



Maderas. Ciencia y Tecnología

ISSN: 0717-3644

anantias@ubiobio.cl

Universidad del Bío Bío

Chile

Fank, Pamela Y.; Stefani, Pablo M.; Piter, Juan C.  
CLASIFICACIÓN MECÁNICA DE TABLAS DE PINOS RESINOSOS CULTIVADOS EN  
EL NORDESTE DE ARGENTINA

Maderas. Ciencia y Tecnología, vol. 19, núm. 3, 2017, pp. 247-264

Universidad del Bío Bío

Concepción, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48552028001>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# CLASIFICACIÓN MECÁNICA DE TABLAS DE PINOS RESINOSOS CULTIVADOS EN EL NORDESTE DE ARGENTINA

## MACHINE STRENGTH GRADING OF BOARDS OF RESINOUS PINES CULTIVATED IN THE NORTHEAST OF ARGENTINA

*Pamela Y. Fank<sup>1</sup>, Pablo M. Stefani<sup>2</sup>, Juan C. Piter<sup>3,\*</sup>*

### RESUMEN

En este artículo se presentan y discuten los resultados de una investigación orientada al análisis de modelos mecánicos para clasificar por resistencia tablas de pino resinoso cultivado en el nordeste de Argentina. El programa experimental se llevó a cabo según los lineamientos de las normas europeas EN sobre una muestra de 233 tablas de tamaño estructural ensayadas a flexión y sobre otra conteniendo 100 tablas ensayadas en tracción paralela a las fibras. Se diseñaron dos modelos, uno empleando el módulo de elasticidad global como parámetro simple y otro basado en un parámetro combinado que incluyó al módulo de elasticidad junto a la densidad y la nudosidad. Los resultados mostraron una mayor eficiencia en los modelos desarrollados que en el método visual adoptado por la norma IRAM. Esa mayor eficiencia se puso de manifiesto en i) el alcance de los valores característicos adoptados para las propiedades principales en la normativa vigente; ii) un aumento del rendimiento en los grados estructurales y, iii) una disminución de la dispersión en los valores del módulo de elasticidad dentro de cada clase resistente, lo cual permite estar en línea con la variabilidad adoptada por las reglas de diseño estructural del país.

**Palabras clave:** Clasificación por resistencia, madera aserrada, *Pinus taeda*, *Pinus eliottii*, resistencia, rigidez.

### ABSTRACT

The present paper reports the results of an investigation regarding the analysis of models for machine strength grading boards of resinous pine cultivated in the northeast of Argentina. An empirical research project with one sample containing 233 boards in structural sizes subjected to static bending and one sample enclosing 100 boards subjected to tension was carried out according to the European standards. One model based on a single parameter (modulus of elasticity) and another one based on a combined parameter (modulus of elasticity + density + knot ratio) were designed. Results showed that the efficiency of both models was higher than that of the visual method adopted by the standard IRAM. The high efficiency of both models was made evident by: i) the achievement of the characteristic values adopted by standards for the main properties; ii) an increase of the yield in the structural grades and, iii) a decrease of the spread results for modulus of elasticity within each strength class, which makes it possible to satisfy the variability requirements adopted by the national design rules.

**Keywords:** *Pinus taeda*, *Pinus eliottii*, sawn timber, strength grading, strength, stiffness.

<sup>1</sup>Becaria doctoral CONICET, Grupo de Estudio de Maderas (GEMA), Dep. Ing. Civil, Facultad Regional C. del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional, Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina.

<sup>2</sup>ECOMATERIALES-INTEMA-CONICET, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

<sup>3</sup>Grupo de Estudio de Maderas (GEMA), Dep. Ing. Civil, Facultad Regional C. del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional, Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina.

\*Autor para correspondencia: piterj@frcu.utn.edu.ar

Recibido: 21.07.2016 Aceptado: 08.03.2017

## INTRODUCCIÓN

La superficie de bosques cultivados en Argentina alcanza aproximadamente 1,12 millones de hectáreas de las cuales el 64 % está constituido por coníferas, el 23 % por eucaliptos, el 9 % por salicáceas y el 4 % restante por otras de menor entidad (Dirección de Producción Forestal 2016). El 78 % de los bosques de coníferas (560000 hectáreas) se ubica en el nordeste del país, en las provincias de Misiones y Corrientes, destacándose las especies *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* (SIFIP 2009). Estas especies de rápido crecimiento se explotan en ciclos cortos de rotación, comprendidos generalmente entre 18 y 30 años (Chifarelli 2008), y proveen aproximadamente 3 millones de m<sup>3</sup> de madera aserrada por año, equivalente a un 50 % del total producido en Argentina (Dirección de Producción Forestal 2016). Se comercializan en forma conjunta bajo la denominación de pino resinoso debido a que no resulta posible distinguirlas en forma práctica y a que no se ha comprobado una diferencia significativa entre sus propiedades físico-mecánicas. Consecuentemente, las reglas nacionales de diseño estructural (CIRSOC 601 2016) también las consideran como un grupo de especies.

La madera estructural de pino resinoso del nordeste del país se elabora con distintas escuadrías, dentro de las cuales se destacan las tablas destinadas tanto a su uso directo como a la fabricación de madera laminada encolada estructural (en adelante MLEE). Con el propósito de normalizar la utilización de este material para los dos destinos mencionados, la norma IRAM 9662-3 -en su primera edición del año 2006- adoptó un método visual de clasificación por resistencia que permite asignar las tablas a dos grados estructurales. Esta norma fue revisada y publicada nuevamente en el año 2015 sin cambios sustanciales, por lo cual en adelante será citada con el año de esta última edición. En línea con el criterio europeo (EN 384 2010), la norma IRAM 9662-3 (2015) provee los valores característicos de las propiedades consideradas fundamentales para el diseño estructural: la resistencia y el módulo de elasticidad -obtenidos del ensayo de flexión-, y la densidad. Considerando que las tablas son también utilizadas para la fabricación de MLEE, y que existe una estrecha relación entre el comportamiento mecánico de este producto y la resistencia a tracción paralela a las fibras de las tablas que lo componen (EN 14080 2013), la norma también provee el valor de la resistencia característica a tracción.

Si bien la adopción del método visual contribuyó a mejorar el uso estructural de este material, existen actualmente dos problemas que atentan contra la confiabilidad requerida por las reglas de diseño. Uno se refiere a las dificultades que existen para medir parámetros visuales de importancia, lo que origina errores y desalienta la aplicación del método. En este aspecto es de destacar la complejidad que presenta la evaluación de la nudosidad en la madera cercana a la médula, la que se incrementa ante la ausencia de tratamientos silviculturales. El otro problema se relaciona a que la aplicación del método visual frecuentemente no permite alcanzar el valor medio del módulo de elasticidad adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015) para la clase superior (12000 N/mm<sup>2</sup>), sobre lo cual se han publicado resultados experimentales (Fank *et al.* 2014). A este último problema puede atribuirse una particular importancia debido a sus consecuencias negativas sobre el desempeño de este material, ya que los valores de sus propiedades fueron incorporados a las reglas de diseño estructural (CIRSOC 601 2016).

La existencia de bajos valores del módulo de elasticidad en madera de pino resinoso también ha sido reportada para cultivos ubicados en regiones cercanas al nordeste de Argentina. Moya *et al.* (2015) la informan para las mismas especies forestadas en la República Oriental del Uruguay, Ballarin y Lara Palma (2003) para el *Pinus taeda* de Brasil, y Ramos *et al.* (2015) para el *Pinus elliottii* cultivado en la Provincia de Entre Ríos, Argentina. La presencia de madera juvenil en la zona cercana a la médula de estas especies de rápido crecimiento puede explicar la baja rigidez encontrada, pues la capa S<sub>2</sub> de la pared secundaria (Hoffmeyer 1995) presenta en la madera juvenil una mayor inclinación de las microfibrillas que en la madera normal (Cave y Walker 1994, Donaldson 2008, Yin *et al.* 2011).

