEFOR, España

⁽²⁾Ing. Civil. ⁽³⁾Dra. Física ⁽⁴⁾Dr. Ing. Civil: Fac. Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

⁽⁵⁾Ing. Agr. Laboratorio Tecnológico del Uruguay-LATU. Montevideo, Uruguay

⁽⁶⁾ PhD Arch. Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay. Montevideo, Uruguay

* Contacto: gmoltini@fing.edu.uy

CÓDIGO: 4612956

Resumen

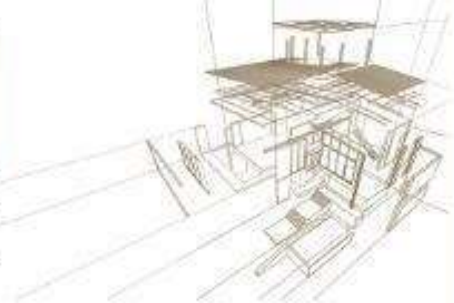
El uso de la madera como material estructural en Uruguay es muy reciente. Las primeras normas de clasificación visual estructural de madera aserrada de las especies *Pinus elliottii/taeda* y *Eucalyptus grandis* se han publicado en el año 2018. Con el fin de mejorar la predicción de las propiedades mecánicas obtenidas mediante este método, algunas normas internacionales ya incorporan otros parámetros de estimación, como son los valores de módulo de elasticidad o la densidad. Con este fin, el objetivo del presente trabajo es proponer las ecuaciones de predicción del módulo de elasticidad estático a partir de mediciones de frecuencia natural de vibración longitudinal con el fin de incluirlo en un futuro como parámetro complementario en la clasificación visual. Para ello, se realizaron ensayos estáticos y de vibración en 86 vigas de eucalipto de sección 30x90 mm² clasificada visualmente como EF0 según la norma UNIT 1262 y en 72 vigas de pino de sección 50x150 mm² clasificadas visualmente como EC0 y EC1 según la norma UNIT 1261 (51 y 21 respectivamente). Se calculó el módulo de elasticidad estático, obtenido a partir de ensayos de flexión de 4 puntos según la norma EN 408, y el módulo de elasticidad dinámico, a partir de la frecuencia de vibración medida con acelerómetros. Los resultados, corregidos al contenido de humedad del 12%, permitieron obtener las ecuaciones lineales que posibilitan estimar el módulo estático a partir del dinámico para ambas especies y para las distintas calidades, mostrando buena correlación entre ellos.

Palabras-clave: ensayos no destructivos, vibración, módulo de elasticidad, pino, eucalipto

Abstract

The use of wood as a structural material in Uruguay is very recent. The first standards of structural visual grading of *Pinus elliottii/taeda* and *Eucalyptus grandis* species have been published in 2018. In order to improve the prediction of mechanical properties obtained by this method, some international standards already incorporate other estimation parameters, such as modulus of elasticity and density values. To this end, the aim of this paper is to propose the prediction equations of the static elastic modulus from measurements of natural frequency of longitudinal vibration to include it in the future as a complementary parameter in the visual grading. Static and vibration tests were carried out on 86 eucalyptus beams of cross-section 30x90 mm² graded as EF0 according to the UNIT 1262 and 72 pine beams of cross-section 50x150 mm² graded as EC0 and EC1 according to the UNIT 1261. The static elastic moduli were obtained from 4-point bending tests and the dynamic elastic moduli were calculated from the vibration frequency measured with accelerometers. The results showed high correlation between the static and dynamic modulus for both species and the linear equations for estimation of the static modulus from non-destructive tests are proposed.

Keywords: non-destructive tests, vibration, modulus of elasticity, Pinus, Eucalyptus



1. INTRODUCCIÓN

El uso de madera de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) y pino (*Pinus elliottii*), producida en Uruguay con fines estructurales es muy reciente. Ambas especies de rápido crecimiento, suministran aproximadamente 4,2 millones de m³ para la industria de transformación mecánica, *i.e.*, productos para la construcción y carpintería (Baño et al. 2018).

