



COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ELASTO-RESISTENTE EN MADERAS DE SALICÁCEAS DE ARGENTINA

COMPARING ELASTORESISTIVITY BEHAVIOUR ON SALICACEAE TIMBER FROM ARGENTINA

María M. Refort ^{(1)*}, Eleana M. Spavento⁽¹⁾, Gabriel D. Keil⁽¹⁾, Carla, Taraborelli⁽¹⁾, Luis Acuña Rello⁽²⁾, Manuel M. De Hagen⁽³⁾.

⁽¹⁾ Laboratorio de Investigaciones en Madera. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Argentina.

⁽²⁾ Laboratorio de maderas. Universidad de Valladolid. Palencia, España.

⁽³⁾ Profesional independiente. La Plata, Argentina.

* Contacto: María Mercedes Refort: mmrefort@gmail.com

CÓDIGO: 4617748

Resumen

El incremento en el uso de la madera como elemento estructural está relacionado, principalmente, a los beneficios socio-económicos y ambientales que presenta en comparación con otros materiales constructivos tradicionalmente empleados. Su uso requiere del conocimiento del comportamiento físico-mecánico, expresado fundamentalmente como valores característicos de elasto-resistencia en flexión estática y densidad. Entre las maderas cultivadas de interés maderero en Argentina, las salicáceas (*Salix* spp. y *Populus* spp.) constituyen el tercer grupo de importancia, con una superficie forestada de aproximadamente 100.000 ha, representada fundamentalmente, en la región del Delta del Paraná y de los valles de Río Negro. Sin embargo, el conocimiento tecnológico de estas maderas, en ocasiones, es escaso. El objetivo del trabajo fue evaluar y comparar los valores elasto-resistentes de *Salix babylonica* x *Salix alba* "Ragonese 131/27" y *Populus* x *euramericana* "I-214" procedente de la región del Delta y de Río Negro, respectivamente. Se emplearon viguetas macizas semi-estructurales de 0,40 x 0,60 x 1,20 metros. Se trabajó con metodología de ensayo no destructiva-destructiva para la caracterización físico-mecánica, previa evaluación visual del material. En base a los resultados obtenidos, las maderas resultaron livianas y con valores elasto-resistentes en flexión estática estadísticamente diferentes (superiores en *Salix*), debiendo considerarse una clasificación por calidad estructural para definir el correcto uso del material en servicio.

Palabras-clave: Flexión estática, *Populus* spp.; *Salix* spp.

Abstract

Wood as a structural material has been on increment based on the socio-economic and environmental benefits that it has comparing with ordinary constructive materials. Their use requires the knowledge of physic-mechanic behaviour, expressed mainly as stiffness and strenght values on static bending and density. In Argentina the Salicaceae (*Salix* spp. y *Populus* spp.) are the third forests crop group in logging market, with a 100.000 ha, mostly located in Delta del Paraná and the valleys of Río Negro. Spite of being one of the most important forests crops, the technology knowledge of them is limited. The aims of this study was evaluated and compare stiffness and strenght values of *Salix babylonica* x *Salix alba* "Ragonese 131/27" and *Populus* x *euramericana* "I-214" from Delta del Paraná and Río Negro, respectively. Solid semi-structural joists of 0.40 x 0.60 x 1.20 meters were tested by destructive and non-destructive methods for physic-mechanic characterization. Previously the material was visual evaluated. The results showed that both timbers were a light material with significant differences in stiffness and strenght values to static bending (higher in willow), as a result ought to consider a visual selection by structural quality that allows the accurate use of service material.

Keywords: Static bending, *Populus* spp.; *Salix* spp.



1. INTRODUCCIÓN

El incremento en el uso de la madera como elemento estructural está relacionado, principalmente, a los beneficios socio-económicos y ambientales que presenta en comparación con otros materiales constructivos tradicionalmente empleados. Entre ellos pueden mencionarse el bajo gasto energético para su fabricación, transporte y puesta en obra como así también su buena relación resistencia/peso (Queipo et al. 2010).