El diseño de un método mecánico de clasificación por resistencia emerge como un medio adecuado para potenciar el avance que significó en 2006 la adopción del método visual aún vigente, y superar los problemas que actualmente presenta su implementación. La experiencia internacional ha probado que los métodos basados en parámetros mecánicos de elevada eficiencia (Glos 1995) permiten alcanzar grados de calidad y rendimientos mayores que los visuales, mejorando la confiabilidad del material y su potencial técnico-económico (Diebold y Glos 1994, Sauter y Diebold 1997). La incorporación de la clasificación mecánica como un medio de garantizar la calidad de la madera estructural y alcanzar

una mayor homogeneidad en la rigidez recibió un importante impulso en Brasil durante la última revisión de la norma NBR 7190 (ABNT 2010). Este documento destaca la conveniencia de clasificar mecánicamente la madera de coníferas y reconoce las ventajas de incorporar este proceso admitiendo una significativa mejora en los valores de cálculo de las propiedades. En Argentina no hay empresas que utilicen actualmente procesos de clasificación mecánica, pero factores de naturaleza técnica y política han generado un ambiente propicio para su implementación en el mediano plazo, y por lo tanto justifican su estudio. Dentro de los primeros se destacan actividades llevadas a cabo en los últimos años entre el sector científico-tecnológico y el productivo, que permitieron editar modernas normas referidas al estudio de la madera estructural (IRAM 9663 2013, IRAM 9664 2013) y a los procesos de fabricación y control de la madera laminada encolada (IRAM 9660-1 2015, IRAM 9660-2 2015, IRAM 9661 2015, IRAM 9662-1 2015, IRAM 9662-2 2015, IRAM 9662-3 2015, IRAM 9662-4 2015). Dentro de los segundos se destaca la redacción en el año 2013 del primer Reglamento Argentino de Estructuras de Madera y la reciente aprobación de una edición actualizada del mismo (CIRSOC 601 2016) por parte de la Secretaría de Obras Públicas de la Nación, la cual a su vez invitó a las provincias y municipalidades a actualizar los códigos de edificación que rigen sus obras públicas y privadas. Este impulso nacional se complementa con programas provinciales que promueven el uso de la madera en la construcción.

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes tipos de máquinas para clasificar la madera estructural (Diebold 1997, Görlacher 1997). El módulo de elasticidad ha sido el parámetro simple más empleado en la clasificación mecánica debido a su elevada correlación con la resistencia (Fernández-Golfín Seco *et al.* 2001, Green y Kretschmann 1997). Las máquinas más sencillas son las que determinan el valor promedio del módulo de elasticidad sobre longitudes comprendidas entre 0,5 m y 1,2 m. Durante el pasaje de la pieza, la máquina (bending machine) aplica una fuerza constante y registra la deformación a intervalos regulares, o provoca una deformación constante y registra la fuerza aplicada.

El desarrollo de nuevas técnicas para determinar el valor del módulo de elasticidad sin deformar mecánicamente la pieza, tales como la aplicación de vibraciones flexionales o longitudinales (Görlacher 1984, Ilic 2001), ultrasonidos, microondas, entre otros, ha hecho posible clasificar piezas con importantes dimensiones en su sección transversal (Blaß y Görlacher 1996). Por su parte, la incorporación de otros parámetros tales como la densidad y la nudosidad en combinación con el módulo de elasticidad, aumenta la correlación de este último con la resistencia y logra una alta eficiencia en el proceso (Dávalos-Sotelo y Limón-Godina 2009, Glos 1995, Glos y Diebold 1994, Hanhijärvi y Ranta-Maunus 2008). En los últimos años se han publicado resultados de investigaciones donde se aplican estas nuevas técnicas a la clasificación por resistencia de diversas especies y zonas de cultivo, y en particular a tablas destinadas a la fabricación de MLEE. Roblot *et al.* (2010) reportan resultados de un método que utiliza el scanner óptico para detectar la nudosidad en las cuatro caras de la pieza, aplicado con éxito en tablas de Douglas-fir y Spruce de Francia. Dowse y Wessels (2013) aplicaron distintas técnicas no destructivas a tablas de *Pinus patula* de Sudáfrica. Informan que el módulo de elasticidad dinámico determinado por medio de la frecuencia acústica es el parámetro mejor correlacionado con la resistencia, y que su eficiencia se optimiza combinándolo con la densidad y la nudosidad. Denzler y Weidenhiller (2014) determinaron la inclinación de las fibras por medio de microondas en madera de Spruce europeo. Cagno *et al.* (2014) aplicaron técnicas de ultrasonido a piezas de *P. taeda* y *elliottii* de Uruguay para determinar el módulo de elasticidad, y reportan que este parámetro combinado con la densidad y la nudosidad incrementa la capacidad para predecir la resistencia. Ehrhart *et al.* (2016) combinaron técnicas visuales y mecánicas para optimizar la clasificación de tablas de Haya cultivada en Suiza. Reportan que la nudosidad, combinada con el módulo de elasticidad dinámico determinado por vibraciones longitudinales, potencia la predicción de la resistencia a tracción de las láminas destinadas a la fabricación de MLEE.

El objetivo de este trabajo es presentar y discutir modelos mecánicos para clasificar por resistencia las tablas de pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*) cultivado en el nordeste de Argentina, con el propósito de mejorar la eficiencia lograda aplicando el método visual adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Obtención del material y preparación de los cuerpos de prueba

El material fue suministrado por una empresa ubicada en la Provincia de Misiones, Argentina, y provino de una plantación de *P. taeda* con 30 años de edad sometida a dos turnos de poda y de una de *P. elliottii* con 27 años de edad sin práctica de poda. Considerando que en el país la producción de tablas se realiza mayoritariamente con un espesor nominal de 25,4 mm y un ancho nominal variable entre 76,2 mm y 152,4 mm, se seleccionó un total de 333 piezas con sección transversal de dimensiones nominales 25,4 mm x 101,6 mm. Para lograr una adecuada representatividad de las dos especies que conforman el grupo denominado pino resinoso del nordeste de Argentina (IRAM 9662-3 2015), se tomaron aleatoriamente 166 piezas de *P. elliottii* y 167 de *P. taeda*. Luego de secado técnicamente hasta un contenido de humedad promedio de 12 %, el material fue trasladado al Laboratorio de Ing. Civil de la Facultad Regional C. del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional, donde fue identificado y cepillado.

Para desarrollar los modelos de clasificación mecánica se emplearon 116 tablas de *P. elliottii* y 117 de *P. taeda*, que conformaron la muestra destinada a los ensayos de flexión (Mf). Esta decisión responde a que en Argentina (IRAM 9664 2013), en línea con el criterio europeo (EN 384 2010), la resistencia y el módulo de elasticidad en flexión junto a la densidad son consideradas las propiedades fundamentales para el diseño estructural, y a partir de ellas pueden derivarse los valores de las restantes. 50 piezas de *P. elliottii* y 50 de *P. taeda* se integraron en una muestra preparada para ensayos de tracción (Mt). Ésta se destinó a chequear la eficiencia de los modelos mecánicos para clasificar tablas sometidas a tracción paralela, dada la importancia de estas propiedades en las láminas destinadas a la fabricación de MLEE según normas (EN 14080 2013; IRAM 9662-3 2015) y reportes de investigaciones (Colling 1995; Glos y Diebold 1994; Glos y Lederer 2000; Görlacher 1990; Piter *et al.* 2007).

Los cuerpos de prueba se prepararon siguiendo los lineamientos de las normas europeas (EN 408 2010; EN 384 2010). Luego de climatizados en una cámara con temperatura y humedad relativa ambiente de 20 +/- 2 °C y 65 +/- 5 %, respectivamente, se registraron sus dimensiones reales y sus características visuales. La Tabla 1 exhibe un detalle de las dos muestras preparadas para el trabajo experimental.