Las primeras normas de clasificación visual por resistencia de madera aserrada de estas especies de pino y eucalipto se han publicado en el año 2018. Con el fin de mejorar la predicción de las propiedades mecánicas obtenidas mediante este método, algunas normas internacionales incorporan otros parámetros de estimación, tales como los valores de módulo de elasticidad o los de la densidad. Algunas normas como la NBR 15521 (2007) de Brasil, la ASTM E1876 (2015) de EEUU y la UNE EN 14081-1 (2016) europea, establecen procedimientos para determinar el módulo de elasticidad mediante NDT generalmente a partir de la densidad y de la velocidad de propagación de una onda o la frecuencia de vibración medida en una pieza del material estudiado.

Las técnicas no destructivas (NDT) resultan muy útiles para el proceso de caracterización y evaluación de madera y productos de ingeniería de madera. Varios autores realizaron revisiones exhaustivas sobre técnicas NDT aplicadas a la madera (Brashaw et al. 2009, Vega 2013, Cavalheiro et al. 2018), destacándose el resumen cronológico presentado por Fernández Llana 2016. El autor indicó además, que el primer registro de ensayos de vibraciones longitudinales para obtener el módulo de elasticidad dinámico de la madera data de 1848 y fue atribuido a Chevandler y Wertheim.

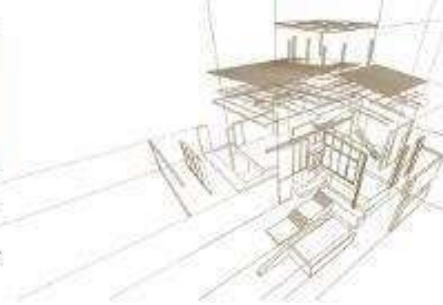
Las técnicas de vibraciones han sido empleadas para obtener las propiedades elásticas de la madera, tanto en cuerpos de prueba de pequeñas dimensiones y libre de defectos, como en tamaño estructural. En el primer caso, se reportaron altas correlaciones ($r=0,95$) entre el módulo de elasticidad estático y el dinámico obtenido por método de vibración longitudinal para *Eucalyptus delegatensis* (Ilic 2001).

En el segundo caso, el método de análisis de vibraciones, las técnicas de ultrasonidos, rayos X, han sido adoptadas por la industria por su rapidez y alta correlación con las propiedades mecánicas de la madera (Franca et al. 2019). En particular, el método de vibración longitudinal ha sido reportado como la técnica NDT que ofrece la predicción más cercana del módulo de elasticidad de madera de *Pinus radiata* de España (Arriaga et al. 2014) y de *Pinus Pinaster* de Portugal (Martins et al. 2017). Adicionalmente, se han encontrado altas correlaciones ($r=0,86$) entre módulo de elasticidad estático y módulo de elasticidad dinámico obtenido mediante técnicas de vibración longitudinal, para vigas *Eucalyptus grandis* argentino (Piter 2003).

El objetivo principal de este trabajo es proponer las ecuaciones de predicción del módulo de elasticidad estático a partir de mediciones de frecuencia natural de vibración longitudinal en vigas de madera de pino y eucalipto de Uruguay. Se prevé que estas ecuaciones sean incluidas como un parámetro complementario para la clasificación visual estructural.

2. MATERIAL Y METODOLOGÍA

El material estudiado corresponde a dos muestras comerciales de vigas de tamaño estructural de las dos especies más comúnmente utilizadas con fines estructurales en Uruguay: *Eucalyptus grandis*, y *Pinus elliottii*. Todas las vigas fueron cepilladas en sus cuatro caras y equilibradas a un contenido de humedad ambiente de aproximadamente 16%, en el



Departamento de Proyectos Forestales del LATU. La primera muestra (MF), constituida por 86 vigas de eucalipto, de sección 30 mm x 90 mm, que fue clasificada visualmente como EF1 de acuerdo con los lineamientos de la norma UNIT 1262 (UNIT 2018). La segunda (MC), compuesta por 72 vigas de pino, de sección 50 mm x 150 mm, fue clasificada en dos calidades visuales, obteniéndose 51 y 21 piezas clasificadas como EC0 y EC1, respectivamente, según la norma UNIT 1261 (UNIT 2018), tal y como se describe en la Tabla 1. Para cada viga, se registraron las dimensiones reales promedio (anchura, altura y luz); la masa con una balanza electrónica de 0,1 g de precisión (Mettler Toledo), y el contenido de humedad con xilohigrómetro de resistencia eléctrica (Lignomat) de acuerdo con la norma UNE-EN 13183-2 (AENOR 2002). La densidad aparente (ρ) de cada viga se calculó como el cociente entre su masa y su respectivo volumen.

