

## DENSIDAD Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE *Acacia melanoxylon* IMPLANTADA EN ARGENTINA

### DENSITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF ARGENTINEAN *Acacia melanoxylon*

D.V. Igartúa<sup>1</sup>, K. Moreno<sup>1</sup>, J.C. Piter<sup>2</sup>, S. Monteoliva<sup>3,\*</sup>

#### RESUMEN

El trabajo se enfocó en la determinación de la densidad normal y las propiedades mecánicas de la madera de *Acacia melanoxylon* implantada en Argentina, y en analizar la relación entre estas variables. El material se seleccionó al azar del obtenido del aserrado de 20 árboles provenientes de cuatro sitios del sudeste de la provincia de Buenos Aires. Se determinó la densidad aparente conforme a la norma IRAM 9544 y los ensayos mecánicos se ejecutaron sobre cuerpos de prueba pequeños y libres de defectos según los lineamientos de la norma ASTM D 143. El valor medio de la densidad fue 564 kg.m<sup>-3</sup> y la tensión de rotura mostró los siguientes valores medios: 89,9 N.mm<sup>-2</sup> en flexión; 49,5 N.mm<sup>-2</sup> en compresión paralela a las fibras; 11,7 N.mm<sup>-2</sup> en compresión perpendicular y 11,6 N.mm<sup>-2</sup> en corte paralelo. La dureza promedio alcanzó 45,3 N.mm<sup>-2</sup> y el módulo de elasticidad en flexión exhibió un valor medio de 10926 N.mm<sup>-2</sup>. Los resultados de las propiedades mecánicas son los esperados para una madera de densidad media y pueden considerarse adecuados para el uso de la especie en la industria de la construcción y del mueble. Los modelos de regresión entre la densidad y las propiedades mecánicas exhibieron valores del coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) comprendidos entre 0,70 y 0,87. El modelo de regresión entre el módulo de elasticidad y la resistencia en flexión mostró un valor de R<sup>2</sup> igual a 0,72.

**Palabras clave:** Calidad de madera, compresión paralela, compresión perpendicular, densidad normal, dureza, flexión estática, módulo ruptura.

#### ABSTRACT

The aim of this paper was to determine the density (at 12 % m. c.) and the mechanical properties of sawn wood of Argentinean *Acacia melanoxylon*, and to study the relationship between these properties. Test samples were randomly selected from the material obtained by sawing 20 trees harvested in four different plantations grown in the southeast of Buenos Aires province. Density was determined according to IRAM 9544 and mechanical tests were carried out by following the procedures of ASTM D 143. The mean value obtained for density reached 564 kg.m<sup>-3</sup>. Strength exhibited the following mean values:

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata . Balcarce, Argentina.

<sup>2</sup> Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional . C. del Uruguay, Argentina.

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata . La Plata, Argentina.

\*Autor para correspondencia: smonteoliva@yahoo.com.ar

Received: 19.09.2014 Accepted: 20.07.2015

89,9 N.mm<sup>-2</sup> in bending, 49,5 N.mm<sup>-2</sup> in compression parallel to the grain, 11,7 N.mm<sup>-2</sup> in compression perpendicular and 11.6 N.mm<sup>-2</sup> in shear parallel. The average hardness reached 45,3 N.mm<sup>-2</sup> and the modulus of elasticity in bending exhibited a mean value of 10926 N.mm<sup>-2</sup>. These results are congruent with those expected for a medium-density wood and they can be considered suitable for uses related to the construction and furniture industries. Coefficients of determination (R<sup>2</sup>) ranging from 0,73 to 0,87 were found between density and mechanical properties. R<sup>2</sup> reached 0,72 between modulus of elasticity and bending strength.

**Keywords:** Bending strength, compression parallel, compression perpendicular, hardness, modulus of elasticity, normal density, wood quality.

## INTRODUCCIÓN

La región sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina (en adelante SEBA), involucra el 11% de la superficie territorial provincial. La principal rama de actividad económica regional es el sector de la producción de bienes, dentro del que se destacan la construcción, la industria manufacturera y la agricultura-ganadería (DPE 2003). La industria manufacturera del mueble es en Argentina una de las tres principales áreas de actividad del sector maderas y demanda madera sólida como uno de sus insumos (MRECI y C 2006). En este contexto general resulta definida una demanda por maderas de calidad para diversos usos relacionados con el sector de la construcción y la industria del mueble.