Sin embargo, los modernos conceptos de diseño estructural, basados en los estados límite de resistencia y de servicio, requieren del conocimiento de las propiedades físico-mecánicas del material, expresadas fundamentalmente como valores característicos de elasto-resistencia en flexión estática y densidad. La densidad es uno de los parámetros más importantes para la evaluación de las cualidades de las maderas, por ser de fácil determinación y estar relacionada a las demás características del material, siendo el punto de partida en el estudio de la madera para sus diversos usos. La flexión estática ha sido considerada la principal propiedad mecánica para la evaluación de madera con fines estructurales, ya que en ella se integran propiedades como la compresión, la tracción y el cizalle (Piter 2003; Ramírez et al. 2001; Sánchez Gómez and Roa 2015).

La determinación de dichas propiedades se puede realizar mediante diferentes metodologías de ensayos. Dentro de ellas, las no destructivas, más ampliamente utilizadas se basan en la evaluación visual del lote de madera. Esta consiste en la inspección visual registrando y evaluando las singularidades que aparecen. La presencia y magnitud de dichas irregularidades definirán las calidades visuales. Asimismo, existen otras metodologías no destructivas que permiten la determinación de parámetros predictores de las propiedades físico-mecánicas tales como la velocidad de propagación de ultrasonidos (Iñiguez González 2007). Por otra parte, las metodologías de ensayos destructivos permiten la determinación de los valores reales elasto-resistentes del material y su posterior clasificación mecánica o por resistencia, con el fin de dividir y homogeneizar una población de madera en clases, o grupos, de distinta calidad, sobre la base de un análisis individual de cada pieza estructural (Fernández-Golfín Seco 2003).

En este contexto, a nivel nacional se han desarrollado diferentes normativas y reglamentaciones para el adecuado uso estructural de maderas de bosques cultivados, siendo el *Pinus* sp y el *Eucalyptus* las especies más difundidas en cuanto a áreas cultivadas y volumen de madera aserrada. Mientras que las salicáceas (*Salix* spp. y *Populus* spp.) constituyen el tercer grupo de importancia luego de ellas, con una superficie forestada de aproximadamente 100.000 ha, representada fundamentalmente, en la región del Delta del Paraná y de los valles de Río Negro (Borodowski 2017).

Dentro de los cultivares más representativos entre los álamos se encuentran los clones de *Populus deltoides* y *Populus x euroamericana*; con relación a los sauces se destacan el *Salix babylonica* var. *sacramenta*, *Salix babylonica x Salix alba* entre otros (MAGyP Ca. 2015) aunque en ambos casos, el conocimiento tecnológico de estas maderas, en ocasiones, es escaso.

De acuerdo con esto, el objetivo de este trabajo fue evaluar y comparar los valores elasto-resistentes de *Salix babylonica x Salix alba* “Ragonese 131/27” y *Populus x euramericana* “I-214” procedente de la región del Delta y de Río Negro, respectivamente.



2. METODOLOGÍA

2.1. Material de ensayo

Se trabajó con madera de *Salix babylonica* x *Salix alba* "Ragonese 131/27" (clon S.131/27) proveniente de un ensayo de mejoramiento genético del INTA Delta de 16 años de edad y con madera de *Populus x euramericana* I-214 (clon P.I-214) procedente de plantaciones comerciales del valle medio de Río Negro de 15 años de edad, Argentina. Ambos materiales fueron recepcionados en forma de vigas y acondicionados en el Laboratorio de Investigaciones en Madera (LIMAD), UNLP, hasta alcanzar la humedad de equilibrio higroscópico (15-17% en la ciudad de La Plata) constatada mediante xilohigrómetro digital (Hydromette HT 85, de la marca GANN). Posteriormente, el material fue reprocesado atendiendo a las especificaciones de la norma EN 408:2010+A1:2012 en cuanto a la proporción de las dimensiones de las piezas (longitud de la pieza al menos 19 veces la altura de la sección). De este modo, se obtuvieron 40 piezas de madera maciza de S.131/27 y 80 piezas de P.I-214 de 0,40 x 0,60 x 1,20 metros para ser caracterizadas mediante metodología de ensayo no destructiva-destructiva.

2.2. Ensayos no destructivos

2.2.1. Evaluación visual

En esta etapa se utilizó el método de clasificación visual empleando la norma IRAM 9662-4 (2015) atendiendo a las dos clases de resistencia para fines estructurales: Clase 1 (C-1) y Clase 2 (C-2) más una clase de Rechazo (R).