Tabla 1: Muestras de estudio

Muestra	Especie	Sección (mm ²)	Norma	Calidad visual	Nº probetas	CH (%)
1	<i>E. grandis</i>	30x90	UNIT 1262	EF1	18	13.2
2	<i>E. grandis</i>	30x90		Rechazo	68	12.5
3	<i>P. elliotii</i>	50X150	UNIT 1261	EC0	51	11.5
4	<i>P. elliotii</i>	50X150		EC1	21	11.4
5	<i>P. elliotii</i>	50X150		EC0+EC1	72	11.5

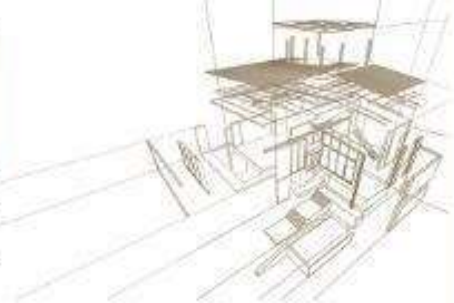
2.1 Ensayos de vibración

Luego de clasificadas visualmente, las vigas de las dos muestras fueron ensayadas mediante técnicas de análisis de vibraciones para estimar el módulo de elasticidad dinámico. La metodología consiste en excitar mecánicamente una testa de la viga a través de un impacto mecánico que provoca la propagación de ondas mecánicas a través de la longitud de la misma. Con un acelerómetro se adquiere en la otra testa de la viga las señales de aceleración en función del tiempo, que arriban debido a esa propagación. Para obtener la frecuencia de vibración longitudinal de cada viga se tuvieron en cuenta las normas ASTM E1876 (2015) y ASTM C215 (2014), que contemplan la geometría de las vigas analizadas. Tal y como contemplan dichas normas, donde el eje nodal en la vibración longitudinal ocurre en el centro de la viga, y con el fin de evitar el acoplamiento con otros tipos de vibraciones, las vigas fueron apoyadas en su centro, de forma transversal a su eje longitudinal, el apoyo se materializó con un material elástico.

Este procedimiento se llevó a cabo conectando el acelerómetro a un osciloscopio modelo DS1M12 que, a través del software “EasyScopeII”, permitió que las señales temporales de aceleración fueran adquiridas cada 0.2 ms. Estas señales fueron procesadas con software de análisis numérico para la obtención del espectro en frecuencias a través de la aplicación de la transformada rápida de Fourier (FFT).

Los valores de frecuencia obtenidos mediante este método de vibración longitudinal, fueron usados para el cálculo del módulo de elasticidad dinámico, aplicando la ecuación 1 y teniendo en cuenta un factor de corrección por la humedad de la velocidad de $1/(1.12-\omega)$ con respecto al 12% (ω) de referencia.

$$E_{dyn} = \rho v^2 = \rho (2 l f)^2 \quad (1)$$



donde, E_{dyn} es el módulo de elasticidad dinámico; ρ es la densidad (kg/m^3); v es la velocidad de transmisión de la onda (m/s); l es la longitud de la viga (m) y f es la frecuencia de vibración (Hz).

2.2 Ensayos estáticos

Inmediatamente después de la realización de los ensayos de vibraciones, todas las vigas fueron ensayadas a flexión estática de cuatro puntos de acuerdo con la norma UNE-EN 408:2011, en tramo el elástico de comportamiento. Los ensayos fueron realizados hasta lograr una carga máxima de aproximadamente el 40% de la carga de rotura estimada, la cual fue estimada previamente a partir de 10 vigas de cada muestra ensayadas hasta la rotura. Para ello se utilizó una máquina universal Minebea con una celda de carga de 250 kN y con capacidad para aplicar cargas a velocidad constante. La deformación fue medida con dos extensómetros ubicados en el eje longitudinal y según el canto de la pieza. Para cada viga se calculó el módulo de elasticidad local (E_m) en flexión a partir de la ecuación del módulo de elasticidad global (2) y considerando el valor de $G=E/16$.

$$E_m = \frac{3aL^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb} \right)} \quad (2)$$

donde, a es la distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo (mm); L es la luz de ensayo (mm); b y h son base y altura (mm), respectivamente; G es el módulo de elasticidad transversal, calculado como $E_m/16$ (UNE-EN 384:2016) $F_2 - F_1$ es el incremento de carga en la línea recta de regresión entre el 10% y 40% de la carga máxima estimada (N), y $w_2 - w_1$ es el incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$ (mm).