La región SEBA cuenta con un recurso forestal de *Acacia melanoxylon* conocida en Argentina como “aromo negro” y “acacia australiana”. Hasta el momento este recurso forestal no ha sido caracterizado en términos dasométricos, dasocráticos y tecnológicos. Las masas están localizadas en buena medida en sitios serranos, en composición pura o asociada a *Eucalyptus globulus*. Ha sido implantada sin fines comerciales en macizos de reparo y no sujeta a planes de Ordenación Forestal. Se menciona desde hace 70 años su presencia en grupos aislados en sitios serranos (Martínez-Crovetto 1947). En dicho ambiente se ha expandido naturalmente debido al buen desarrollo de sus hábitos de regeneración: rebrotes de cepas y de raíces, y abundante banco de semillas. En sitios de llanura se la ha utilizado para implantar montes de abrigo, no sometidos a tratamientos silviculturales, por lo que también allí se han hecho evidentes sus hábitos de regeneración (Igartúa 2013).

La madera de esta especie es considerada internacionalmente como una de las más decorativas del mundo, perteneciendo a la categoría del nogal, caoba y teca. Es una especie apreciada por su resistencia media a la flexión, alta resistencia a la compresión y a los impactos y mediana densidad, propiedades importantes en los usos vinculados a la construcción (Nicholas y Brown 2002). Ha sido reportada como una especie forestal versátil en sus usos y de alta adaptabilidad, que crece naturalmente en un amplio rango de ecosistemas forestales de Australia a lo largo de su costa este (Maslin y Mc Donald 2004). Contrariamente al valor que se le otorga en su lugar de origen, en Argentina y en Chile no existe un mercado formal de la madera de *Acacia melanoxylon*. Sin embargo, en este último país, se desarrollan transacciones que la involucran como leña y materia prima pulpable (INFOR-CONAF 1997) y dentro de sus posibles usos se señalan la madera aserrada, la producción de chapas y de parquet (Pinilla *et al.* 2006).

En zonas de introducción, como es el caso de Argentina, es necesario evaluar el recurso para conocer la expresión y variabilidad de sus características bajo las condiciones del ambiente de introducción. Por ello se ha iniciado la investigación local, que continúa hasta el presente analizando el crecimiento de las masas, la variación de las características anatómicas y químicas de la madera con el sitio, el color y contenido de duramen, y también las propiedades físicas en relación con los usos (Monteoliva e Igartúa 2008, 2010, Rotelo-Agnelli 2008, Igartúa *et al.* 2009, Monteoliva *et al.* 2009, 2012, Igartúa y Monteoliva 2009).

Bajo la hipótesis que el recurso regional de *Acacia melanoxylon* podría formar parte de la oferta del mercado regional de madera de calidad para usos sólidos, relacionados con la industria de la construcción y del mueble, el objetivo de este trabajo fue iniciar los estudios sobre las propiedades mecánicas y físicas de su madera mediante la determinación de la densidad normal, las propiedades mecánicas y la relación entre estas variables.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El material de estudio correspondió a parcelas de masas de *Acacia melanoxylon* R. Br implantadas en los Partidos de Balcarce, General Alvarado y Mar Chiquita, de la provincia de Buenos Aires, Argentina. La región SEBA abarca tres grandes dominios geo-edáficos (Culot 2000) representados en los 4 sitios seleccionados, en cada uno de los cuales se delimitó una parcela de estudio: Mar Chiquita (MCH) ubicado en el límite entre el área peri serrana de la Tandilia y la zona de los derrames hacia la Pampa Deprimida (37°43'58'' S; 57° 27'18'' O; 1msnm); Cinco Cerros (CC) (37°43'59'' S; 58°14'30'' O; 163 msnm) y Los Tuelches (LT) (37° 55'67'' S; 58° 06'27'' O; 155 msnm), ambos ubicados en área serrana; y Las Cortaderas (LC) (38°17'29'' S; 58°09'09'' O; 31 msnm) ubicado en la llanura interserrana entre el sistema de Tandilia y el de Ventania (Sierras de la Ventana).

El concepto central para calificar los suelos de los sitios estudiados es el de "argiudol típico" (Culot 2000). El régimen agroclimático de heladas se caracteriza por una fecha media de primeras heladas correspondiente al 20 de mayo y de últimas heladas al 15 de octubre (EEA-INTA Castelar 2007). La temperatura máxima media del mes más cálido está entre 27 °C y 28 °C, y la mínima media del mes más frío entre 3,1 °C y 3,4 °C. Las precipitaciones anuales para Balcarce y Mar del Plata son de 903,5 mm.año<sup>-1</sup> y 921 mm.año<sup>-1</sup> respectivamente, uniformemente distribuidas (EEA-INTA Balcarce 2008).

### Selección y acondicionamiento del material

En cada parcela de estudio se desarrolló un inventario. El material experimental provino de árboles seleccionados al azar (dentro del estrato de los codominantes) a razón de cinco árboles por sitio (Tabla 1), sobre los cuales se desarrolló un muestreo destructivo sistematizado para tomar material que captase la variación axial y radial en el fuste.