2.2.2. Evaluación sónica

Para esta etapa se trabajó con el equipo Microsecond Timer (Fakopp) mediante el cual se determina la velocidad de propagación de una onda ultrasónica a través de la longitud de la pieza a analizar. La onda es generada mediante un golpe de martillo en un palpador emisor y es captada en el otro extremo de la pieza mediante un palpador receptor. De este modo, se determina el tiempo (μs) que tarda la onda ultrasónica en dicha distancia. A partir de este tiempo de paso se determina la velocidad de la onda y posteriormente, el módulo de elasticidad dinámico (MOE_d), a partir de la Fórmula 1.

$$\text{MOE}_d = (V)^2 \times \delta, \quad (1)$$

dónde:

- MOE_d : Módulo Dinámico, en MPa.
- V: velocidad de paso de la onda, en m/seg.
- δ : Densidad de la pieza de madera, en Kg/m^3 .

El ensayo fue realizado con las piezas bi-apoyadas; fueron colocadas sobre dos soportes (sin fijación), separados de cada extremo a 0,22 L (siendo L=longitud de la viga), Figura 1, previa determinación del peso y dimensiones para la obtención de la densidad.

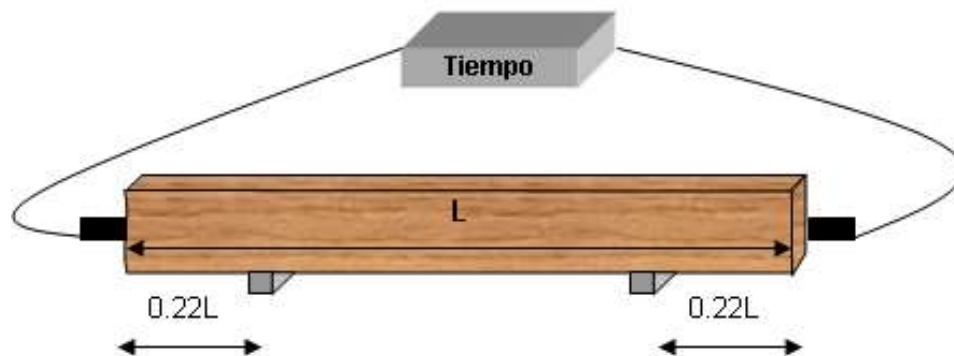


Figura 1: Esquema de ensayo de ultrasonidos en vigas bi-apoyadas.

2.3. Ensayo destructivo

Se realizó el ensayo de flexión estática acorde a la norma EN 408:2011+A1:2012; el mismo fue llevado a cabo en máquina Universal de ensayo ALFRED J. AMSLER & Co, Schaffouse - Suisse 7928 de 5000 Kg. A través de este ensayo se determinó el módulo de elasticidad estático (MOE), Fórmula 2 y el módulo de rotura (MOR), Fórmula 3. Finalizado el ensayo, en la zona cercana a la rotura de las piezas, se extrajeron probetas de las mismas escuadrías y de 100 mm de longitud para determinar su densidad en probetas libres de defecto. Se determinaron los valores característicos en cada caso: media para el MOE y 5to percentil para el MOR y la densidad.

$$MOE = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(\frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} \right)}, \quad (2)$$

dónde:

- MOE: módulo de elasticidad, en MPa.
- a: distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo, en mm.
- l: luz, en mm.
- b: anchura o menor dimensión de la sección transversal, en mm.
- h: altura o mayor dimensión de la sección transversal, en mm.
- F2 - F1: incremento de carga sobre la línea de regresión, con un coeficiente de correlación de 0,99 o superior, en kN.
- w2 - w1: incremento de la deformación correspondiente a F2 - F1, en mm.

$$MOR = \frac{3Fa}{bh^2}, \quad (3)$$

dónde:

- MOR: resistencia a la flexión, módulo de rotura, en MPa.
- F: carga, en kN.
- a, b y h: definidos en la fórmula (2).

En la Figura 2 se muestra un esquema del dispositivo y las condiciones de ensayo.