El módulo de elasticidad y la densidad se ajustaron al 12% de contenido de humedad de referencia de acuerdo con UNE-EN 384:2016.

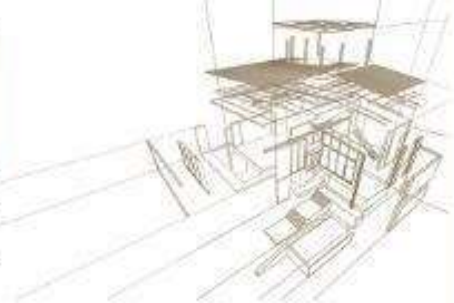
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. ENSAYOS ESTÁTICOS

En la Tabla 2 se presentan los valores promedios del módulo de elasticidad obtenido de los ensayos estáticos y de la densidad para las muestras analizadas. Se presentan los datos en según la calidad visual asignada a la muestra y corregidos al 12 % de contenido de humedad de referencia.

Tabla 2: Valores medios del módulo de elasticidad y la densidad por muestra, corregidos al 12% de contenido de humedad

Muestra	Especie	Calidad visual	$E_{m,12}$ (N/mm^2)	ρ_{12} (kg/m^3)
1	<i>E. grandis</i>	EF1	14.12	599.8
2	<i>E. grandis</i>	Rechazo	11.84	528.6
3	<i>P. elliotii</i>	EC0	6.07	403.0
4	<i>P. elliotii</i>	EC1	6.79	399.0
5	<i>P.elliotii</i>	EC0+EC1	6.29	401.0



Como se puede observar, las propiedades de la madera de eucalipto son mayores a las de pino. En una comparación entre las calidades visuales de cada especie mediante un estudio de diferencias significativas mediante un análisis ANOVA, se encontraron diferencias significativas entre los valores de módulo de elasticidad y densidad de la madera clasificada como EF1 y Rechazo en el eucalipto. Sin embargo, los valores de módulo de elasticidad y densidad de las calidades EC1 y EC0 en el pino no muestran diferencias significativas, considerando así que estos valores son similares.

3.2. ENSAYOS DINÁMICOS

En la Tabla 3 se muestran los valores promedio de la frecuencia longitudinal medida para cada muestra y calidad visual, así como el valor promedio del módulo de elasticidad dinámico (E_{dyn}) corregido al 12 % de contenido de humedad.

Tabla 3: Valores medios de frecuencia natural y del módulo de elasticidad dinámico por muestra, corregidos al 12% de contenido de humedad

Muestra	Especie	Calidad visual	f (Hz)	$E_{dyn_{12}}$ (N/mm ²)
1	<i>E. grandis</i>	EF1	1389.8	14.64
2	<i>E. grandis</i>	Rechazo	1331.4	12.31
3	<i>P. elliotii</i>	EC0	635.2	5.93
4	<i>P. elliotii</i>	EC1	667.9	6.89
5	<i>P. elliotii</i>	EC0+EC1	645.2	6.22

3.3. RELACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS ESTÁTICOS Y DINÁMICOS

3.3.1. *Eucalyptus grandis*

Los resultados mostraron una buena correlación entre el módulo de elasticidad estático y dinámico en la madera de eucalipto. La Figura 1 muestra un coeficiente de correlación de 0,91 en la totalidad de la población de eucalipto (86 vigas de calidades EF1 y rechazo). Curiosamente, el coeficiente de determinación para la madera clasificada como EF1 disminuye ligeramente, tomando un valor de $R^2=0,89$ (Figura 2).