**Tabla 1.** Rango de edad y dendrometría (valores medios por sitio, ± desvío estándar) de los árboles muestreados.

Sitio	Edad (años)	DAP c/c* (cm)	DAP s/c (cm)	Altura total (m)	Altura comercial (m)
LC	19 a 32	16,3 (±0,6)	14,8 (±0,5)	13,3 (±0,5)	7,7 (±1,0)
LT	17 a 30	23,1 (±6,1)	21,5 (±6,1)	15,2 (±2,3)	8,5 (±1,0)
MCH	9 a 15	19,0 (±4,4)	17,6 (±4,3)	14,4 (±1,8)	8,3 (±1,9)
CC	20 a 31	19,0 (±4,6)	18,1 (±4,5)	13,1 (±0,8)	7,7 (±0,7)

\* DAP: diámetro a la altura del pecho; c/c con corteza; s/c: sin corteza.

LC: Las Cortaderas; LT: Los Tuelches; MCH: Mar Chiquita; CC: Cinco Cerros

Las trozas recolectadas durante el muestreo destructivo se mantuvieron estibadas durante períodos comprendidos entre 23 y 31 meses -dependiendo del sitio- en depósitos cubiertos y a temperatura ambiente para lograr un secado natural. Posteriormente fueron aserradas practicando un corte en sándwich con sierra sinfin, lo cual permitió lograr tablas de 25 mm y 50 mm de espesor nominal, adecuadas para la elaboración de los cuerpos de prueba. Las tablas obtenidas fueron estibadas con separadores intermedios de 25 mm de espesor con el fin de facilitar y homogeneizar el secado natural. El contenido de humedad (CH) se monitoreó a través de pesadas sucesivas de tablas especialmente seleccionadas, representativas del material estibado, alcanzándose el equilibrio higroscópico luego de 6 meses (en el capítulo de Resultados y Discusión se presenta el CH de los cuerpos de prueba al momento de los ensayos).

### **Preparación de los cuerpos de prueba y realización de los ensayos**

Luego de acondicionar el material se procedió a preparar un total de 535 cuerpos de prueba fabricados conforme a los lineamientos de la norma ASTM D 143, 2007. La cantidad de cuerpos de prueba destinados a cada tipo de ensayo mecánico, así como sus dimensiones, se indican a continuación: i) 158 cuerpos de prueba destinados a los ensayos de flexión estática, con dimensiones nominales iguales a 25 mm x 25 mm x 410 mm; ii) 287 cuerpos de prueba para ensayar en compresión paralela a las fibras, de 25 mm x 25 mm x 100 mm; iii) 19 cuerpos de prueba para ensayar en compresión perpendicular a las fibras, de 50 mm x 50 mm x 150 mm; iv) 40 cuerpos de prueba destinados a los ensayos de corte paralelo a las fibras, de dimensiones 50 mm x 50 mm x 63 mm; v) 31 cuerpos de prueba para los ensayos de dureza, de dimensiones 50 mm x 50 mm x 150 mm. Luego de preparados, los cuerpos de prueba fueron trasladados al laboratorio y acondicionados en una cámara con clima normalizado ( $20\pm 2$  °C de temperatura y  $65\pm 5$  % de humedad relativa ambiente).

Antes del ensayo mecánico, se midieron las dimensiones de cada cuerpo de prueba con un calibre digital capaz de registrar 0,01 mm y se determinó la masa en una balanza capaz de registrar 0,01 g. Con esta información se determinó la densidad aparente conforme al procedimiento adoptado por la norma IRAM 9544, 1973. Después del ensayo mecánico, cada cuerpo de prueba fue colocado en una estufa a temperatura ambiente, la que fue elevada paulatinamente hasta un máximo de  $100\pm 3$  °C. Una vez logrado un valor constante de la masa a 0,01 g (masa anhidra), se determinó el CH al momento del ensayo conforme al criterio de la norma IRAM 9532- 1963.

Los ensayos mecánicos fueron llevados a cabo siguiendo los lineamientos establecidos por la norma ASTM D 143- 2007. En particular, los ensayos de flexión estática se realizaron con una disposición simétrica, aplicando una carga en el punto medio de los cuerpos de prueba dispuestos sobre dos apoyos separados 360 mm. Para la aplicación de las cargas se empleó una máquina de ensayos universales marca SHIMADZU, modelo UH-1000, con capacidad máxima de 1000 kN y posibilidad de desplazar el cabezal de cargas acorde a las exigencias de la norma adoptada. Las cargas fueron determinadas con una precisión del 1 %. Las deformaciones, medidas para determinar el valor del módulo de elasticidad en flexión, fueron obtenidas con instrumental capaz de registrar 0,01 mm.