**Tabla 1.** Muestras preparadas para el programa empírico.

Muestra	Especie	Cantidad de cuerpos de prueba (n)	Dimensiones reales (promedio en mm)
Mf (destinada a ensayos de flexión)	<i>Pinus elliottii</i>	116	105,3 x 24,4 x 500
	<i>Pinus taeda</i>	117	
	Total Mf	233	
Mt (destinada a ensayos de tracción)	<i>Pinus elliottii</i>	50	105,3 x 24,4 x 1300
	<i>Pinus taeda</i>	50	
	Total Mt	100	

### Medición y registro de las singularidades

Teniendo en cuenta que un modelo mecánico puede estar basado en un parámetro combinado que incluye en su formulación a la nudosidad como una variable independiente, se midió esta singularidad y se registró su mayor valor en la zona sometida al máximo esfuerzo en cada cuerpo de prueba, o sea en el tercio central de las tablas destinadas a ensayos de flexión (Mf) y en la longitud libre entre mordazas en las tablas destinadas a ensayos de tracción paralela a las fibras (Mt). Se emplearon dos criterios de relevancia para este caso: i) el adoptado por el método visual vigente (en adelante IRAM), según el cual la dimensión de un nudo individual es la distancia entre las tangentes a él y paralelas al eje de la

pieza, y la nudosidad es la relación entre esa dimensión y el ancho de la superficie en la cual el nudo se manifiesta. Para un nudo de arista rige la menor de ambas relaciones. Para un agrupamiento de nudos en una misma sección o en una longitud de la tabla igual a su ancho, la nudosidad se expresa como la relación entre la suma (sin solapamientos) de las dimensiones de los nudos que lo conforman y el ancho de la cara o del canto donde se manifiestan; ii) el criterio denominado relación de nudo a área o “Knot Area Ratio” (KAR) aplicado a una sección transversal (KAR S) y a una longitud de la tabla igual a 150 mm (KAR 150). El primero de ellos (KAR S) expresa la nudosidad como el cociente entre el área de la proyección (sin solapamientos) de los nudos cortados por una sección transversal y el área de ésta. En el segundo (KAR 150), la nudosidad se calcula aplicando el criterio anterior a la proyección de todos los nudos existentes en una longitud de la pieza igual a 150 mm.

Considerando que este trabajo plantea desarrollar modelos mecánicos de clasificación que mejoren la eficiencia del método visual vigente, fue necesario clasificar según este último criterio las muestras investigadas. Con ese propósito se registraron las características (parámetros) visuales en la zona de cada cuerpo de prueba sometida al máximo esfuerzo, y cada cuerpo fue asignado a una clase resistente según los límites adoptados por la norma IRAM 9662-3 (2015). Los parámetros que definieron la clasificación fueron: i) la presencia de médula, que no se admite en la clase 1 pero puede existir en la clase 2; ii) la nudosidad, expresada como se describió en el párrafo anterior, cuyo límite es igual a 1/3 en la clase superior y a 2/3 en la clase 2 y; iii) el espesor de los anillos de crecimiento, que debe ser menor a 10 mm en la clase 1 y a 15 mm en la clase 2. La inclinación de las fibras no definió la clasificación pues fue en todos los casos menor al límite admitido en la clase 1 (1/9). No se registraron ataques biológicos, madera de reacción, grandes defectos ni fisuras de importancia. De acuerdo al objetivo del trabajo, no se consideraron defectos sin influencia sobre el comportamiento del material, tales como deformaciones. Resulta de interés efectuar una breve comparación del criterio de esta norma con el adoptado por otras de relieve internacional. La norma alemana DIN 4074-1 (2008) adopta 3 clases resistentes y difiere de la norma nacional en cuanto al criterio de medición y a los límites adoptados para los parámetros visuales. La norma AITC 117 (2010) vigente en EEUU, además de coincidir en las diferencias señaladas para la norma alemana, no restringe la presencia de médula en las tablas destinadas a la fabricación de MLEE. Este último criterio no es congruente con el comportamiento (ya descrito en la Introducción) de las especies de rápido crecimiento investigadas, ya que la presencia de madera juvenil en la zona cercana a la médula afecta significativamente sus propiedades mecánicas.

### **Ejecución de los ensayos y procesamiento de los resultados**

Las pruebas de flexión y tracción paralela a las fibras siguieron el procedimiento adoptado por la norma EN 408 (2010), pudiéndose apreciar su disposición en la Figura 1. Los ensayos de flexión de plano fueron ejecutados con las tablas de la Muestra Mf, las que fueron cargadas simétricamente en los tercios de la luz. Se utilizó una máquina de ensayos universales marca Emic de accionamiento eléctrico, con precisión igual al 1 % del valor aplicado hasta un máximo de 100 kN. En los puntos de apoyo y de carga se colocaron placas de acero de ancho no mayor que la mitad de la altura (h: espesor de la tabla) con el objeto de reducir el aplastamiento localizado de la madera. La velocidad de avance del cabezal de carga fue constante y provocó un desplazamiento menor a 0,003 h (mm) en la unidad de tiempo (s). Durante el período elástico se registraron las deformaciones empleando un comparador micrométrico con precisión de 0,01 mm ubicado en la parte inferior del centro de la luz. El ensayo continuó hasta alcanzar la rotura en el tiempo establecido (300 +/- 120 s), registrándose la carga máxima, el tiempo empleado en alcanzarla, y observaciones relevantes acompañadas de fotografías. La tensión de rotura ( $f_m$ ) y el módulo de elasticidad global ( $E_{m,g}$ ) se calcularon con las ecuaciones provistas por la norma EN 408 (2010).



**Figura 1.** Disposición general de los ensayos estáticos. Izq.: Flexión de plano. Der.: Tracción.

Los ensayos de tracción paralela a las fibras se llevaron a cabo con las tablas de la Muestra Mt, las que fueron ubicadas en la máquina con una longitud libre entre mordazas ( $l$ ) igual a 9 veces su ancho. Se utilizó una máquina de ensayos universales marca Shimadzu de accionamiento hidráulico, con precisión igual al 1 % de la carga aplicada hasta un máximo de 1000 kN. El valor del módulo de elasticidad se determinó adoptando una velocidad constante del cabezal de carga, la cual provocó un desplazamiento menor a 0,00005  $l$  (mm) en la unidad de tiempo (s). Para evitar los efectos de posibles distorsiones, las deformaciones en período elástico fueron registradas con dos comparadores micrométricos de precisión igual a 0,001 mm, colocados sobre los cantos opuestos en un segmento central de longitud igual a 5 veces el ancho de la tabla (Figura 1, Der). Después de esa etapa inicial, los ensayos fueron detenidos y reiniciados con una velocidad constante adecuada para lograr la rotura de la pieza en el tiempo establecido por la norma (300 +/- 120 s). Finalmente se registró la carga máxima, el tiempo empleado en alcanzarla y observaciones relevantes acompañadas de fotografías. La tensión de rotura ( $f_{t0}$ ) y el módulo de elasticidad ( $E_{t0}$ ) se calcularon empleando las ecuaciones provistas por la norma EN 408 (2010).

Inmediatamente después de finalizado cada ensayo se cortó un trozo libre de defectos cercano a la zona de rotura y que involucró a toda la sección transversal, el cual fue destinado a la determinación del contenido de humedad y de la densidad conforme a los lineamientos de las normas ISO 3130 (1975) e ISO 3131 (1975). Las medidas del trozo se registraron con un calibre de precisión de 0,01 mm y para la medición de las masas se empleó una balanza electrónica con capacidad para registrar 0,01 g. El secado del trozo hasta lograr su masa anhidra se realizó en estufa a una temperatura de 103 +/- 2 °C.

