



MODELOS GENERALIZADOS ADITIVOS APLICADOS A LA CLASIFICACIÓN VISUAL ESTRUCTURAL DE MADERA DE PINO URUGUAYO

GENERALIZED ADDITIVE MODELS APPLIED TO VISUAL GRADING OF URUGUAYAN PINE TIMBER

Cardoso, Andrea ^{(1)*}; O'Neill, Hugo ⁽²⁾; Borges, Alejandra ⁽³⁾; Baño, Vanesa ⁽⁴⁾; Moya, Laura ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Ing. Agr. Mag. Centro Universitario de la Región Este. Universidad de la República. Rocha, Uruguay.

⁽²⁾ Per. Agr. Departamento de Proyectos Forestales, Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Montevideo, Uruguay

⁽³⁾ Ing. Agr. Mag. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

⁽⁴⁾ Doctora. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

⁽⁵⁾ PhD. Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay. Montevideo, Uruguay

* Contacto: andrea10del85@gmail.com

CÓDIGO: 4619729

Resumen

En las últimas tres décadas, se ha incrementado la disponibilidad de madera aserrada uruguaya proveniente de plantaciones de rápido crecimiento. Parte de esa madera puede tener potencial uso estructural en la medida que cuente con especificaciones técnicas conocidas, usualmente estimadas mediante metodologías de clasificación no destructivas. Este trabajo plantea el diseño de un método de clasificación visual estructural para madera aserrada de pino proveniente de plantaciones de rápido crecimiento del noreste de Uruguay. Para ello se evaluaron dos muestras de madera procedentes de plantaciones comerciales, una de *Pinus taeda* de 14 años, y otra de *P. elliottii* de 27 años. Sobre 233 piezas de tamaño estructural se midió una serie de variables visuales. Posteriormente las piezas se ensayaron a flexión estática según EN 408 determinándose la resistencia y la rigidez de flexión, y la densidad. Se aplicaron Modelos Generalizados Aditivos para determinar las variables visuales significativas en la predicción del módulo de elasticidad. Número de anillos de crecimiento, diámetro de nudo, y torcedura y encorvadura, resultaron ser las variables relevantes en la predicción del módulo de elasticidad. Se definieron dos calidades visuales: EC7 con propiedades que permiten su asignación a la clase de resistencia C14 de EN 338, y EC5 con propiedades físicas y mecánicas inferiores ($E_0=5458$ MPa; $E_{0,k}=3563$ MPa; $f_{m,k}=12$ MPa; $\rho_k=0,317$ g/cm³).

Palabras-clave: modelos generalizados aditivos, clasificación visual, pino uruguayo, madera estructural

Abstract

The promotion of fast-growing plantations in the last thirty years has led to an increase in the availability of Uruguayan sawn timber. Part of this timber could be used for structural applications, if the timber is graded and its structural properties are known. Visual grading is one of the most popular used methods. This paper presents the design of a structural visual grading method for Uruguayan sawn pine timber from fast growing plantations. Two samples from two commercial plantations in northeastern Uruguay were evaluated: one from 14 years old *Pinus taeda*, and a second from 27 years old *P. elliottii*. A series of visual variables was measured on 233 structural size beams. The beams were then tested in static bending according to EN 408, for strength and stiffness, and density determination. A Generalized Additive Model was used to define the relevant variables for the modulus of elasticity prediction. Number of growth rings, knot diameter, and warp were the most relevant variables in the prediction of modulus of elasticity. A structural visual grade EC7 with properties similar to those of C14 strength class (EN 334), and a visual grade EC5 with lower physical and mechanical properties ($E_0=5458$ MPa; $E_{0,k}=3563$ MPa; $f_{m,k}=12$ MPa; $\rho_k=0.317$ g/cm³) were defined.

Keywords: generalized additive model, visual grading, Uruguayan pine, structural timber.



1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay la superficie efectiva forestada es de 990.030 hectáreas, de las cuales 26% está plantada principalmente con especies de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* (MGAP 2012). El 72% de la superficie ocupada por estas plantaciones, está ubicada al noreste del país entre los departamentos de Rivera y Tacuarembó (MGAP 2012), donde además se encuentran instaladas las principales industrias de transformación mecánica de pino. Para el período 2010-2030, Dieste (2012) estimó en 3 millones de m³ la oferta anual de madera de pino proveniente de la zona norte del país con este destino, de los cuales 1,3 millones de m³/año quedan sin capacidad instalada de industrialización. MGAP (2016) presenta resultados similares, donde la tasa de crecimiento promedio de la producción de madera aserrada de coníferas para el período 2010-2015 fue de 1,7 millones m³/año.