### **Análisis estadísticos**

Se obtuvieron los descriptivos básicos de las variables y se realizaron regresiones simples entre la densidad y las propiedades mecánicas y entre el módulo de elasticidad y la resistencia en flexión (Statistica v7).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El valor medio (en adelante VM) y el coeficiente de variación (CV) del contenido de humedad (CH) en los cuerpos de prueba destinados a cada tipo de ensayo mecánico alcanzaron: i) VM = 12,6 % y CV = 5 % en los 158 cuerpos de prueba ensayados en flexión estática; ii) VM = 12,0 % y CV = 9 % en los 287 ensayados en compresión paralela a las fibras; iii) VM = 13,2 % y CV = 4 % en los 19 ensayados en compresión perpendicular a las fibras; iv) VM = 12,6 % y CV = 3 % en los 40 ensayados en corte paralelo a las fibras; v) VM = 13,2 % y CV = 5 % en los 31 cuerpos de prueba destinados a los ensayos de dureza. Estos resultados son congruentes con el proceso de acondicionamiento adoptado para el secado natural del material y la posterior colocación de los cuerpos de prueba en una cámara con clima normalizado (20+/-2 °C de temperatura y 65+/-5 % de humedad relativa ambiente), como se describió en el capítulo anterior. Adicionalmente, los resultados obtenidos para VM y CV permiten descartar una desigual influencia del contenido de humedad sobre las propiedades estudiadas en este trabajo, a la vez que posibilitan la obtención de resultados comparables en el plano nacional y en el internacional.

Los principales resultados obtenidos para la densidad y las propiedades mecánicas se exhiben en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Valores medios y variación de la densidad y las propiedades mecánicas en la madera de *Acacia melanoxylon*.

Ensayo		Propiedad	VM	DE	CV
Densidad (kg.m <sup>-3</sup> )	(n = 535)	Densidad	564	79	14 %
Flexión (N.mm <sup>-2</sup> )	(n = 158)	Tensión límite de prop <sup>(1)</sup>	37,7	12,7	34 %
		Tensión de rotura	89,9	19,7	22 %
Compresión paralela (N.mm <sup>-2</sup> )	(n = 287)	Módulo de elasticidad	10926	2609	24 %
		Tensión de rotura	49,5	6,7	14 %
Compresión perpendicular (N.mm <sup>-2</sup> )	(n = 19)	Tensión de rotura	11,7	3,6	31 %
Corte paralelo (N.mm <sup>-2</sup> )	(n = 40)	Tensión de rotura	11,6	1,8	16 %
Dureza (N.mm <sup>-2</sup> )	(n = 31)	Superficie radial	40,4	13,4	33 %
		Superficie tangencial	41,8	12,5	30 %
		Superficie transversal	53,6	11,9	22 %
		Promedio	45,3	11,9	26 %

(1): Tensión en el límite de proporcionalidad; n: número de determinaciones; VM: valor medio; DE: desvío estándar; CV: coeficiente de variación

Para madera de *Acacia melanoxylon* de Chile, Campos *et al.* 1990, reportan un valor medio de la densidad (12 % de CH) de 647 kg.m<sup>-3</sup>. Este valor es 15 % superior al promedio encontrado en este estudio, lo cual puede explicarse porque el rango de edades de los árboles involucrados en el trabajo chileno abarcó de 32 años a 62 años, en tanto que en el presente proyecto se extendió entre los 9 años y 32 años. En congruencia con una mayor densidad, los autores mencionados reportan valores (determinados sobre cuerpos de prueba pequeños y libres de defectos) también mayores que los obtenidos en esta investigación para las propiedades mecánicas. En flexión informan un valor medio de 65,7 N.mm<sup>-2</sup>, 109,4 N.mm<sup>-2</sup> y 13539 N.mm<sup>-2</sup> para la tensión en el límite de proporcionalidad, la tensión de rotura y el módulo de elasticidad, respectivamente. En compresión publican un valor medio de 60,1 N.mm<sup>-2</sup> y de 14,2 N.mm<sup>-2</sup> para la tensión de rotura en dirección paralela y perpendicular a las fibras, respectivamente. Para la dureza en la superficie transversal encontraron un valor medio de 59,9 N.mm<sup>-2</sup>. INFOR-CONAF 1997, también reporta resultados de investigaciones llevadas a cabo sobre cuerpos de prueba pequeños y libres de defectos, construidos con madera secada naturalmente (CH = 12 %) de la misma especie desarrollada en Chile. Para material con una densidad de 569 kg.m<sup>-3</sup>, o sea similar a la encontrada en esta investigación, informa 124,2 N.mm<sup>-2</sup> y 19163 N.mm<sup>-2</sup> para la tensión de rotura y el módulo de elasticidad en flexión, respectivamente, los cuales son 38 % y 75 % mayores que los valores correspondientes determinados en este trabajo. En cambio, para muestras con una densidad también similar a la encontrada en esta investigación, INFOR-CONAF (1997) reporta resultados que difieren solo levemente de los encontrados en este estudio (Tabla 2) en los ensayos de compresión, corte y dureza. Informa 48,8 N.mm<sup>-2</sup> y 12,9 N.mm<sup>-2</sup> para la tensión de rotura en compresión paralela y perpendicular a las fibras, respectivamente, 10,7 N.mm<sup>-2</sup> para la tensión de rotura en corte paralelo a las fibras, y 56,3 N.mm<sup>-2</sup> para la dureza en la superficie transversal.