Con el fin de obtener resultados comparables, los valores de las propiedades fueron ajustados a las condiciones de referencia según la norma EN 384 (2010). Los valores de la resistencia se ajustaron a una altura/ancho de referencia de 150 mm, y los valores del módulo de elasticidad y de la densidad a un contenido de humedad del 12 %. Luego de corregidos a las condiciones de referencia, los resultados fueron procesados y para su presentación se seleccionó el valor medio como medida de centralidad y los valores mínimo y máximo, junto al coeficiente de variación, como medidas de dispersión. Técnicas de análisis de regresión lineal simple y múltiple permitieron conocer la naturaleza de la relación entre la resistencia a flexión y un parámetro simple o compuesto, respectivamente, y la cuantificación de esa relación se expresó por medio del coeficiente de correlación de Pearson ( $R$ ). El test de Student ( $t$ -test) fue empleado para determinar el nivel de significación del coeficiente de correlación ( $R$ ) y de la diferencia entre los valores medios de una propiedad en dos muestras.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contenido de humedad en los 233 cuerpos de prueba de la muestra Mf alcanzó un valor medio de 11,9 % con un coeficiente de variación (en adelante CV) igual a 9 %, lo cual confirma que los cuerpos de prueba se encontraban dentro del rango de humedad establecido por la norma EN 384 (2010) al momento de ser ensayados. Los principales resultados experimentales de las propiedades mecánicas y la densidad se presentan en la Tabla 2. Como estas propiedades son las más importantes para el diseño estructural en el país según IRAM 9664 (2013), en línea con el criterio europeo (EN 384 2010), estos resultados proveen un soporte indispensable para el diseño de los modelos mecánicos de clasificación.

A través del test de Student (*t*-test) se compararon los valores de  $f_m$ ,  $E_{m,g}$  y  $\rho$  obtenidos para la sub-muestra de *P. elliottii* (116 tablas) y la de *P. taeda* (117 tablas). Los resultados probaron que, a un nivel de significación de 0,05 (5 %), no puede ser rechazada la hipótesis de igualdad entre los valores medios de  $f_m$  y  $E_{m,g}$ , pero sí puede ser rechazada para  $\rho$ . Estos resultados confirman para las propiedades mecánicas, pero cuestionan para la densidad, el criterio de las normas de Argentina (IRAM 9662-3 2015; CIRSOC 601 2016) que consideran las dos especies en forma conjunta para uso estructural.

**Tabla 2.** Principales resultados de la tensión de rotura ( $f_m$ ), del módulo de elasticidad ( $E_{m,g}$ ) y de la densidad ( $\rho$ ) obtenidos para la muestra ensayada en flexión (Mf).

	$f_m^{(1)}$ (MPa)	$E_{m,g}^{(2)}$ (MPa)	$\rho^{(2)}$ (kg/m <sup>3</sup> )
Mínimo	12,0	2747	333
Medio	30,8	7354	473
Máximo	66,4	16003	711
CV (%)	38	40	15
n	233	233	233

<sup>(1)</sup>: Valor ajustado a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma EN 384 (2010);

<sup>(2)</sup>: Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12 %) de acuerdo a la norma EN 384 (2010); CV: coeficiente de variación; n: cantidad de cuerpos de prueba.

La información exhibida en la Tabla 2 muestra una elevada dispersión de valores tanto para  $f_m$  como para  $E_{m,g}$ , lo cual se manifiesta en valores del CV que alcanzaron 38 % y 40 % para  $f_m$  y  $E_{m,g}$ , respectivamente. Una relativamente alta variabilidad también ha sido reportada para las propiedades mecánicas de las mismas especies pero cultivadas en la República Oriental del Uruguay. Para este material, Moya *et al.* (2015) publican resultados con valores del CV que variaron entre 31 % y 45 % para  $f_m$ , y entre 24 % y 44 % para  $E_{m,g}$ , los cuales fueron obtenidos sobre un total de 251 vigas de *P. taeda* y *elliottii* divididas en dos muestras y a su vez en 3 grados estructurales. Se han informado también valores relativamente elevados del CV para otras especies de *Pinus*. Fernandez-Golfín Seco y Díez Barra (1996) publican un CV de 46 % para  $f_m$  y de 36 % para  $E_{m,g}$  obtenidos con madera de *P. pinaster* cultivado en España. Carballo *et al.* (2009) reportan valores de 32 % y de 21 % para  $f_m$  y  $E_{m,g}$ , respectivamente, para el *P. pinaster* Ait. ssp. *atlantica* de España. Para el *P. sylvestris* L. cultivado en Finlandia, Stöd *et al.* (2016) informan un CV de 36 % para  $f_m$  y de 27 % para  $E_{m,g}$ .

Por su parte, es de destacar que la variabilidad de las propiedades encontrada en este trabajo es muy superior a la reportada para las especies que ocupan el segundo y tercer lugar de importancia en la producción de madera estructural en Argentina. Para el *Eucalyptus grandis*, que le sigue en importancia al pino resinoso, Piter *et al.* (2004) publican valores del CV de 25 % y 20 % para  $f_m$  y  $E_{m,g}$ , respectivamente, obtenidos de 149 tablas ensayadas a flexión de plano con las mismas dimensiones que las adoptadas en este proyecto. Para el *Populus deltoides* 'Australiano 129/60', Guillaumet *et al.* (2014) reportan valores del CV iguales a 21 % y 17 % para  $f_m$ , y de 14 % y 13 % para  $E_{m,g}$ , obtenidos sobre dos muestras conteniendo un total de 299 tablas de las mismas dimensiones que las ensayadas en este proyecto.



### Determinación de los principales parámetros mecánicos

Con el fin de complementar la información presentada en la Tabla 2 para el módulo de elasticidad y la densidad, en la Tabla 3 se exhiben los resultados de la nudosidad en la muestra Mf según los criterios elegidos para el análisis. Es posible apreciar que el criterio IRAM conduce a los valores mayores, lo cual se explica por los criterios de medición de esta característica cuya descripción se encuentra en el capítulo de Materiales y Métodos. Por su parte, es de destacar que todos los criterios muestran una dispersión similar de resultados, con valores del CV comprendidos entre 60 % y 62 %.

**Tabla 3.** Principales resultados de la nudosidad <sup>(1)</sup> obtenidos para la muestra Mf.

	Criterio de medición		
	IRAM	KAR S	KAR 150
Mínimo	0	0	0
Medio	0,35	0,25	0,27
Máximo	0,96	0,72	0,84
CV (%)	60	61	62
n	233	233	233

<sup>(1)</sup>: La descripción de los criterios de medición de la nudosidad, se explicitan en Materiales y Métodos; CV: coeficiente de variación; n: cantidad de cuerpos de prueba.

La Tabla 4 exhibe los resultados encontrados para el coeficiente de correlación de Pearson (R) entre distintos parámetros mecánicos y la resistencia a flexión ( $f_m$ ). Como no se han reportado resultados referidos a la eficiencia de parámetros mecánicos para clasificar este material, la información se presenta para la muestra completa (Mf) y también por separado para las tablas de *P. taeda* y *elliottii*. El estudio incluyó 3 parámetros simples:  $E_{m,g}$ ,  $\rho$  y la nudosidad determinada según los criterios ya mencionados.

Los resultados de la Tabla 4 confirman que la eficiencia de los parámetros para predecir  $f_m$  es similar en las dos especies que componen el pino resinoso. El valor de R coincide en ambas para  $E_{m,g}$ , es moderadamente mayor (13 %) en el *P. elliottii* para  $\rho$ , mientras que muestra un valor algo superior en el *P. taeda* para la nudosidad, con diferencias que varían entre 11 % y 18 % para los distintos criterios analizados. Las diferencias señaladas pueden descartarse para propósitos prácticos vinculados a la clasificación por resistencia de la madera estructural y, en consecuencia, en adelante el análisis se continuará desarrollando sobre los valores de R correspondientes a la muestra completa.