En comparación con otras zonas de Uruguay, la región noreste se caracteriza por presentar mayores precipitaciones y mejor distribuidas (1200-1300 mm promedio anuales), mayor radiación solar incidente, factores que aceleran el crecimiento de las plantaciones de *P. elliottii* y *P. taeda* (Brussoni y Cabris 2006). Como consecuencia, la madera de estas plantaciones se cosecha a edades tempranas: entre 10-15 años se comercializa la madera obtenida de los raleos y, no superando en general los 20-25 años la madera cosechada al turno final. Varios autores indican que el mayor porcentaje de madera juvenil se desarrolla desde los 5 o 10 años hasta los 20 años en las coníferas (Green *et al.* 1999; Tuset y Durán 2008). La madera de pino con mayor porcentaje de madera juvenil, entre otras, es la causa principal de los valores bajos de las propiedades físicas y mecánicas de estas especies (Moya *et al.* 2015). En relación a las especies de coníferas más plantadas, no se han encontrado diferencias significativas de los valores de las propiedades físicas y mecánicas entre *P. taeda* y *P. elliottii* de plantaciones uruguayas (O'Neill *et al.* 2004; O'Neill y Tarigo 2008). Es usual encontrar en el mercado madera con la misma denominación, que pertenecen indistintamente a una especie u otra (Baño *et al.* 2015; Moya *et al.* 2015) razón fundamental por la que se estudian juntas.

La clasificación visual estructural asigna a cada pieza una calidad visual asociada a sus propiedades físicas y mecánicas según ciertos parámetros visuales. Los parámetros relacionados con la velocidad de crecimiento de los árboles, las nudosidades y alabeos, entre otros, influyen sobre estas propiedades y en particular sobre su rigidez (Moya *et al.* 2015), propiedad fundamental para el diseño estructural (Moore 2012).

La técnica estadística de Modelos Generalizados Aditivos (MGA) propuesta por Hastie y Tibishirani (James *et al.* 2013) permite predecir los valores de una propiedad, por ejemplo del módulo de elasticidad longitudinal (E_0), a partir de varias variables independientes continuas o categóricas, sin restricciones de normalidad u homocedasticidad de sus residuos, a diferencia de las técnicas comúnmente usadas en clasificación visual estructural, como las regresiones lineales simples o múltiples (James *et al.* 2013; Yee y Mitchell 1991). Estudios previos realizados por el autor (Cardoso *et al.* 2018) muestran que la técnica de MGA permite obtener un modelo adecuado para predecir E_0 de la madera de pino uruguayo.

En Uruguay se han realizado varios estudios de caracterización de madera de pino proveniente de diferentes zonas del país (Pérez Favaro *et al.* 2000; Pérez del Castillo 2001; O'Neill *et al.* 2002; O'Neill *et al.* 2003; O'Neill y Tarigo 2003; Pérez del Castillo y Venturino 2003; O'Neill *et al.* 2004; O'Neill y Tarigo 2008), así como también se ha estudiado la influencia de los parámetros visuales sobre las propiedades físicas y mecánicas, buscando asignarle una calidad visual estructural a la madera de pino nacional (Baño *et al.* 2015; Moya *et al.* 2015; Moya *et al.* 2017). En 2015, se publicó un informe (Baño *et al.* 2015) que incluye documentación técnica para generar un cuerpo normativo nacional sobre madera estructural. En ese informe se argumenta las ventajas para Uruguay de alinearse al cuerpo normativo europeo al que refiere como “consistente y coherente” porque incluye indicaciones técnicas de fabricación de



productos, metodologías de ensayos, interpretación y análisis de resultados, entre otras. Adoptar ese cuerpo normativo permite el ahorro de tiempo destinado a la generación de normas de características similares y su actualización periódica. Finalmente, en 2018, fue aprobada la norma UNIT 1261 de Clasificación visual de madera de pino como resultado de los esfuerzos de estos trabajos. Esta norma provee al usuario de valores característicos para dos clases estructurales, usando como base dos muestreos de madera de *P. elliotii* y *P. taeda* del litoral oeste y sur del Uruguay. En línea con estos estudios se plantea la necesidad de ampliar la base de datos de madera aserrada de pino para mejorar la representatividad de su caracterización. Además, publicaciones previas (Moya *et al.* 2017) indicaron que una regla de clasificación visual para madera de pinos uruguayos que incluya la medición de los anillos de crecimiento, que posiblemente mejoraría la predicción de la rigidez de la madera.