Para madera de *Acacia melanoxylon* de Portugal, Santos *et al.* 2005, informan un valor medio de la densidad (12 % de CH) de 650 kg.m<sup>-3</sup>, es decir 15 % superior al obtenido en este proyecto. En línea con una mayor densidad, publican también valores promedio (determinados sobre cuerpos de prueba pequeños y libres de defectos) más elevados que los determinados en este trabajo para la tensión de rotura en flexión (146 N.mm<sup>-2</sup>), el módulo de elasticidad en flexión (14200 N.mm<sup>-2</sup>) y la tensión de rotura en compresión paralela a las fibras (61,0 N.mm<sup>-2</sup>). Saporiti-Machado *et al.* 2014, publican también resultados referidos a madera de la misma especie crecida en Portugal. Para material obtenido de árboles con edades comprendidas entre 34 años y 52 años, los valores medios informados alcanzan 654 kg.m<sup>-3</sup> para la densidad (12 % de CH), 139 N.mm<sup>-2</sup> para la tensión de rotura en flexión y 61,0 N.mm<sup>-2</sup> para la tensión de rotura en compresión paralela a las fibras. Estos últimos resultados son similares a los reportados por Santos *et al.* 2005, ya mencionados al comienzo de este párrafo. Tavares *et al.* 2014, por su parte, determinaron un valor medio de la densidad igual a 607 kg.m<sup>-3</sup> para madera de la misma especie crecida en Portugal (12 % de CH) y obtenida de árboles con una edad ubicada en el rango comprendido entre 27 años y 56 años.

Se han publicado valores de la densidad obtenidos sobre madera de árboles de *Acacia melanoxylon* con mayor edad que los mencionados anteriormente. Para la madera (12 % de CH) producida con árboles con 70 años de edad crecidos en Nueva Zelanda y Australia, Nicholas y Brown 2002, informan valores de esta propiedad física oscilando entre 640 kg.m<sup>-3</sup> y 680 kg.m<sup>-3</sup>, es decir entre 13 % y 21 % superiores a los obtenidos en este estudio con árboles de una edad inferior (entre 9 años y 32 años).

Considerando que el presente trabajo se desarrolló bajo la hipótesis de que la madera de *Acacia melanoxylon* investigada podría formar parte de la oferta regional de madera de calidad para la industria de la construcción y del mueble, es de interés comparar los valores obtenidos para sus propiedades con los publicados para otras especies cultivadas en Argentina y actualmente destinadas a ese fin. Una de las especies que se destaca en este aspecto es el *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia de Argentina (INTA 1995), cuya aceptación en el mercado de la construcción y el mueble se encuentra en expansión y su empleo en aplicaciones de alto valor agregado como la ejecución de pisos ha motivado la realización de estudios orientados a relacionar su dureza con su color (Calvo *et al.* 2005). En relación