**Tabla 4.** Coeficiente de correlación de Pearson (R) entre  $f_m$  y distintos parámetros simples.

	$E_{m,g}$	$\rho$	IRAM	KAR S	KAR 150
<i>Pinus elliottii</i> (n = 116)	0,84	0,68	-0,64	-0,60	-0,62
<i>Pinus taeda</i> (n = 117)	0,84	0,6	-0,71	-0,71	-0,7
Total (n = 233)	0,83	0,63	-0,68	-0,65	-0,66

$E_{m,g}$  es el parámetro individual que presenta el mayor valor de R (0,83), y por lo tanto la mayor eficacia para predecir  $f_m$ , explicando el 69 % ( $R^2 = 0,69$ ) de su variabilidad en la muestra completa. Este valor de R es mayor que el de 0,72 reportado por Cagno *et al.* (2014) para madera de *P. taeda/elliottii* cultivado en Uruguay. También es superior a los valores comprendidos entre 0,72 y 0,81 que informa Hermoso Prieto (2001) para el *P. sylvestris* cultivado en distintas regiones de España. El parámetro que le sigue en importancia a  $E_{m,g}$  es la nudosidad IRAM ( $R = -0,68$ ), ocupando  $\rho$  el tercer lugar ( $R = 0,63$ ). El análisis estadístico confirmó una correlación altamente significativa entre la resistencia y los 3 parámetros simples señalados anteriormente, con una probabilidad asociada ( $p$ ) menor a 0,0005.

El parámetro combinado (PC) que optimiza la correlación con  $f_m$  se determinó a través de un análisis de regresión lineal múltiple. Este parámetro incluye como variables independientes (portadoras) a los 3 parámetros simples mencionados en el párrafo anterior. Los coeficientes de regresión fueron estimados por el método de los mínimos cuadrados y el modelo que expresa al parámetro combinado

queda definido como:  $PC = 0,00203 E_{m,g} + 0,0413 \rho - 17,246 IRAM + 2,305$ . PC alcanza una elevada correlación con  $f_m$  ( $R = 0,89$ ) y explica un 78 % de su variabilidad. Una correlación aún más elevada ( $R = 0,94$ ) entre la resistencia y un parámetro combinado por el módulo de elasticidad, la densidad y la nudosidad fue reportada por Dávalos-Sotelo y Limón Godina (2009) para el *Pinus* de Durango, México. Por su parte, Hanhijärvi y Ranta-Maunus (2008) informan que un parámetro combinado como el mencionado les permitió alcanzar una correlación con la resistencia, en tablas de *Pinus sylvestris* del norte de Europa, algo menor ( $R = 0,84$ ) que la encontrada en este estudio.

Los resultados presentados proveen la base para desarrollar dos modelos de clasificación mecánica basados en procesos de distinta complejidad. Uno sustentado en  $E_{m,g}$  que es el parámetro individual mejor correlacionado con la resistencia. El otro, más complejo, fundado en PC. La figura 2, que despliega la relación de  $f_m$  con  $E_{m,g}$  y con PC, confirma que en ambos casos la asociación entre las variables queda adecuadamente representada por las relaciones lineales adoptadas.

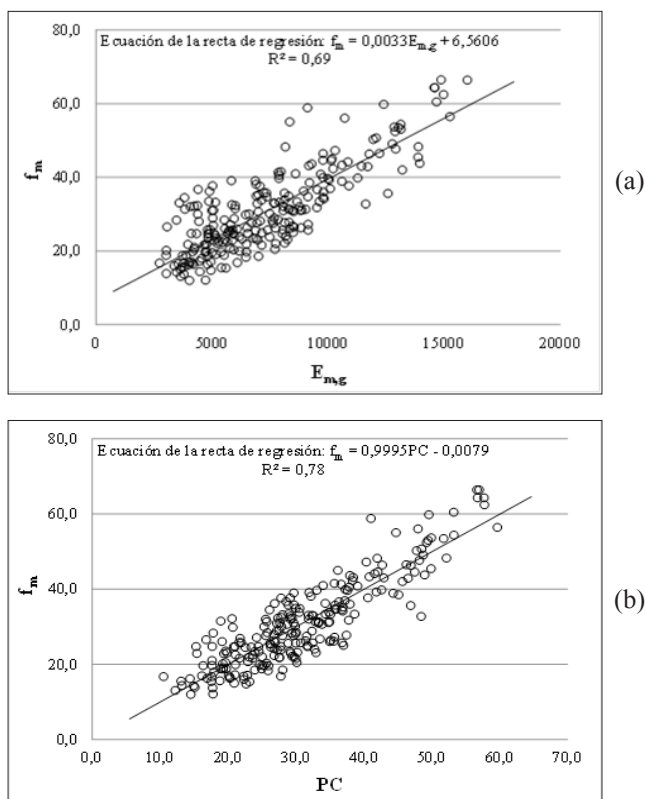


Figura 2. Relación entre (a)  $f_m$  y  $E_{m,g}$ , y entre (b)  $f_m$  y PC encontrada para la muestra Mf.

### Desarrollo de modelos mecánicos de clasificación y comparación de su eficiencia con la del método visual adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015)

Los límites de los parámetros mecánicos se determinaron teniendo en cuenta el propósito de alcanzar los valores medios del módulo de elasticidad requeridos por la norma IRAM 9662-3 (2015). Luego de clasificar la muestra Mf aplicando los dos modelos, se obtuvieron los perfiles de resistencia, rigidez y densidad, con sus correspondientes rendimientos, que se presentan en la Tabla 5. Para facilitar la comparación de la eficiencia de estos modelos con la alcanzada con el método visual vigente, Mf también fue clasificada según este último criterio y los resultados se incorporaron a la misma tabla.

**Tabla 5.** Rendimiento y valores característicos de la resistencia y el módulo de elasticidad en flexión, así como de la densidad, obtenidos clasificando la muestra ensayada a flexión (Mf) con los modelos mecánicos y con el método visual vigente.

	Límites de los parámetros mecánicos		n	$f_{m,k}^{(1)}$ (MPa)	$E_{m,g-medio}^{(2)}$ (MPa)	$\rho_k^{(3)}$ (kg/m <sup>3</sup> )
Modelo mecánico basado en PC <sup>(4)</sup>	$PC \geq 39,0$	Clase 1	43 (18 %)	29,5	12048	465
	$39,0 > PC \geq 23,1$	Clase 2	134 (58 %)	18,2	7057	399
	$PC < 23,1$	Descarte	56 (24 %)	12,0	4463	374
Modelo mecánico basado en $E_{m,g}$	$E_{m,g} \geq 9782$	Clase 1	46 (20 %)	27,1	12028	452
	$9782 > E_{m,g} \geq 5022$	Clase 2	127 (54 %)	18,6	7160	390
	$E_{m,g} < 5022$	Descarte	60 (26 %)	12,3	4183	378
Método visual adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015)		Clase 1	41 (18 %)	21,1	10860	456
		Clase 2	115 (49 %)	14,7	7657	391
		Descarte	77 (33 %)	11,3	5036	380

<sup>(1)</sup>, <sup>(2)</sup> y <sup>(3)</sup>: valores característicos de la tensión de rotura, del módulo de elasticidad y de la densidad, respectivamente, determinados según la norma EN 384 (2010); <sup>(4)</sup>: Parámetro combinado,  $PC = 0,00203 E_{m,g} + 0,0413 \rho - 17,246$  IRAM + 2,305; n: cantidad de cuerpos de prueba asignados a cada clase. Entre paréntesis se expresa el porcentaje respecto del total.