El objetivo general de este trabajo fue contribuir con resultados que permitan mejorar las reglas de clasificación visual estructural para madera aserrada de pino uruguayo. Los objetivos específicos incluyeron: i) predecir el módulo de elasticidad longitudinal a partir de los parámetros visuales con mayor influencia en la madera, incluyendo el número de anillos por centímetro; y ii) contribuir en la definición de calidades visuales para la madera estructural de pino uruguayo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó madera proveniente de dos aserraderos ubicados en la zona noreste de Uruguay. Los muestreos se realizaron en el aserradero, en uno se seleccionó madera aserrada de una plantación de 14 años de *Pinus taeda* con manejo silvícola de podas (M1), y en otro, madera de árboles de 27 años de *Pinus elliotii* sin manejo silvícola (M2). La disparidad de edad, procedencia y manejo silvícola es representativa de la oferta de madera en el mercado nacional. Las vigas fueron secadas en horno hasta 12% de contenido de humedad (CH), cepilladas hasta dimensiones promedio finales de 50 mm x150 mm x2800 mm y trasladada al laboratorio del Departamento de Proyectos Forestales del LATU.

Sobre 111 piezas de M1 y 122 piezas de M2, se midió una serie de parámetros visuales que se denominaron en este trabajo como: diámetro de nudo mayor de cara (DCARA), diámetro de nudo mayor de canto (DCANTO), posición de nudo mayor de cara (PDCARA), posición de nudo mayor de canto (PDCANTO), número de anillos de crecimiento por centímetro (NAPCP), orientación de los anillos de crecimiento (TC), presencia y posición de médula (MEDULA), combado (COMB), encorvadura (ENC) y torcedura (TOR). La elección de los parámetros estuvo pautada por la facilidad de su medición en aserradero, y el potencial nivel de asociación entre el parámetro visual y las propiedades de flexión, o la densidad, buscando discriminar por clases. Es importante destacar que en esta selección se incluyeron variables que dependen mayoritariamente de las propiedades físico-mecánicas de la madera, y variables relacionadas con los procesos de secado, tales como los alabeos.

La forma de medición de los parámetros se basó preliminarmente en la norma de clasificación visual UNE EN 1310 (1997). Algunas variables como la posición de los nudos, la orientación de los anillos y el número de anillos de crecimiento fueron medidas como se indica a continuación: PDCARA y PDCANTO refieren a la posición del nudo en relación al largo de la pieza dividida en tercios, TC es la disposición predominante de los anillos respecto a la cara de la pieza y NAPCP es el número de anillos completos (leños temprano y tardío) medidos sobre el segmento de recta más largo que siendo perpendicular a los anillos pasa por la médula en caso de estar presente, o por el centro de la sección transversal.

Luego de clasificadas, las 233 vigas fueron ensayadas a flexión estática en cuatro puntos de acuerdo a EN 408 (2011) en máquina universal Minebea con una celda de carga de 250 kN y



con capacidad para aplicar cargas a velocidad constante. Para cada viga se determinó el módulo de elasticidad longitudinal (E_0) y la resistencia a flexión (f_m). Luego de finalizado el ensayo, de cada viga se extrajo una probeta para estimar la densidad aparente corriente (ρ) y el CH. Los valores E_0 , f_m y ρ fueron calculados según EN 384 (2010) para cada uno de los muestreos, realizando las correcciones por CH correspondientes para las variables E_0 y ρ .