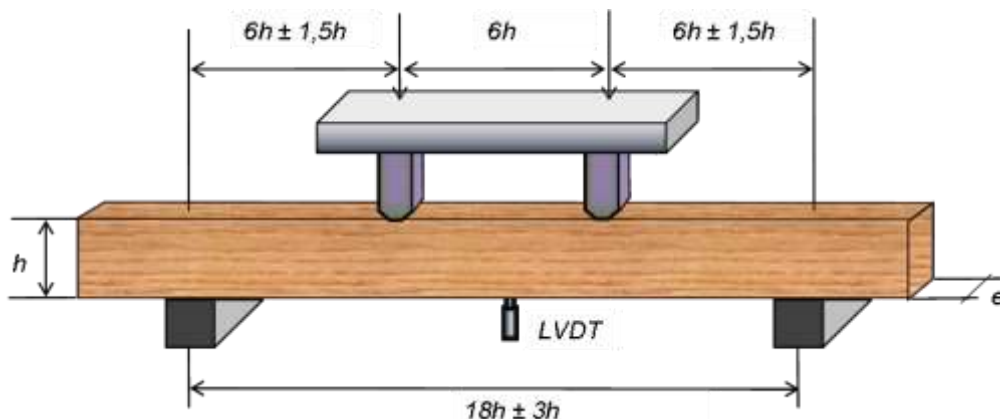


Figura 2: Esquema del dispositivo y condiciones de ensayo (EN 408:2011+A1:2012).

2.4. Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos fueron llevados a cabo con Software Statgraphics Centurion XV.II; se realizaron análisis descriptivos de cada variable, se comprobaron los supuestos estadísticos y, ante el incumplimiento de estos, se trabajó con análisis comparativo no paramétrico.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Análisis descriptivo

3.1.1. Evaluación visual

En base a la evaluación clasificatoria de la madera de S.131/27, se desprende que el 7,5% de dicho material resultó C-1 y el 12,5% C-2. El resto del material (80%) se constituyó como madera de rechazo para fines estructurales. El motivo de dichos rechazos estuvo constituido en mayor medida, por presencia de galerías de insectos, seguido por la presencia de nudos.

En relación a la madera P.I-214, un 45 % del material analizado se correspondió con C-1, 10% con C-2 y el resto (45%) fue rechazado para fines estructurales. Las causas del rechazo estuvieron dadas en primer término por nudos (de cara y/o canto), seguido por presencia de galerías de insectos.

3.1.2. Evaluación físico-mecánica (no destructiva-destructiva)

En la Tabla 1 se muestran los valores descriptivos, por clon, de las variables evaluadas.



Tabla 1: Variables físico-mecánicas: análisis descriptivo.

Clon	CH (%) [*]	Dn (Kg/m ³) [*]	MOE _d (MPa) [*]	MOE (MPa) [*]	MOR (MPa) [*]
S.131/27	10,90 (8,05)	451,59 (5,15)	10185,4 (12,30)	13351,2 (19,14)	20,60 (27,46)
P.I-214	13,35 (8,18)	403,44 (7,21)	9307,55 (9,64)	7214,66 (17,73)	21,98 (19,52)

*Los coeficientes de variación se indican entre paréntesis; CH: contenido de humedad (valor medio); Dn: densidad aparente normal (5to percentil); Vel: velocidad de ultrasonidos (valor medio); MOE_d: módulo de elasticidad dinámico (valor medio); MOE: Módulo de elasticidad (valor medio); MOR: módulo de rotura (5to percentil); Dn, Vel, MOE_d y MOE expresados al 12% de CH.

La madera de ambos clones resultó liviana en cuanto a los valores de densidad aparente (Coronel, 1994); valores similares de densidad fueron hallados por Filippetti *et al.* (2017) para dos clones de *Populus deltoides* (“Australiano 129/60”: 431 Kg/m³; “Stoneville 67”: 401 Kg/m³).

Los valores de MOE_d, resultaron predictores aceptables del MOE (R² ajust. 78%-70%, para S.131/27 y P.I-214, respectivamente), pero no para el MOR (R² ajust. <20%).