En base a estos resultados, la ecuación de estimación del módulo de elasticidad estático en función del dinámico en la madera de eucalipto clasificada como EF1 se podría representar como (3):

$$E_m = 0,87 E_{dyn} + 1,78 \quad (R^2=0,89) \quad (3)$$

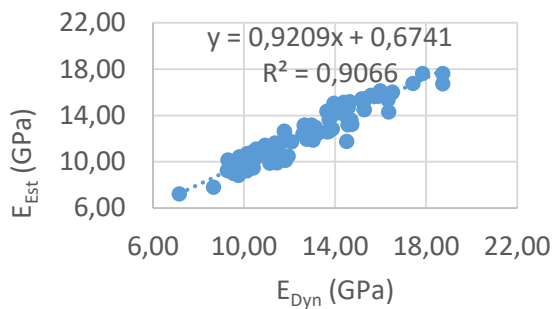
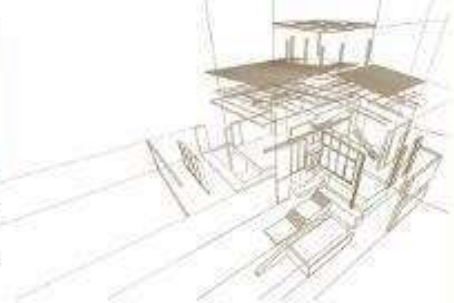


Figura 1: Correlación entre el E_{dyn} y el E_{est} en la población de eucalipto (EF1+Rechazo)

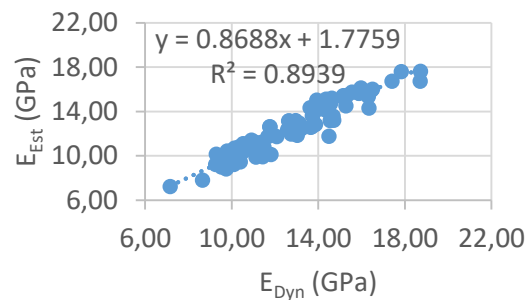


Figura 2: Correlación entre el E_{dyn} y el E_{est} en la muestra de eucalipto clasificada como EF1

3.3.2. Pinus elliottii

Las correlaciones entre el módulo de elasticidad dinámico y estático obtenidas en la madera de pino son también altas y se presentan en las Figuras 3 y 4. El coeficiente de determinación para la totalidad de la población (EC0+EC1) es de 0,93, y valores muy similares en los coeficientes de determinación de la madera clasificada como EC0 ($R^2=0,96$) y EC1 ($R^2=0,95$).

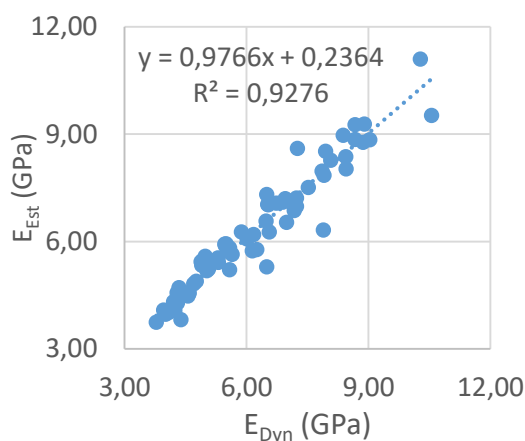


Figura 3: Correlación entre el E_{dyn} y el E_{est} en la población de pino (EC0+EC1)

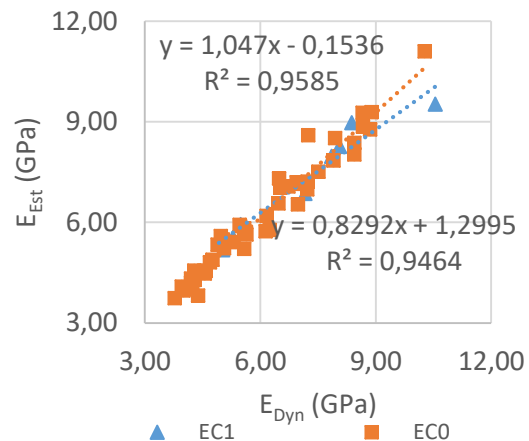


Figura 4: Correlación entre el E_{dyn} y el E_{est} en las muestras clasificadas como EC0 y EC1