2.1. Análisis de datos

2.1.1. Modelo de predicción del módulo de elasticidad

Se utilizaron Modelos Generalizados Aditivos (MGA) para predecir el módulo de elasticidad. Las variables incluidas en el modelo como regresoras fueron las que resultaron significativas en la predicción de E_0 (p-valor $<0,05$). Como indicadores de la capacidad de predicción del modelo se utilizó el porcentaje de variabilidad explicada (%VE) por el modelo y el porcentaje de error de predicción (%EP) por muestra de prueba respecto a E_0 medio. El %VE indica el porcentaje de variabilidad que puede ser explicada por el modelo a partir de los datos en estudio; por tanto se considerará mejor cuanto más cercano sea el valor a 100%. El %EP cuantifica el error de predicción al clasificar una nueva pieza. Para el cálculo del error se tomó al azar una submuestra compuesta por dos tercios del total de las piezas en estudio, denominada muestra de entrenamiento, a partir de la cual se ajustó el modelo de predicción. El tercio restante se usó para evaluar las diferencias entre los valores reales y los predichos a partir del modelo ajustado. Esta operación de sub-muestreo se repitió cincuenta veces sobre el total de las piezas y el error de predicción fue calculado en cada repetición. El promedio de estos errores es el error por muestra de prueba promedio, que se indicó como un porcentaje de la media de E_0 .

Para el análisis de datos se utilizó el paquete de análisis *mgcv* (Wood 2011) del software R (R Core Team 2014). El resultado del MGA devuelve gráficos de curvas de nivel o de contorno, donde los valores de las variables visuales que resultaron significativas (p-valor $<0,05$) están representadas de a pares sobre los ejes, y los valores de E_0 predichos sobre curvas de contorno. El valor de rigidez para la clase resistente inferior, C14 de EN 338 (2010) es de 7000 MPa. En base a las salidas gráficas de MGA y considerando el %EP del modelo, se obtuvieron los rangos de valores de las variables visuales significativas que predicen un valor de E_0 superior a 7000 MPa.

2.1.2. Formulación de la propuesta de clasificación visual

Utilizando estos rangos, se analizaron todas las posibles combinaciones de valores de las variables visuales teniendo en cuenta los requisitos de EN 384 (2010), y se seleccionó una combinación de variables visuales que presentó valores medios y característicos de E_0 , f_m y ρ que alcanzó las propiedades asociadas a una clase de resistencia de EN 338 (2010). Se calculó el porcentaje de rechazo de piezas que no alcanzaron ésta clase de resistencia. A partir de la combinación de variables seleccionadas, se formuló la propuesta de clasificación visual estructural. Vale señalar que en este trabajo no se utilizó la versión actual de EN 384:2016 porque el análisis de los datos fue realizado previo a la publicación de dicha norma.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Modelos de predicción del módulo de elasticidad

De la aplicación de MGA para la predicción de E_0 a partir de los parámetros visuales, las variables que resultaron seleccionadas fueron: NAPCP, TOR, ENC, DCANTO y DCARA. A



pesar que las variables TOR y ENC están más relacionadas con los procesos de secado de la madera que con las propiedades mecánicas, en este modelo son seleccionadas como variables explicativas del módulo de elasticidad y se mantienen con el fin de describir la variabilidad y discriminar clases.

Este modelo presentó %VE de 54%, y de %EP respecto a E_0 medio fue de 21% (1295 MPa). Estos resultados son similares a los reportados por Hermoso *et al.* (2007) que encontró un coeficiente de determinación de 41,5% para explicar la variabilidad del módulo de elasticidad a flexión para madera de *Pinus radiata* del País vasco (España) a partir de la densidad y nudosidad.

A partir de los gráficos de contorno del modelo, se definieron los posibles rangos de valores de las variables visuales que predicen en conjunto un grupo de vigas con $E_{0,m} \geq 7000 \pm 1295$ MPa. Para la variable NAPCP se estima que será algún valor entre 0,5 y 1,0 anillos/cm, para la variable DCARA entre 20 y 40%, DCANTO entre 40 y 70%, ENC entre 3 y 11 mm en 2 m de largo y TOR entre 6 y 10 mm en 150 mm de ancho y 2 m de largo.