Los resultados exhibidos muestran que los dos modelos mecánicos permiten alcanzar todos los valores característicos de las propiedades requeridos por la norma IRAM 9662-3 (2015) para la Clase 1 ( $f_{m,k} = 18,0$  MPa,  $E_{m,g-medio} = 12000$  MPa y  $\rho_k = 420$  kg/m<sup>3</sup>) y para la Clase 2 ( $f_{m,k} = 11,0$  MPa,  $E_{m,g-medio} = 7000$  MPa y  $\rho_k = 390$  kg/m<sup>3</sup>). Si bien la obtención del valor requerido de  $E_{m,g-medio}$  constituyó un objetivo central en el diseño de los modelos, son de destacar también los elevados valores alcanzados para  $f_{m,k}$ , que superan ampliamente los requeridos para las dos clases superiores a pesar de las penalizaciones estadísticas aplicadas por tamaño y cantidad de muestras (EN 384 2010). Desde el punto de vista económico, la cantidad de piezas asignadas a cada clase resistente (n) indica un rendimiento similar en ambos modelos mecánicos. Este rendimiento podría mejorarse en las clases 1 y 2 cuando el material se destina a la fabricación de MLEE, ya que para este producto el proceso constructivo permite cortar la tabla, eliminando el defecto que define su clase resistente.

La aplicación del método visual no permitió alcanzar el valor requerido para  $E_{m,g-medio}$  en la Clase 1 (12000 MPa), lo cual está en línea con reportes previos (Fank *et al.* 2014). Este método condujo a un rendimiento inferior al logrado con los modelos mecánicos en la Clase 2, y a un mayor Descarte, el cual totalizó un 33 % habiendo alcanzado 24 % con el parámetro PC y 26 % con  $E_{m,g}$ . Un estudio detallado permitió conocer los parámetros visuales que motivaron el descarte de 77 tablas. En 57 casos se debió a un excesivo espesor de los anillos de crecimiento, en 11 tablas fue motivado por la nudosidad y en 9 casos por un exceso en el valor de ambas características. En consecuencia, puede afirmarse que la relativamente baja eficacia de los parámetros visuales para predecir el comportamiento mecánico de este material produjo como resultados negativos más salientes: i) una rigidez ( $E_{m,g-medio}$ ) menor a la

requerida por la norma en la clase superior y, ii) un descarte de material 9 % mayor que el obtenido con el modelo mecánico basado en PC y 7 % mayor en relación al modelo basado en  $E_{m,g}$ .

A través de un análisis de la variabilidad de  $E_{m,g}$  dentro de cada clase se comprobó que CV osciló entre 16 % y 20 % en los 3 grados obtenidos con el modelo basado en PC y entre 14 % y 18 % con el basado en  $E_{m,g}$ . Estos valores muestran que la elevada variabilidad de  $E_{m,g}$  en la muestra completa (CV = 40 %, ver Tabla 2) fue reducida con los dos modelos mecánicos hasta alcanzar, dentro de cada clase, el valor de CV (20 %) adoptado en las reglas de diseño del país (CIRSOC 601 2016). Contrariamente, el análisis mostró que este valor fue superado en las 3 clases obtenidas con el método visual, donde CV varió entre 26 % y 30 %. Estos resultados están en línea con el criterio adoptado en Brasil en la última revisión de la norma NBR 7190 (ABNT 2010), que incorpora la clasificación mecánica como un medio para mejorar la homogeneidad de la rigidez en la madera estructural.

### Aplicación de los modelos mecánicos a la muestra ensayada en tracción paralela a las fibras (Mt)

La clasificación mecánica de la muestra Mt es útil en relación a dos aspectos vinculados al objetivo de este trabajo: i) probar la eficiencia de los modelos para clasificar tablas destinadas a la fabricación de MLEE, ya que en el plano internacional (Colling 1995, EN 14080 2013) y en el nacional (IRAM 9662-3 2015), se atribuye una destacada importancia a las propiedades mecánicas en tracción de las láminas y, ii) ampliar la base estadística sobre la cual los modelos fueron desarrollados.

Los principales resultados de las propiedades mecánicas en tracción y la densidad, obtenidos para la muestra Mt completa, se presentan en la Tabla 6. El contenido de humedad en las 100 tablas alcanzó un valor medio de 12,7 % con un CV igual a 6 %, lo cual confirma que los cuerpos de prueba se encontraban dentro del rango de humedad establecido por la norma EN 384 (2010) al momento de ser ensayados.

**Tabla 6.** Principales resultados de la tensión de rotura ( $f_{t0}$ ), del módulo de elasticidad ( $E_{t0}$ ) y de la densidad ( $\rho$ ) obtenidos para la muestra ensayada a tracción paralela a las fibras (Mt).

	$f_{t0}^{(1)}$ (MPa)	$E_{t0}^{(2)}$ (MPa)	$\rho^{(2)}$ (kg/m <sup>3</sup> )
Mínimo	5,8	3282	342
Medio	18,3	7842	460
Máximo	43,8	17003	631
CV (%)	36	35	13
n	100	100	100

<sup>(1)</sup>: Valor ajustado a un ancho de referencia de 150 mm según la norma EN 384 (2010); <sup>(2)</sup>: Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12 %) según EN 384 (2010); CV: coeficiente de variación; n: cantidad de cuerpos de prueba.

En primer lugar resulta de interés comparar los resultados de la Tabla 6 con los de la Tabla 2 para verificar si en este caso la relación entre los valores medios del módulo de elasticidad en tracción y en flexión está en línea con el criterio europeo (EN 384 2010), luego adoptado en Argentina (IRAM 9664 2013). El valor medio de  $E_{t0}$  (7842 MPa) es 7 % mayor que el de  $E_{m,g}$  (7354 MPa). Si bien diferencias de este rango entre ambos módulos fueron reportadas en coníferas de Europa (Burger y Glos 1995, Johansson *et al.* 1992), para conocer su nivel de significación se empleó el test de Student (*t*), el cual confirmó que no puede rechazarse la hipótesis de igualdad entre los valores medios de  $E_{t0}$  y  $E_{m,g}$  a un nivel de significación del 5 % ( $p = 0,16$ ). Consecuentemente, la diferencia entre ellos puede atribuirse a la variabilidad natural de las propiedades comparadas. Estos resultados muestran que el comportamiento elástico de este material también es adecuadamente interpretado por el criterio europeo que considera un valor único para el módulo de elasticidad en flexión y en tracción paralela a las fibras.

Los resultados del análisis efectuado en el párrafo anterior permiten asumir valores equivalentes para el módulo de elasticidad global ( $E_{m,g}$ ) y para el módulo de elasticidad en tracción paralela a las fibras ( $E_{t,0}$ ). En consecuencia, el valor de  $E_{m,g}$  fue sustituido por el de  $E_{t,0}$  en los dos modelos mecánicos y éstos fueron utilizados para clasificar las 100 tablas de la muestra Mt, presentándose los resultados en la Tabla 7. Para comparar la eficiencia de estos modelos con la del método visual vigente, la muestra también fue clasificada según este criterio y los resultados se agregaron a la Tabla 7.

**Tabla 7.** Rendimiento y valores característicos de la resistencia y el módulo de elasticidad en tracción paralela a las fibras, así como de la densidad, obtenidos clasificando la muestra ensayada a tracción paralela a las fibras (Mt) con los modelos mecánicos y con el método visual adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015).

		n	$f_{t,0,k}^{(1)}$ (MPa)	$E_{t,0-medio}^{(2)}$ (MPa)	$\rho_k^{(3)}$ (kg/m <sup>3</sup> )
Modelo mecánico basado en PC <sup>(4)(5)</sup>	Clase 1	15 (15%)	15,8	12252	497
	Clase 2	60 (60 %)	9,0	7839	396
	Descarte	25 (25 %)	5,2	5202	370
Modelo mecánico basado en $E_{t,0}^{(5)}$	Clase 1	20 (20 %)	11,6	12206	422
	Clase 2	67 (67 %)	8,5	7243	369
	Descarte	13 (13 %)	4,7	4213	402
Método visual adoptado por la norma IRAM 9662-3 (2015)	Clase 1	17 (17 %)	13,7	10746	425
	Clase 2	51 (51 %)	8,4	8021	370
	Descarte	32 (32 %)	5,6	6012	375

<sup>(1)</sup>, <sup>(2)</sup> y <sup>(3)</sup>: Valores característicos de la tensión de rotura, del módulo de elasticidad y de la densidad, respectivamente, determinados según el criterio de la norma EN 384 (2010); <sup>(4)</sup>: Parámetro combinado,  $PC = 0,00203 E_{t,0} + 0,0413 \rho - 17,246$  IRAM + 2,305; <sup>(5)</sup>: Los límites de los parámetros mecánicos para cada clase resistente se explicitan en la Tabla 5; n: cantidad de cuerpos de prueba asignados a cada clase. Entre paréntesis se expresa el porcentaje respecto del total.