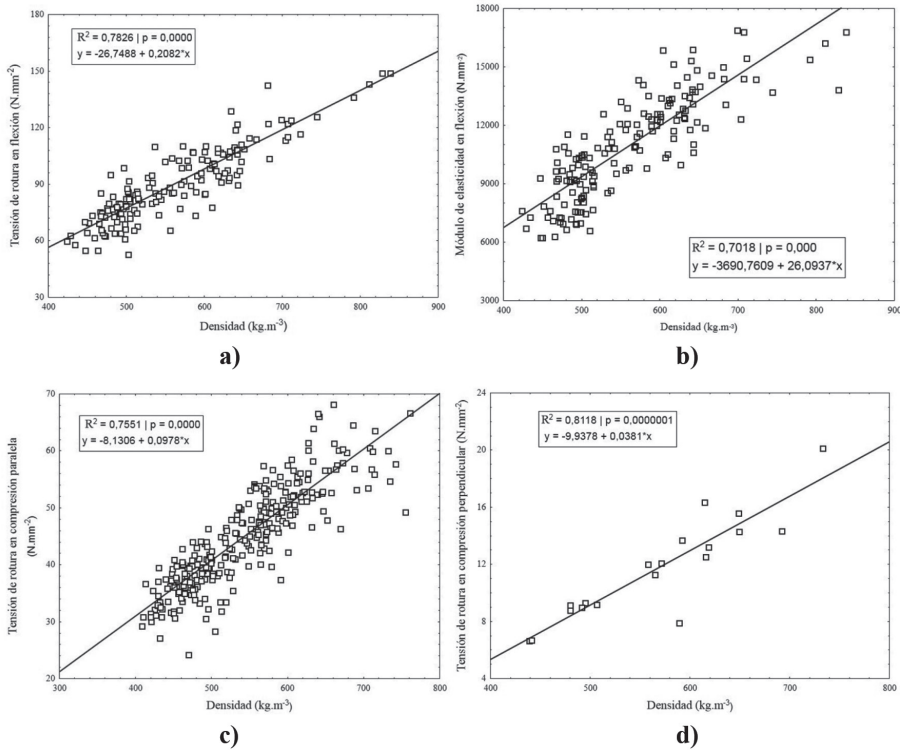
a la densidad de esta especie, Piter *et al.* 2004, publican un valor medio de  $540 \text{ kg.m}^{-3}$ , obtenido a través de 349 determinaciones sobre madera libre de defectos y con un CH = 12 %. El valor medio indicado es 4 % inferior al encontrado en este trabajo para la *Acacia melanoxylon* (Tabla 2). Con referencia a las propiedades mecánicas del *Eucalyptus grandis*, Belvisi *et al.* 1998, publican resultados obtenidos sobre cuerpos de prueba pequeños y libres de defectos, y en consecuencia comparables con los presentados en este trabajo. Estos autores reportan valores medios de  $62,9 \text{ N.mm}^{-2}$ ;  $35,8 \text{ N.mm}^{-2}$ ;  $7,7 \text{ N.mm}^{-2}$ ;  $9,5 \text{ N.mm}^{-2}$  y  $32,9 \text{ N.mm}^{-2}$  para la tensión de rotura en flexión, en compresión paralela a las fibras, en compresión perpendicular a las fibras, en corte paralelo a las fibras y el promedio de la dureza, respectivamente. Los resultados encontrados en este trabajo para la *Acacia melanoxylon* (Tabla 2) son 43 %, 38 %, 52 %, 22 % y 38% mayores que los valores correspondientes reportados para el *Eucalyptus grandis* en la publicación mencionada anteriormente. Estos resultados muestran un excelente comportamiento mecánico de la especie investigada en comparación con el de la madera de *Eucalyptus grandis*, la cual puede ser considerada una importante referencia por su desarrollo actual y su potencialidad futura en el mercado nacional e internacional (INTA 1995).

### **Relación entre la densidad y las propiedades mecánicas**

Dado que la densidad fue determinada en los 535 cuerpos de prueba ensayados mecánicamente, fue posible analizar la relación entre ésta y las propiedades mecánicas con un adecuado soporte estadístico (Tabla 2). La Figura 1 exhibe en forma discriminada la relación entre la densidad y las propiedades mecánicas, presentando en cada caso el valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la ecuación de la recta de regresión lineal. Es posible observar que en todos los casos analizados se registraron relaciones positivas y significativas.

Los valores de  $R^2$  indican que las variaciones de la densidad explican la variabilidad de las propiedades mecánicas en porcentajes que oscilan en un rango comprendido entre el 70 % y el 87 %, correspondiendo el menor al módulo de elasticidad en flexión y el mayor a la dureza promedio. Estos resultados confirman que la densidad normal posee un elevado valor predictivo acerca de las propiedades mecánicas analizadas.

Saporiti-Machado *et al.* 2014, calcularon valores de  $R^2$  para la relación entre la densidad y algunas propiedades mecánicas de la *Acacia melanoxylon* de Portugal empleando cuerpos de prueba pequeños y libres de defectos. Sobre 221 determinaciones reportan  $R^2 = 0,26$  para la relación entre la densidad y la tensión de rotura en flexión. A partir de 197 ensayos informan  $R^2 = 0,42$  entre la densidad y el módulo de elasticidad en flexión. Publican también un valor de  $R^2 = 0,21$  entre la densidad y la tensión de rotura en compresión paralela a las fibras, obtenido sobre 254 cuerpos de prueba.