El rango para los anillos de crecimiento por centímetro es inferior a los valores indicados en la normativa española UNE 56544 (2011), que señala los límites dependiendo de la especie desde 1,0 a 2,2 anillos por centímetro. Valores similares a los propuestos por el modelo son los que adopta la normativa argentina IRAM 9662-3 (2005) de clasificación visual para *P. elliottii* y *P. taeda*, donde el límite se fijó entre 0,5 a 1,0 anillos por centímetro según la clase. En relación al rango de valores de DCARA y DCANTO los valores son similares a los propuestos por la norma española y argentina. En UNE 56544 (2011) se presenta 20 y 50% para nudo de cara, y 50 y 66% para nudo de canto, según la clase de la pieza. En la norma IRAM 9662-3 (2005), se presenta 33% y 66% como límites de las nudosidades según la clase. El rango de valores de torcedura y encorvadura obtenidos en este estudio, resultó más exigente que el indicado en la norma argentina, que fija 12 mm como límite para ambas clases y deformaciones. En cambio fueron similares a los indicados por la norma española, que señala 8 - 12 mm para la encorvadura y 6 - 12 mm para la torcedura, según la clase.

3.2. Formulación de la propuesta de clasificación visual

Se analizó una serie de combinaciones de variables visuales, utilizando los rangos obtenidos en la sección anterior y considerando los requerimientos indicados en EN 384 (2010). La combinación de variables visuales que resultó con mayores propiedades mecánicas quedó determinada por valores de vigas con NAPCP > 0,7 anillos/cm, DCARA < 30%, DCANTO < 70%, TOR < 8 mm en 150 mm de ancho y 2 m de largo y ENC < 9 mm en 2 m de largo.

A partir de éste resultado se propone una calidad visual denominada EC7, cuyas propiedades indicadas en la Tabla 1, permiten asignarla a la clase de resistencia C14 de EN 338 (2010).

Tabla 1. Módulo de elasticidad medio y característico, resistencia y densidad característica de ambos muestreos asociadas a la calidad visual EC7.

	n ¹	$E_{0,m}$ ² [MPa]	$E_{0,k}$ ³ [MPa]	$f_{m,k}$ ⁴ [MPa]	ρ_k ⁵ [g/cm ³]
M1	46	6138 (1117)	4398	17	0,302
M2	51	8136 (1898)	5183	18	0,337
Población	97	7189 (1862)	4811	15	0,320

¹número de vigas clasificadas

²módulo de elasticidad medio. Entre paréntesis curvo se presenta el desvío estándar.

^{3,4,5}valores característicos de módulo de elasticidad, resistencia y densidad aparente corriente respectivamente.



⁴para los valores por muestreo, $f_{m,k}$ se corrigió por altura ($kh=1$). En los totales, $f_{m,k}$ se corrigió por número y tamaño de la muestra ($ks=0,85$) y por tipo de clasificación ($kv=1$).

El porcentaje de piezas rechazadas de $M1$ y $M2$ fue de 62% y 54%, respectivamente. Similares resultados se reportaron en Baño *et al.* (2015), donde el porcentaje de rechazo fue de 71% y 50% para dos muestreos de 15 y 25 años de *Pinus elliottii/taeda* del suroeste y litoral de Uruguay, respectivamente. Se evidencia que la madera de pino proveniente de árboles con edad de corte de 14-15 años presenta propiedades físicas y mecánicas inferiores que la madera de edades mayores (25-27 años). Se recomienda estudiar edades intermedias buscando conocer las rotaciones óptimas para obtener madera estructural.

Fank *et al.* (2016) aplicando normativa de clasificación visual de su país reportó un porcentaje de rechazo de 33% para dos muestreos de 27 y 30 años de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* respectivamente de Misiones (Argentina), 25% más bajo que el obtenido en nuestro estudio. Otro trabajo de *Pinus radiata* del norte de España que aplicó la norma UNE 56544:2005, obtuvo un 37% de rechazo para vigas clasificadas (Hermoso *et al.* 2007).