En base a estos resultados, la ecuación genérica para ambas calidades de pino (EC1+EC0), de estimación del módulo de elasticidad estático en función del dinámico se podría representar como (4):

$$E_m = 0,98 E_{dyn} + 0,24 \quad (R^2=0,93) \quad (4)$$

3.3.3. Modelos de regresión con varias variables independientes

Con el fin de buscar otros parámetros predictores del módulo de elasticidad estático, se estudió la correlación entre este y la velocidad de transmisión de onda (v) y la densidad (ρ) en la madera de pino. La Tabla 4 presenta los valores del coeficiente de determinación en la madera pino, mostrando que la correlación con la velocidad de onda no es tan buena como con



el módulo de elasticidad dinámico. Con respecto a la relación con la densidad para esta especie, muestra valores de R^2 de 0.32, lo que indica un grado de dependencia y linealidad entre ambas variables, valores similares a los obtenidos por Hermoso et al. (2007) para *pino radiata* de procedencia española ($R^2=0,39$).

Tabla 4: Coeficiente de determinación (R^2) para correlaciones lineales entre E_m y varias variables independientes en pino

CALIDAD	VARIABLE DEPENDIENTE	VARIABLE INDEPENDIENTE	R^2
EC1	E_m	v	0.74
		ρ	0.43
EC0	E_m	v	0.84
		ρ	0.21
E_m : módulo de elasticidad estático; v: velocidad de onda; ρ : densidad			

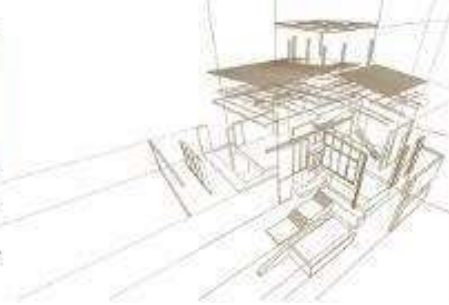
La asignación de la clase resistente a la madera de pino uruguayo está limitada mayormente por la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad (Moya et al. 2017).

Dado que en la madera de eucalipto se habían registrado datos de los parámetros visuales, se generaron modelos de regresión lineal usando el módulo de elasticidad estático (E_m) como variable dependiente y los valores de velocidad de onda (v), densidad (ρ), módulo de elasticidad dinámico (E_{dyn}), diámetro de nudo mayor en la cara (D), diámetro de nudo mayor en el canto (d) y desvío de fibra (df) como variables independientes. También se evalúa la resistencia a flexión (f_m), en comparación con las variables independientes descritas anteriormente.

En la Tabla 5 se muestran los resultados, correspondiente a la calidad EF1 de eucalipto, de correlaciones lineales entre el módulo de elasticidad estático y la resistencia a flexión, y las variables independientes (explicitadas en tabla anterior).

Tabla 5: Coeficiente de determinación para las variables independientes f_m y E_m para EF1

CALIDAD	VARIABLE DEPENDIENTE	VARIABLE INDEPENDIENTE	R2
EF1	E_m	v	0.31
		ρ	0.36
		$E_{dyn}+D$	0.90
		$E_{dyn}+d$	0.90
		$\rho+D+d+df$	0.70
		$E_{dyn}+D+df$	0.91



		E_{dyn}	0.001
	f_m	E_{dyn+D}	0.18
		$E_{dyn+D+df}$	0.25

Se puede observar que la inclusión de parámetros visuales en el modelo de regresión para la madera de eucalipto apenas mejora la correlación con el módulo de elasticidad estático. Se incrementa el valor de R^2 de 0,89 a 0,90 introduciendo parámetros de diámetros de nudo de cara o de canto. Con respecto a la correlación con la densidad, se obtuvo un R^2 de 0.36, lo que indica una baja correlación entre el módulo elástico dinámico y la densidad.

La correlación entre E_m y ρ es similar a la obtenida en otras frondosas, como es el caso de castaño de procedencia española, donde se obtuvo un valor de R^2 de 0,47. Sin embargo, la correlación entre E_m y ρ obtenida en la madera de eucalipto uruguayo fue mayor que la obtenida en madera de castaño, que presentó un valor de $R^2=0,67$ entre E_m y E_{dyn} , obtenido por el método de vibración. Con el fin de intentar predecir la resistencia a flexión para esta especie, se realizó una comparativa entre la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad, observándose que no existe correlación entre ambos para las muestras estudiadas, con valores de $R^2=0.001$ entre f_m y E_{dyn} . Incluyendo los parámetros visuales como, el R^2 aumento a 0.25 para la combinación de $E_{dyn+D+df}$.