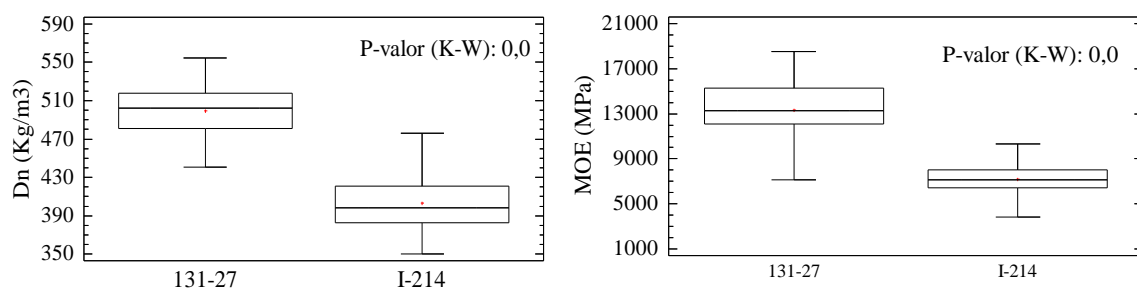
El MOE para S.131/27 fue superior al límite de clase de resistencia indicado en la C-1 de la norma IRAM 9662-4 (2015), mientras que el de P.I-214 no alcanzó los valores de MOE establecidos en la C-2 de la misma norma, resultando un material poco rígido, consecuentemente con lo indicado por Castro (2006). Valores intermedios a los descriptos fueron hallados por Filippetti *et al.* (2017) para *P. deltoides* “Australiano 129/60”: 10897 MPa y para “Stoneville 67”: 10929 MPa

En ambos casos, los valores de MOR se corresponderían con una C-2 de la norma antes mencionada; valores superiores de MOR fueron hallados para *P. deltoides* “Australiano 129/60”: 28,7 MPa y para “Stoneville 67”: 25,6 MPa (Filippetti *et al.*, 2017).

3.2. Análisis comparativos

3.2.1. Evaluación general

En la Figura 3 se presenta un análisis general, considerando las comparaciones entre clones para cada variable.



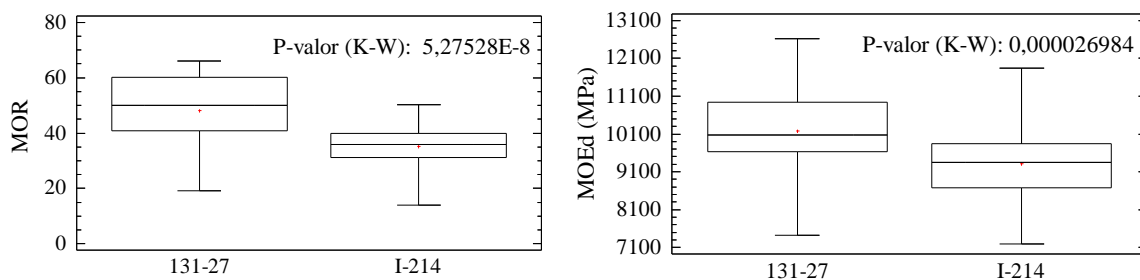


Figura 3: Comparaciones entre clones: D_n ; MOE , MOR y MOE_d (izquierda- derecha; arriba-abajo).

La madera de S.131/27 fue significativamente superior para todas las variables físico-mecánicas analizadas.

3.2.2. Evaluación por clases resistentes-clon.

En la Tabla 2 se muestran los resultados comparativos no paramétricos considerando los valores elasto-resistentes por clases para cada clon.

Tabla 2: Variables físico-mecánicas: análisis comparativos por clases.

Clon	Parámetros elasto-resistente	Parámetros estadísticos*		Clases resistentes*	
		Estadístico K-W	P-Valor	Clase	Mediana
S.131/27	D_n (Kg/m^3)	1,13913	0,565772	C-1	514,618 a
				C-2	500,966 a
				R	499,671 a
P.I-214		4,67248	0,0966907	C-1	393,481 a
				C-2	427,368 a
				R	398,542 a
S.131/27	MOE (MPa)	1,58169	0,453461	C-1	15333,0 a
				C-2	12806,8 a
				R	13261,5 a
P.I-214		7,99537	0,0183581	C-1	7211,88 a
				C-2	8052,39 a
				R	6628,46 b
S.131/27	MOR (MPa)	1,67035	0,433798	C-1	59,196 a
				C-2	44,465 a
				R	48,3795 a
P.I-214		9,50761	0,00861882	C-1	36,6425 a
				C-2	42,1735 b
				R	34,572 ac

*Estadístico K-W: Kruskal-Wallis; letras diferentes denotan diferencias significativas $P\text{-valor} < 0,05$.