La información exhibida en esta tabla muestra que los dos modelos mecánicos permiten superar los valores requeridos por la norma IRAM 9662-3 (2015) para las propiedades mecánicas de tracción en la Clase 1 ( $f_{t,0,k} = 11,0$  Mpa,  $E_{t,0-medio} = 12000$  Mpa) y en la Clase 2 ( $f_{t,0,k} = 7,0$  MPa,  $E_{t,0-medio} = 7000$  MPa). Los resultados confirman también para esta muestra que por medio del método visual no es posible alcanzar el valor medio del módulo de elasticidad requerido en la Clase 1. Respecto del rendimiento, el modelo mecánico basado en  $E_{t,0}$  es el que provee los mejores resultados, con la mayor cantidad de tablas en la Clase 1 (20 %) y el menor descarte (13 %). El método visual conduce al peor rendimiento, con la mayor cantidad de material descartado (32 %), en concordancia con lo ocurrido al clasificar la muestra Mf (ver la Tabla 5). Los valores de la densidad presentan cierta inconsistencia en la Clase 2 y en el Descarte para el modelo mecánico basado en  $E_{t,0}$  y para el método visual. En ambos casos  $\rho_k$  es mayor en el Descarte que en la Clase 2, obteniéndose en esta última un valor de  $\rho_k$  que es 5 % inferior al requerido por la norma (390 kg /m<sup>3</sup>). Esta inconsistencia, que puede ser explicada por el tamaño relativamente pequeño de la muestra Mt, no se presenta en el modelo basado en PC debido a que éste incluye a la densidad como uno de los parámetros simples que lo integran.

Los resultados presentados y discutidos más arriba prueban que los dos modelos mecánicos ofrecen una eficiencia superior a la del método visual. Esa mayor eficiencia permite alcanzar un rendimiento superior al logrado con el método visual y resolver los problemas principales que surgen de su aplicación, los cuales ya fueron mencionados anteriormente. No obstante, la elección de un modelo y su implementación en una máquina de clasificación requiere tener en cuenta tanto la

eficiencia del proceso como el monto de la inversión necesaria, ya que ambos difieren en precisión pero también en complejidad. A su vez, y con independencia del modelo adoptado, es necesario contemplar una inspección visual complementaria para detectar aquellas características que no sean censadas mecánicamente y que se consideren de importancia para el uso estructural del material, tales como la presencia de fisuras y deformaciones, entre otras (EN 14081-1 2006).

## CONCLUSIONES

El análisis de los resultados del programa experimental permitió determinar que el parámetro simple mejor correlacionado con la resistencia a flexión es el módulo de elasticidad global,  $E_{m,g}$  ( $R = 0,83$ ). La consideración de éste junto a la densidad y la nudosidad permitieron formular un parámetro combinado, PC, que optimiza esa relación ( $R = 0,89$ ).

La selección de límites adecuados para los parámetros  $E_{m,g}$  y PC permitió diseñar dos modelos de clasificación mecánica que proveen dos grados de calidad estructural y material de descarte. Los resultados obtenidos clasificando la muestra ensayada a flexión con los modelos mecánicos y con el método visual vigente permitieron comprobar una mayor eficiencia de los primeros porque permitieron: i) alcanzar los valores característicos de las propiedades adoptados por la norma IRAM 9662-3 (2015) para las dos clases estructurales, superando las limitaciones que presenta el método visual; ii) lograr un rendimiento superior al obtenido con este último y, iii) disminuir la variabilidad de  $E_{m,g}$  dentro de cada clase resistente hasta el nivel adoptado por las reglas de diseño estructural del país.

Los dos modelos mecánicos desarrollados también probaron una eficacia superior al método visual para clasificar la muestra ensayada en tracción paralela a las fibras. Dada la importancia de estas propiedades en las láminas destinadas a la fabricación madera laminada encolada estructural, estos resultados respaldan la conveniencia de incorporar la clasificación mecánica a la fabricación de este producto con tablas de la especie investigada.

Los resultados de este trabajo alientan el desarrollo de nuevos estudios orientados a: i) ampliar la base experimental y analizar alternativas para la aplicación práctica y calibración de los modelos analizados. El análisis debería considerar la precisión y la complejidad en la implementación de cada uno con el fin de optimizar el balance técnico-económico; ii) diseñar un método complementario de inspección visual para evaluar los defectos que no sean revelados por el proceso mecánico y que es necesario limitar en la madera estructural, tales como deformaciones excesivas.

## REFERENCIAS

- American Institute of Timber Construction. AITC 117. 2010.** Standard Specifications for Structural Glued Laminated Timber. Centennial, CO.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. 2010.** Projeto de revisão NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, Brasil.
- Ballarin, A.; Lara Palma, H. 2003.** Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. *Revista Árvore* 27(3): 371-380.
- Blaß, H.; Görlacher, R. 1996.** Visuelle und maschinelle Festigkeitssortierung von Vollholz. *Mikado* 5:64-71.
- Burger, N.; Glos, P. 1995.** Verhältnis zwischen Zug- und Biege-Elastizitätsmoduln von Vollholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 53: 73-74.
- Cagno, M; Cardoso, A.; O'Neill, H.; Moya, L. 2014.** Relación entre módulos de elasticidad dinámico y estático, y entre resistencia a flexión para piezas de madera de pinos de tamaño estructural. *XIV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira*, Natal, Brasil, 9 pp.
- Carballo, J.; Hermoso, E.; Fernández-Golfín, J. 2009.** Mechanical properties of structural maritime pine sawn timber from Galicia (*Pinus pinaster* Ait. ssp. *atlantica*). *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 18(2): 152-158.
- Cave, I.; Walker, J. 1994.** Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods: the influence of microfibril angle. *Forest Products Journal* 44(5): 43-48.
- Chifarelli, D. 2008.** El Modelo de Monocultivos de Coníferas a Gran Escala. Análisis de Sustentabilidad en el Alto Paraná Misionero. *IX Congreso Argentino de Antropología Social*, Posadas, Misiones, Argentina, 21 pp.
- CIRSOC 601. 2016.** Reglamento argentino de estructuras de madera. Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires, Argentina. [Disponible en] <<https://goo.gl/hwYYIA>> [acceso el 23/12/2016].
- Colling, F. 1995.** Glued laminated timber - Production and strength classes. Timber Engineering STEP 1, pp. A8/1-A8/8. Centrum Hout, The Netherlands.
- Dávalos-Sotelo, R.; Limón-Godina, R. 2009.** Efecto de los nudos sobre la resistencia y rigidez en flexión de la madera de pino. *Revista Ciencia Forestal en México* 34(106): 205-212.
- Denzler, J.; Weidenhiller, A. 2014.** New perspectives in machine strength grading: or how to identify a top rupture. *Materials and Joints in Timber Structures* 9: 761-771.
- Diebold, R.; Glos, P. 1994.** Verbesserte Holznutzung durch neuartige maschinelle Festigkeitssortierung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 52:222-222.