La dificultad en la predicción de f_m a partir del módulo de elasticidad ha sido ampliamente reportada (Franca et al. 2019) y atribuida a la presencia y ubicación de las singularidades de la madera (Falk et al. 1990). Por este motivo, se estima necesario realizar mayor número de ensayos y buscar indicadores que permitan predecir la resistencia a flexión de la madera de eucalipto a partir de técnicas no destructivas y parámetros visuales.

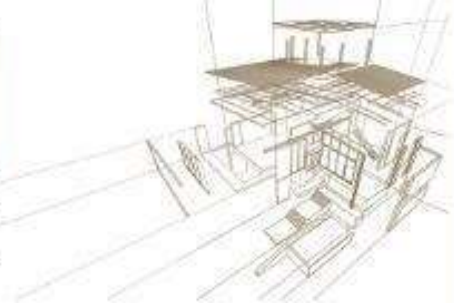
4. CONCLUSIONES

Se calculó el módulo de elasticidad estático, obtenido a partir de ensayos de flexión en cuatro puntos, y el módulo de elasticidad dinámico obtenido a partir de la frecuencia de vibración longitudinal medida con acelerómetros. Los resultados, corregidos al contenido de humedad del 12%, permitieron obtener las ecuaciones lineales que posibilitan estimar el módulo estático a partir del dinámico para ambas especies: *Pinus elliottii* y *Eucalyptus grandis* y para las distintas calidades, mostrando buena correlación entre ellos.

Las correlaciones entre el módulo de elasticidad estático y dinámico mostraron valores similares entre las diferentes calidades de madera, estando R^2 en el entorno de 0.9. Posibilitando una buena estimación del módulo elástico estático mediante un método de medición de la vibración longitudinal, independientemente a la calidad de la madera.

El método de vibración aplicado resulta ser altamente eficiente para obtener el módulo elástico dinámico en ambas especies, siendo de fácil aplicación en un aserradero, evitando de esta forma un procedimiento de ensayo en prensa más lento.

Dado que el módulo de elasticidad es el parámetro que determina la clase resistente en la madera de pino uruguayo, la clasificación mecánica mediante técnicas no destructivas de vibración resultaría ser un buen método para la determinación de uno de los parámetros que afectan la clase resistente en esta especie.



En la madera de eucalipto, la clase resistente está limitada principalmente por la resistencia a flexión, por lo que asignar dicha clase sólo en base al módulo de elasticidad dinámico no estaría del lado de la seguridad.

Se estudió la correlación entre distintas variables independientes y la resistencia a flexión de las vigas de eucalipto, encontrándose una baja correlación lineal entre ellos.

Este trabajo supone una primera aproximación a la estimación de las propiedades mecánicas de las especies de pino y eucalipto uruguayos en base a mediciones realizadas con técnicas no destructivas, siendo necesario continuar los trabajos de investigación en esta línea con el fin de poder incluirlos en la norma de clasificación estructural.

AGRADECIMIENTOS

A la Ing. Agr., Mag. Alicia Sánchez y al Téc. Ignacio Torino por su ayuda a la hora de realizar los ensayos correspondientes en prensa y horno en el LATU.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arriaga, F., Monton, J., Segues, E., Iñiguez-González, G. (2014). Determination of the mechanical properties of radiata pine timber by means of longitudinal and transverse vibration methods. *Holzforschung* 68(3):299-305.

American Society for Testing and Materials ASTM E1876: 2015. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. US.

American Society for Testing and Materials ASTM C215 (2014). Standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional resonant frequencies of concrete specimens. ASTM International. West Conshohocken, PA.

Baño, V.; Domenech, L.; Godoy, D.; Sánchez, A.; Quaglioti, S.; Moya, L. (2018) Informes Técnicos de Normalización de Madera Estructural. Informe 2: madera aserrada de *Eucalyptus grandis*. ISBN:978-9974-0-1573-9. Montevideo, Uruguay

Baño, V., Mazzei, C., Moya, L., Dieste, S. (2018). Diseño de puentes realizados con madera de procedencia local para el paso de vehículos pesados en el sector agrícola y forestal. Informe Técnico. Serie FPTA-INIA, Uruguay. ISSN: 1688-924X.