Un 58% de las piezas de la base de datos no alcanzan la calidad visual propuesta EC7, entonces se propone otra calidad visual que reduzca éste porcentaje de rechazo total, y permita un mejor aprovechamiento de la madera aserrada de pino disponible en el país para usos menos exigentes. Moya *et al.* (2015) definió una categoría “E5” que refiere al valor de elasticidad medio (5000 MPa) para un grupo de piezas de madera de *P. elliottii/taeda* de edades similares que no alcanzó la clase de resistencia mínima de la norma europea EN 338 (2010) pero que pueden utilizarse por ejemplo como pie derecho en una estructura de bajas solicitaciones. A nivel nacional también, Baño *et al.* (2016) sugiere el uso de madera con propiedades físicas y mecánicas inferiores a EC7 como materia prima en la producción de madera contralaminada (CLT). Otros países como Nueva Zelanda, presenta en su normativa NZS 3603:1993 clases de resistencia en seco para estructuras con menores solicitaciones. El grado estructural “SG6” o “MSG6” que requiere una resistencia característica a flexión de 10 MPa y una rigidez media a flexión de 6000 MPa corresponde a madera que puede ser utilizada por ejemplo en muros de cargas bajas o correas de cerchas (Moore 2012). La normativa chilena NCh 1198 (2006) para las especies de pino cultivadas en ese país (excepto *Pinus radiata*), también presenta clases de resistencia para estructuras de menores solicitaciones. Por ejemplo “F4” y “F5” que admiten un módulo de elasticidad medio de 5000 MPa y 5500 MPa respectivamente.

Siguiendo la misma metodología usada para definir la calidad visual EC7, se analizaron nuevamente los resultados del MGA, buscando valores de las variables visuales que predigan $E_{0,m} = 5000$ MPa con un error de predicción de ± 1295 MPa. Se obtuvo una restricción para $NAPCP \geq 0,5$ anillos/cm, se mantuvieron los rangos de valores posibles para DCARA entre 20% - 40% y para DCANTO entre 40% - 70%. No encontrándose restricciones para TOR y ENC.

Utilizando estas nuevas restricciones para NAPCP, DCARA y DCANTO, se analiza una serie de combinaciones de valores de estas tres variables visuales buscando obtener el menor rechazo posible y se define una calidad visual EC5. La calidad visual EC5 quedó restringida a las piezas con $NAPCP \geq 0,5$ anillos/cm, $DCARA \leq 50\%$ y $DCANTO \leq 70\%$. En la Tabla 2 se presentan las propiedades físicas y mecánicas asociadas a EC5.



Tabla 2. Módulo de elasticidad medio y característico, resistencia y densidad característica de ambos muestreos asociadas a la calidad visual EC5.

	n ¹	$E_{0,m}$ ² [MPa]	$E_{0,k}$ ³ [MPa]	$f_{m,k}$ ⁴ [MPa]	ρ_k ⁵ [g/cm ³]
M1	59	5287 (844)	3765	16	0,305
M2	40	5709 (1647)	3263	11	0,336
Población	99	5458 (1243)	3563	12	0,317

¹ número de vigas clasificadas

² módulo de elasticidad medio. Entre paréntesis curvo se presenta el desvío estándar.

^{3,4,5} valores característicos de módulo de elasticidad, resistencia y densidad aparente corriente respectivamente.

⁴ para los valores por muestreo, $f_{m,k}$ se corrigió por altura ($kh=1$). En los totales, $f_{m,k}$ se corrigió por número y tamaño de la muestra ($ks=0,85$) y por tipo de clasificación ($kv=1$).

Fue posible reducir el porcentaje de rechazo total de 58% a 16%. El porcentaje de rechazo para M1 y M2 fue de 14% y 18%, respectivamente.

A partir de los resultados de este estudio se formuló la propuesta de clasificación visual estructural para *Pinus elliottii/taeda* del noreste de Uruguay (Tabla 3), que incluye los límites de las variables visuales obtenidas para las clases de resistencia EC7 y EC5. Además, en la propuesta se incluyen límites para las singularidades: grietas y rajaduras, bolsillos de resina, corteza, arista faltante y alteraciones biológicas tomados de la norma española UNE 56544.

Tabla 3. Propuesta de clasificación visual estructural para *Pinus elliottii/taeda* del noreste de Uruguay.