**Figura 1.** Relación entre la densidad y las propiedades mecánicas.

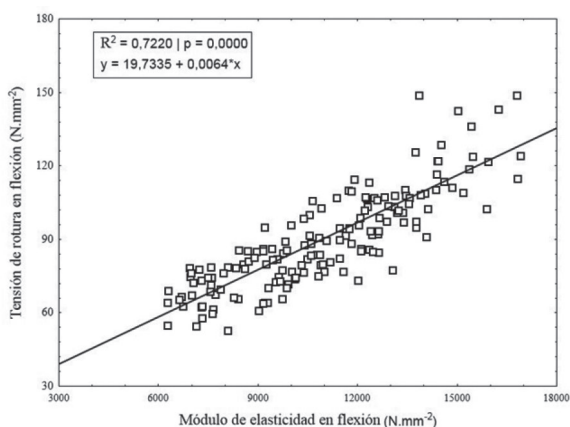
- a) Densidad vs. Tensión de rotura en flexión (n = 158); b) Densidad vs. Módulo de elasticidad en flexión (n = 158); c) Densidad vs. Tensión de rotura en compresión paralela a las fibras (n = 287); d) Densidad vs. Tensión de rotura en compresión perpendicular a las fibras (n = 19); e) Densidad vs. Tensión de rotura en corte paralelo a las fibras (n = 40); f) Densidad vs. Dureza promedio (n = 31).

Los resultados obtenidos en el presente trabajo indican una relación mucho más estrecha entre la densidad y las propiedades mecánicas que la encontrada por Saporiti- Machado *et al.* 2014. Es de notar que la mayor relación encontrada por estos autores correspondió a la densidad con el módulo de elasticidad en flexión, siendo que en este trabajo esa relación fue la menor de todas las analizadas.

#### Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia en flexión

En la Figura 2 se exhibe la relación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura en flexión. El valor del coeficiente de determinación ( $R^2 = 0,72$ ) indica que las variaciones en el módulo de elasticidad explican el 72 % de la variabilidad de la resistencia en flexión y que por lo tanto aquella propiedad posee un elevado valor predictivo de esta última.





**Figura 2.** Relación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura en flexión para 158 cuerpos de prueba.

## CONCLUSIONES

El valor medio obtenido para la densidad normal está en línea con los publicados para la misma especie implantada en otros países y con edad similar.

El comportamiento mecánico de la especie investigada es congruente con el esperado para una madera de densidad media y puede considerarse adecuado para su uso en la industria de la construcción y del mueble. La comparación de los resultados obtenidos con los reportados para la madera de *Eucalyptus grandis* -que es una importante referencia por su desarrollo actual y su potencialidad futura en el mercado nacional e internacional- indica que la madera de *Acacia melanoxylon* posee mayor densidad y superiores propiedades mecánicas. En particular, la dureza de la especie investigada indica que este material podría desempeñarse satisfactoriamente también en aplicaciones de alto valor agregado como la ejecución de pisos.

A través de análisis de regresión se comprobó que tanto la densidad normal como el módulo de elasticidad en flexión poseen un importante valor predictivo acerca del comportamiento mecánico de la especie investigada. Estos resultados estimulan la realización de nuevas investigaciones orientadas a estudiar la eficiencia de métodos no destructivos para determinar las propiedades mecánicas de la especie estudiada.

## AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Ftal. Marcelo Elizalde por su colaboración en el muestreo de los árboles y en la realización de las probetas de ensayo. A los Ing. Eduardo Torrán, Ricardo E. Gómez y Alexandra Sosa Zitto de la UTN por el apoyo en la realización de los ensayos mecánicos.

## REFERENCIAS

**ASTM D 143. 2007.** Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. ASTM International, West Conshohocken, USA.

**Belvisi, D.; Blanc, P.; Calvo, C.; Cotrina, A.; Cuffré, A.; Larocca, F.; Piter, J.C.; Torrán, E.; Villalba, D. 1998.** Utilización de nuestras maderas con fines estructurales. Análisis y propuesta. XVI Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural de la Asociación de Ingenieros Estructurales (AIE), Buenos Aires, 22 al 25/09 de 1998.

**Calvo, C.F.; Piter, J.C.; Sosa Zitto, M.A.; Villalba, D.I. 2005.** Análisis de la relación entre la dureza y el color en muestras de *Eucalyptus grandis* de Argentina. XX Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia, Argentina. 27- 28/octubre de 2005.

**Campos, A.; Cubillos, G.; Morales, F.; Pastene, A. 1990.** Propiedades y usos de especies madereras de corta rotación. Instituto Forestal de Chile y Corporación de Fomento de la Producción. Informe Técnico N° 122. 115p.

**Culot, J. Ph. 2000.** Caracterización edafo-climática de la región sudeste de la provincia de Buenos Aires para *Eucalyptus globulus*. Primer seminario Internacional de *Eucalyptus globulus* en la Argentina. Mar del Plata, Argentina. Diciembre de 2000. Trabajo completo en Actas: 2-9.

**Dirección Provincial de Estadística. DPE. 2003.** Producto Bruto Geográfico. Desagregación municipal. Dirección Provincial de Estadística. Ministerio de Economía de la provincia de Buenos Aires 103p.