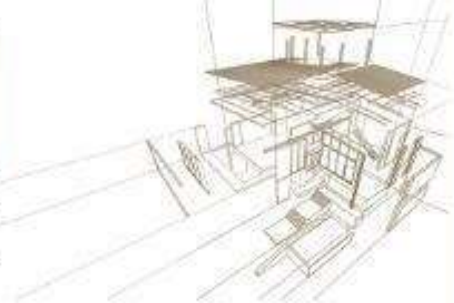
Brashaw, B.K., Bucur, V., Divos, F., Goncalves, R., Lu, J., Meder, R., Pellerin, R.F., Potter, S., Ross, R.J., Wang, X., Yin, Y. (2009). Nondestructive testing and evaluation of wood: A worldwide research update. *Forest Prod. J.* 59(3): 7-14.

Cavalheiro, R. S., de Almeida, D. H., de Almeida, T. H., Christoforo, A. L., Rocco Lahr, F.A. (2018). Estimation of modulus of elasticity in static bending of Wood in structural dimensions as a function of longitudinal vibration and density. *Current Journal of Applied Sc and Technology* 26(1):1-8.

Comité Europeo de Normalización CEN - EN 408 (2010) Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization. Bélgica.

Comité Europeo de Normalización CEN, EN 16929 (2018). Test Methods. Timber floors. Determination of vibration properties Contents European Committee for Standardization. Bélgica.

Falk, R.H., Patton-Malory, M., McDonald, K.A. (1990). Non-destructive testing of wood products and structures: State of the art and research needs. 137-147 in Proc. Conf. Non-destructive testing and evaluation for manufacturing and construction, August 9-12, 1988.



- Fernández Llana, D. (2016). Influencia de factores físicos y geométricos en la clasificación estructural de la madera mediante técnicas no destructivas. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.
- Franca, F.J.N, Seale, R.D., Shmulsky, R., Franca, T.S.F.A. (2019). Assessing southern pine 2 x 4 and 2 x 6 lumber quality: longitudinal and transverse vibration. *Wood Fiber Sc.* 51(1): 1-14.
- Hermoso E., Carballo J. and Fernández-Golfín J.I. (2007) Caracterización estructural de la madera de *Pinus radiata* D. Don del País Vasco (España) acorde a las modificaciones normativas. *Maderas. Ciencia y tecnología* 9(3): 223-232.
- Ilic, J. (2001). Variation of the dynamic elastic modulus and wave velocity in the fibre direction with other properties during the drying of *Eucalyptus*. *Wood Sci Technol* 35:157-166.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas UNIT 1261 (2018). Madera aserrada de uso estructural. Clasificación visual. Madera de pino taeda y *pinus elliottii* (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*).
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas UNIT 1262 (2018). Madera aserrada de uso estructural. Clasificación visual. Madera de eucalipto (*Eucalyptus grandis*).
- Martins, C. E. J., Dias, A. M. P. G., Marques, A. F. S., and Dias, A. M. A. (2017). "Non-destructive methodologies for assessment of the mechanical properties of new utility poles," *BioRes.* 12(2), 2269-2283.
- Moya, L.; Domenech, L.; Cardoso, A.; O'Neill, H. y Baño, V. (2017) Proposal of visual strength grading rules for Uruguayan pine timber, *Eur. J. Wood Wood Prod.* 75 p.1017–1019 doi:10.1007/s00107-017-1208-5.
- Norma Brasileira NBR 15521 (2007). Ensaio não destrutivo- ultra-som- classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledóneas. 8p. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Norma Española UNE-EN 384:2016 Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.
- Norma Española UNE-EN 13183-1/AC (2004). Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa.
- Norma Española UNE- EN 13183-2 (2002). Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Determinación por el método de resistencia eléctrica.
- Norma Española UNE- EN 408 :2011 Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.
- Norma Española UNE EN 14081-1 (2016). Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales.
- Piter, J.C. (2003). Clasificación por resistencia de la madera aserrada como material estructural. Desarrollo de un método para el *Eucalyptus grandis* de Argentina. Tesis doctoral, Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ingeniería., La Plata.
- Vega, A. (2013). Caracterización estructural de madera de castaña sativa Mill. Clasificación visual y evaluación mediante métodos no destructivos. Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, E.P.S., Lugo.