Variable visual	EC7	EC5
Diámetro de nudo mayor de cara (%)	< 1/3 h (30%)	< 1/2 h (50%)
Diámetro de nudo mayor de canto (%)	< 2/3 h (70%)	
Número de anillos por centímetro	> 0,7 anillos/cm	> 0,5 anillos/cm
Médula	Se admite	
<u>Alabeos:</u>	Sin restricciones	
Combado	< 15 mm (*)	
Encorvadura	< 9 mm (*)	
Torcedura	< 8 mm (**)	
Grietas y rajaduras	< 1,0 m o < 1/4 l (***)	
Bolsillo de resina	< 1,5 h (***)	
Corteza	< 1,5 h (***)	
Arista faltante	< 1/3 l (***)	
<u>Alteraciones biológicas:</u>		
Pudriciones	No se admite (***)	
Mancha azul	Se admite (***)	
Orificios de insectos	No se admite (***)	

EC7 es la calidad visual asociada a las propiedades físico-mecánicas $E_0=7189$ MPa; $E_{0,k}=4811$ MPa; $f_{m,k}=15$ MPa; $\rho_k=0,320$ g/cm³; EC5 es la calidad visual asociada a las propiedades $E_0=5458$ MPa; $E_{0,k}=3563$ MPa; $f_{m,k}=12$ MPa; $\rho_k=0,317$ g/cm³

(*) en 2 m de largo (l); (**) en 150 mm de altura (h) en 2 m de largo; (***) Tomado de la norma española UNE 56544 (2011). Las piezas deben clasificarse en seco (contenido de humedad = 12%), de dimensiones h=150 mm y l=2,8 m.



4. CONCLUSIONES

Se definió una calidad visual EC7 asociada a la clase de resistencia C14 de EN 338 (2010). Adicionalmente, se estableció otra calidad visual EC5 con propiedades físicas y mecánicas inferiores ($E_{0,m}=5458$ MPa, $f_{m,k}=12$ MPa, $\rho_k=0,317$ g/cm³) que puede ser empleada como pie derecho en construcciones de bajo compromiso estructural o como materia prima para producir madera contralaminada.

El número de anillos de crecimiento por centímetro fue una variable visual importante que resultó estar muy relacionada con E_o , pero no fue suficiente para definir una calidad visual estructural. Fue necesario considerar también el tamaño de los nudos y los alabeos, particularmente torcedura y encorvadura.

La madera proveniente de plantaciones de mayor edad (27 años) presentó mayores valores de propiedades físicas y mecánicas, y menores porcentajes de rechazo que la madera de menor edad (14 años). Por ello se recomienda continuar los estudios sobre madera de pino con destino estructural de ciclos de corte mayores a 25 años.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer especialmente a la Dirección Nacional de Industrias de Ministerio de Industria Energía y Minería de Uruguay (Proyecto 1318/011) por proveer los fondos para el desarrollo de este trabajo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asociación Española de Normalización. (1997). Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades. UNE EN 1310. AENOR, Madrid, España.

Asociación Española de Normalización. (2011). Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. UNE 56544. AENOR, Madrid.

Baño, V.; Godoy, D.; Vega, A. (2016). Experimental and numerical evaluation of cross-laminated timber (CLT) panels produced with pine timber from thinnings in Uruguay. World Conference on Timber Engineering, Vienna.

Baño, V.; Moya, L.; O'Neill, H.; Cardoso, A.; Cagno, M.; Cetrangolo, G.; Domenech, L. (2015). Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera. Informe final. Facultad de Ingeniería, Montevideo. ISBN 978-9974-0-1344-5

Brussoni, A.; Cabris, J. (2006). Regímenes silvícolas y retorno financiero para *Pinus taeda* en las zonas litoral oeste y noreste de Uruguay. Agrociencia Uruguay v. 10, n. 2, p. 125-135.

Cardoso, A.; Moya, L.; Borges, A. (2018). Prediction of bending stiffness of Uruguayan loblolly and slash pine timber applying different statistics techniques. BioResources v. 14, n. 4, p. 755 – 768.

Comité Europeo de Normalización. (2010a). Madera estructural. Clases resistentes. EN 338. CEN, Bruselas.

Comité Europeo de Normalización. (2010b). Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. EN 384. CEN, Bruselas.



Comité Europeo de Normalización. (2011). Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. EN 408. CEN, Bruselas.