En términos generales, la clase de rechazo para fines estructurales presentó los menores valores físico-mecánicos (expresados en mediana, Tabla 2), aunque en la mayoría de los casos, sin diferencias significativas entre las clases; sólo para el caso del MOE de P.I-214 la clase R, fue estadísticamente inferior a C-1 y C-2 y para el MOR del mismo clon la diferencia estuvo dada entre la C-2 y las otras clases. Asimismo, el valor clasificatorio más restrictivo para S.131/27 fue el MOR , mientras que, en concordancia con Spavento (2015), para el P.I-214 fue el MOE .



Un mayor número de repeticiones permitirá realizar un análisis más exhaustivo sobre esta clasificación, destacando además la importancia de realizar una caracterización de esta madera a escala real a fin de llegar a conclusiones más seguras para su uso estructural.

La escasa influencia significativa de las singularidades en las clases resistentes podría corresponderse con la falta de especificidad normativa para estos clones-dimensiones analizados; resultados similares fueron hallados por Spavento *et al.* (2019); Spavento (2015), analizando la influencia de las dimensiones y calidades, a través de normativas europeas, en los valores elasto-resistentes de madera aserrada de *Populus x euramericana* I-214 de procedencia española y argentina.

4. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos, ambas maderas resultaron livianas en cuanto a los valores de densidad aparente normal y con valores elasto-resistentes estadísticamente diferentes (superiores en *Salix*), debiendo considerarse una clasificación por calidad en material de tamaño estructural para definir su uso más apropiado en servicio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al personal técnico del Laboratorio de Ensayos de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, por la colaboración en la realización de los ensayos mecánicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Borodowski, E.D. (2017). Situación actual del cultivo y uso de las Salicáceas en Argentina. Disertación. V Congreso Internacional de Salicáceas. Talca, Chile.

Castro, G. (2006). Usos actuales y posibilidades futuras de la madera de álamo. Jornadas de Salicáceas. Buenos Aires, Argentina, Septiembre.

Coronel, E. (1994). Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. 1º Parte. Fundamentos de las propiedades físicas de la madera. Santiago del Estero, Argentina.

Fernández-Golfín Seco J. I. Rafael Díez Barra, M. Hermoso Prieto E and Mier Pérez, R. (2003). Madera estructural: estrategias para su clasificación. Boletín de Información Técnica N°223. Madrid, España.

Filippetti, M.C. Guillaumet, A.A. Tortoriello, M. Alí Mossre, C. (2017). Potencial uso estructural de la madera *Populus deltoides* cultivado en el noroeste de la provincia de buenos aires. Congreso CLEM+CIMAD. Junín, Argentina, Mayo.

IRAM 9662-4. (2015). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Argentina.



Iñiguez González, G. (2007). Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Madrid, España.

Ministerios de Agricultura, Ganadería y pesca. Presidencia de la Nación (MAGyP). Argentina: plantaciones forestales y producción sostenible. (Ca. 2015) Documento Técnico. Buenos Aires, Argentina.

Piter, J.C. (2003). Clasificación por resistencia de la madera aserrada como material estructural. Desarrollo de un método para el *Eucalyptus grandis* de Argentina. Concepción del Uruguay, Argentina.

Queipo de Llano Moya, J. González Rodrigo, B. Llinare Cervera and Villagra Fernández, V. (2010). Guía de Construir con Madera. Madrid, España.

Ramírez V, M. Valenzuela H, L. and Díaz S, C. (2001). Propiedades mecánicas en flexión de la madera de *Pinus radiata*, creciendo en un sistema silvopastoral: I: elasticidad y resistencia. Maderas. Ciencia y tecnología. 3(1-2), 35-43. Disponible: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2001000100004> Concepción, Chile.

Sánchez Gómez, D. and Roa, S.E. (2015). Correlación entre la densidad y la flexión estática para *Eucalyptus globulus* Labill. procedente de la sabana Cundiboyacense. Bogotá, Colombia.

Spavento, E. (2015). Caracterización y mejora tecnológica de *Populus x euramericana* I-214, austral y boreal, con fines estructurales. Palencia, España.

Spavento, E. Casado Sanz, M. Acuña Rello, L. Basterra Otero, L.A. (2019). Influencia de las dimensiones y calidades en la resistencia a flexión estática en madera aserrada de *Populus* sp. Congreso LIGNOMAD 19, Santiago de Compostela, España, Julio.