- Diebold, R. 1997.** Möglichkeiten der maschinellen Holzsortierung mit dem Euro-GreComat. In Grazer Holzbau-Fachtagung, Sortierung und Festigkeit. B/1:1-19.
- DIN 4074-1. 2008.** Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- Dirección de Producción Forestal. 2016.** Argentina: Plantaciones forestales y gestión sostenible. 15p. [Disponible en] <<https://goo.gl/064alb>> [acceso 23/12/2016].
- Donaldson, L. 2008.** Microfibril angle: measurement, variation and relationships - a review. *IAWA Journal* 29(4): 345-386.
- Dowse, G.; Wessels, C. 2013.** The structural grading of young South African grown *Pinus patula* sawn timber. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 75(1): 7-17.
- Ehrhart, T.; Fink, G.; Steiger, R.; Frangi, A. 2016.** Strength grading of European beech lamellas for the production of GLT & CLT. *International Network on Timber Engineering Research*. Meeting 49. Graz, Austria, 14 pp.
- EN 384. 2010.** Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 408. 2010.** Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 14080. 2013.** Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 14081-1. 2006.** Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements. European Committee for Standardization, Brussels.
- Fank, P.; Stefani, P.; Piter, J.C. 2014.** Resistencia y rigidez de tablas destinadas a la fabricación de madera laminada encolada estructural. Análisis comparativo entre el pino resinoso (*Pinus taeda/elliottii*) y el álamo (*Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'). *IV Congreso Internacional de las Salicáceas en Argentina-Jornadas de Salicáceas 2014*. La Plata, Argentina, 8 pp.
- Fernández-Golfín Seco, J.; Diéz Barra, M. 1996.** Growth rate as a predictor of density and mechanical quality of sawn timber from fast growing species. *Holz als Roh- und Werkstoff* 54:171-174.
- Fernández-Golfín Seco, J.; Diéz Barra, M.; Hermoso Prieto, E. 2001.** Análisis y estado del arte de la técnica de clasificación mecánica por máquina de la madera aserrada estructural. *Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales* 10(1): 5-19.
- Glos, P. 1995.** Strength grading. Basis of design, material properties, structural components and joints. Timber Engineering STEP 1, pp: A6/1-A6/8. Centrum Hout, The Netherlands.
- Glos, P.; Diebold, R. 1994.** Verfahrensentwicklung und Erprobung zur maschinellen Schnittholz-sortierung. Abschlußbericht 89505, Institut für Holzforschung der Universität München.



**Glos, P.; Lederer, B. 2000.** Sortierung von Buchen- und Eichenschnittholz nach der Tragfähigkeit und Bestimmung der zugehörigen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte. Bericht Nr. 98508, Institut für Holzforschung, München.

**Görlacher, R. 1984.** Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 42:219-222.

**Görlacher, R. 1990.** Sortierung von Brettschichtholzlamellen nach DIN 4074 durch Messung von Longitudinalschwingungen. *Bauingenieur* 65:517-522.

**Görlacher, R. 1997.** Möglichkeiten der maschinellen Holzsortierung mit dem GradeMaster 403. In *Grazer Holzbau-Fachtagung, Sortierung und Festigkeit B/2*:1-10.

**Green, D.; Kretschmann, D. 1997.** Properties and grading of southern pine timbers. *Forest Products Journal* 47(9): 78-85.

**Guillaumet, A.; Filippetti, M.; Acuña Rello, L.; Piter, J.C. 2014.** Utilización de la madera de álamo en elementos estructurales. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural (XXXVI JSAIE). Montevideo, Uruguay, 19 al 21 de noviembre de 2014. Publicado completo en formato electrónico con el código 269 en 14 pág. Pdf, resumen en anales pág. 104.

**Hanhijärvi, A.; Ranta-Maunus, A. 2008.** Development of strength grading of timber using combined measurement techniques. Report of the Combigrade - project - phase 2. *VTT Publications 686*, 60 pp.

**Hermoso Prieto, E. 2001.** *Caracterización mecánica de la madera estructural de Pinus sylvestris L.* Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, 253 pp. Madrid, España.

**Hoffmeyer, P. 1995.** Wood as a building material. Timber Engineering. Basis of design, material properties, structural components and joints. STEP 1: pp. A4/1-A4/21. Centrum Hout, The Netherlands.

**Ilic, J. 2001.** Relationship among the dynamic and static elastic properties of air-dry Eucalyptus delegatensis R. Baker. *Holz als Roh- und Werkstoff* 59:169-175.

**Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 9660-1. 2015.** Vigas laminadas de madera. Parte 1: Clases de resistencia y requisitos de fabricación y de control. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.

**Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 9660-2. 2015.** Vigas laminadas de madera. Parte 2: Métodos de ensayo. Buenos Aires, Argentina.

**Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 9661. 2015.** Madera laminada encolada estructural. Requisitos de los empalmes por unión dentada., Buenos Aires, Argentina.

**Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 9662-1. 2015.** Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 1: Tablas de pino Paraná (*Araucaria angustifolia*). Buenos Aires, Argentina.

**Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 9662-2. 2015.** Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 2: Tablas de eucalipto (*Eucalyptus grandis*). Buenos Aires, Argentina.

**Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 9662-3. 2015.** Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y ellioti (*Pinus taeda* y *elliottii*). Buenos Aires, Argentina.

**Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 9662-4. 2015.** Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 4 - Tablas de álamo (*Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'). Buenos Aires, Argentina.

**Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 9663. 2013.** Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas. Buenos Aires, Argentina.

**Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 9664. 2013.** Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. Buenos Aires, Argentina.

**International Organization for Standardization. ISO 3130. 1975.** Wood. Determination of moisture content for physical and mechanical tests.

**International Organization for Standardization. ISO 3131. 1975.** Wood. Determination of density for physical and mechanical tests.

**Johansson, C.; Brundin, J.; Gruber, R. 1992.** Stress Grading of Swedish and German Timber, a comparison of machine stress grading and three visual grading systems. SP Report 1992:23, Swedish National Testing and Research Institute, Sweden.

**Moya, L.; Cardoso, A.; Cagno, M.; O'Neill, H. 2015.** Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. *Maderas. Ciencia y tecnología* 17(3): 597- 612.

**Piter, J.C.; Cotrina, A.D.; Sosa, Zitto, M.A.; Stefani, P.M.; Torrán, E.A. 2007.** Determination of characteristic strength and stiffness values in glued laminated beams of Argentinean *Eucalyptus grandis* according to European standards. *Holz als Roh- und Werkstoff* 65(4): 261-266.

**Piter, J.C.; Zerbino R. L.; Blaß H.J. 2004.** Visual strength grading of Argentinean *Eucalyptus grandis*. Strength, stiffness and density profiles and corresponding limits for the main grading parameters. *Holz als Roh- und Werkstoff* 62(1): 1-8.

**Ramos, R.; Villalba, D.; Gómez, R.; Sosa Zitto, A.; Torrán, E.; Piter, J. 2015.** Comportamiento mecánico y densidad de la madera de pino resinoso cultivado en Entre Ríos. Análisis comparativo de los resultados obtenidos para 2 plantaciones de distinta edad. *XXIX Jornadas Forestales de Entre Ríos*. Concordia, E.R., Argentina, 5p.

**Roblot, G.; Bléron, L.; Mériaudeau, F.; Marchal, R. 2010.** Automatic computation of the knot area ratio for machine strength grading of Douglas-fir and Spruce timber. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 14(10): 1317-1332.

**Sauter, U.; Diebold, R. 1997.** Steigerung der Ausbeute von Kiefern-Brettlamellen hoher Tragfähigkeit durch maschinelle Festigkeitsortierung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 55:237-244.

**Stöd, R.; Verkasalo, E.; Heinonen, J. 2016.** Quality and bending properties of sawn timber from commercial thinnings of Scots Pine (*Pinus sylvestris L.*). *Baltic Forestry* 22(1): 148-162.

**Yin, Y; Bian, M.; Song, K.; Xiao, F.; Xiaomei, J. 2011.** Influence of microfibril angle on within-tree variations in the mechanical properties of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*). *IAWA Journal* 32(4): 431-442.