Dieste A. (2012). Programa de promoción de exportaciones de productos de madera. [Disponible en línea]. http://gp.gub.uy/sites/default/files/documentos/programa_de_promocion_de_exportaciones_de_productos_de_madera_-_informe_preliminar_andres_dieste_-_2012.pdf [acceso Agosto 2014]

Fank, P.Y.; Stefani, P.M.; Piter, J.C. (2016). Análisis de la relación entre las propiedades mecánicas de flexión y tracción paralela a las fibras en la madera de pino resinoso cultivado en el nordeste de Argentina. XV EBRAMEM. Curitiba, Brasil.

Green, D.W.; Winandy, J. E.; Kretschmann, D. E. (1999). Mechanical properties of wood. Capítulo 4. Wood handbook. Wood as an engineering material. Forest Products Society, USA.

Hermoso, E.; Carballo, J.; Fernández-Golfín, J.I. (2007). Caracterización estructural de la madera de *Pinus radiata* D. Don del país vasco (España) acorde a las modificaciones normativas. Maderas. Ciencia y tecnología v. 9, n. 3, p. 223 – 232.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2005). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y *elliottii* (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*). IRAM 9662-3. IRAM, Argentina.

Instituto Nacional de Normalización. (2006). Madera. Construcciones en madera. Cálculo. NCh 1198. INN, Chile.

James, G.; Witten, D.; Hastie, T.; Tibshirani, R. (2013). An introduction to statistical learning with application to R. Springer, New York.

Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. (2012). [Disponible en línea] <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,dgf,dgf-cartografia-forestal-2012,O,es,0>, [acceso setiembre 2016]

Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. (2016). [Disponible en línea] <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,dgf,dgf-extraccion-produccion-consumo,O,es,0>, [acceso setiembre 2016]

Moore, J. (2012). Growing fit-for-purpose structural timber. What is the target and how do we get there? New Zealand Journal of Forestry v. 57, n. 3, p. 17-24.

Moya, L.; Cardoso, A.; Cagno, M.; O'Neill, H. (2015). Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. Maderas. Ciencia y Tecnología. v. 17, n. 3, p. 597 – 612.

Moya, L.; Domenech, L.; Cardoso, A.; O'Neill, H.; Baño, V. (2017). Proposal of visual strength grading rules for Uruguayn pine timber. European Journal of wood and wood products v. 75, p. 1017 – 1019.

O'Neill H., Tarigo F., Trambauer C. (2002). Propiedades mecánicas de *Pinus elliottii* Eng. del litoral de Uruguay. Informe 1. Grupo técnico de madera aserrada de pino GT3. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 41 pp.

O'Neill H., Tarigo F., Trambauer C. (2003). Propiedades mecánicas de *Pinus taeda* L. del litoral de Uruguay. Informe 2. Grupo técnico de madera aserrada de pino GT3. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 47 pp.



O'Neill, H.; Tarigo, F. (2003). Comportamiento en flexión de *E. grandis*, *P. taeda* y *P. elliottii* de madera de tamaño real y de pequeñas probetas sin defectos. Nota técnica. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 6 pp.

O'Neill, H.; Tarigo, F.; Iraola, P. (2004). Propiedades mecánicas de *Pinus taeda* L. del norte de Uruguay. Informe 3. Grupo técnico de madera aserrada de pino GT3. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 48 pp.

O'Neill, H.; Tarigo, F. (2008). Propiedades mecánicas de *Pinus elliottii* Eng. del norte de Uruguay. Informe 7. Grupo técnico de madera aserrada de pino GT3. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 42 pp.

Pérez del Castillo A. (2001). Módulo de elasticidad y módulo de rotura en tablas de tamaño real de *Pinus elliottii* del sur del Uruguay. Informe 7. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 29 pp.

Pérez del Castillo A.; Venturino A. (2003). Inspección visual de tablas de tamaño real de *E. grandis*, *P. taeda* y *P. elliottii* de diferentes sitios del Uruguay. Informe 15. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 28 pp.

Pérez Favaro A.; De Castro R.; Otha S. (2000). Ensayos de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos. Informe 1. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 24 pp.

R Core Team. (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>

Tuset, R.; Durán, F. (2008). Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. Edición 2. Hemisferio Sur, Buenos Aires.

Wood, S. (2011). Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society (B)* v. 73, n. 1, p. 3-36.

Yee, T.W.; Mitchell, N.D. 1991. Generalized additive models in plant ecology. *Journal of Vegetation Science* v. 2, p. 587 – 602.