**EEA-INTA Balcarce, 2008.** Estación Experimental Agropecuaria Balcarce –INTA. Argentina.

**EEA-INTA Castelar, 2007.** Estación Experimental Agropecuaria Castelar –INTA. Argentina.

**Igartúa, D.V. 2013.** Propiedades xilotecnológicas de *Acacia melanoxylon* implantada en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires-Argentina. Tesis Doctoral. 270p. Universidad Nacional de La Plata. SEDICI, repositorio institucional.

**Igartúa, D.V; Monteoliva, S. 2009.** Densidad básica de la madera de *Acacia melanoxylon* R. Br en relación con la altura de muestreo, el árbol y el sitio. *Revista Investigación Agraria: Sistema y Recursos Forestales* 18 (1): 101-110.

**Igartúa, D.V.; Monteoliva, S.; Piter, J. C. 2009.** Estudio de algunas propiedades físicas de la madera de *Acacia melanoxylon* en Argentina. *Maderas. Ciencia y tecnología* 11 (1): 3-18.

**INSTITUTO FORESTAL-CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL. INFOR-CONAF. 1997.** Monografía de Aromo australiano *Acacia melanoxylon*. Santiago de Chile. 100p.

**INTA. 1995.** Propiedades de la madera de eucalipto. En: Manual para Productores de Eucaliptos de la Mesopotamia Argentina. Ed. Grupo Forestal, EEA INTA Concordia, Argentina. 162p.

**Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM. 1963.** Maderas. Método de determinación de la humedad. IRAM 9532. Buenos Aires. Argentina. 13p.

**Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM. 1973.** Maderas – Método de determinación de la densidad aparente. IRAM 9544. Buenos Aires. Argentina

**Martínez-Crovetto, R. 1947.** La naturalización de *Acacia melanoxylon* en Balcarce (Provincia de Buenos Aires). *Revista de Investigaciones Agrícolas* 2. Tomo I.

**Maslin, B.R.; Mc Donald, M.W. 2004.** Acacia Search-Evaluation of *Acacia* as a woody crop option for Southern Australia. Rural Industries Research and Development Corporation. Publication No. 03-017. 260 p. Australia.

**Monteoliva, S.; Igartúa, D.V. 2008.** Morfología fibrosa, composición química y densidad de *Acacia melanoxylon*. Estudios preliminares sobre el recurso en Argentina. V Congreso Iberoamericano de Celulosa y Papel (CIADICYP), México, Octubre 2008.

**Monteoliva, S.; Ciganda, V.; Igartúa, D.V. 2012.** Contenido de duramen y de albura en *Eucalyptus globulus* y *Acacia melanoxylon* implantadas en Argentina. *Maderas. Ciencia y tecnología* 14 (1): 53-63.

**Monteoliva, S.; Igartúa, D.V. 2010.** Variación anatómica de la madera de *Acacia melanoxylon* implantada en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Rev Fac Agr La Plata* 109 (1): 1-7.

**Monteoliva, S.; Igartúa, D.V.; Matta, E.J. 2009.** Color de la madera de *Acacia melanoxylon* implantada en Buenos Aires, Argentina. *Bosque* 30 (3): 192-197.

**Ministerio de Relaciones Exteriores Comercio Internacional y Culto. MRECI y C. 2006.** Ministerio de Relaciones Exteriores Comercio Internacional y Culto. Informe sectorial sector maderas.

**Nicholas, I.; Brown, I. 2002.** *BLACKWOOD- A Handbook for Growers and Users*. Forest Research Bulletin No. 225. New Zealand Forest Research, Rotorua. 100p.

**Pinilla, J.C.; Molina, M.P.; Briones, R.; Hernández, G. 2006.** Opciones de productos a partir de la madera de Acacia y su promoción. Antecedentes de una experiencia con Acacias en Chile. Boletín del CIDEU 2: 73-92. Universidad de Huelva, España.

**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.

**Rotelo-Agnelli, S. 2008.** Crecimiento de *Acacia melanoxylon* R. Br. en el sudeste de la provincia de Buenos Aires-Argentina. Tesis de grado, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. 97 p.

**Santos, A.; Teixeira, A.; Anjos, O.; Rogério Simões, R.; Nunes, L.; Machado, J.; Tavares, M. 2005.** Wood potential use of *Acacia melanoxylon* growing in pure or mixed stands with *Pinus pinaster* by the portuguese forest industry. *Série Técnica* 15: 35. p.98.

**Saporiti-Machado, J.; Louzada, J.J.; Santos, A.J.A.; Nunes, L.; Anjos, O.; Rodrigues, J.; Simões, R.M.S.; Pereira, H. 2014.** Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.). *Materials and Design* 56: 975-980.

**Tavares, F.; Louzada, J.L.; Pereira, H. 2014.** Variation in Wood density and ring width in *Acacia melanoxylon* at four sites in Portugal. *Eur J Forest Res* 133:31-39.