

ARTÍCULO

Determinación de la edad de transición de madera juvenil a madura y de sus valores elasto-resistentes en *Pinus contorta*
Determination of juvenile-mature wood transition age and elastic-resistant values of *Pinus contorta*

María Mercedes Refort¹ <https://orcid.org/0000-0001-7942-3492>

Luis Acuña-Rello² <https://orcid.org/0000-0002-9657-8215>

Silvia Monteoliva³ <https://orcid.org/0000-0002-8679-7633>

Camila Mateo⁴ <https://orcid.org/0000-0002-0871-0440>

Perle Charlot⁵ <https://orcid.org/0000-0002-5078-0864>

Dino Palazzini⁶ <https://orcid.org/0009-0000-4484-2400>

Cristian Pagano⁷ <https://orcid.org/0009-0001-5920-1064>

Gabriel Keil⁸ <https://orcid.org/0000-0002-4388-0760>

Eleana Spavento⁹ <https://orcid.org/0000-0002-3810-8952>*

¹Universidad Nacional de Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. Laboratorio de Investigaciones en Madera. La Plata, Argentina.

²Universidad de Valladolid. E.T.S. de Ingenierías Agrarias. Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. Laboratorio de Maderas. Palencia, España.

³Universidad Nacional de Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Departamento de Ciencias Biológicas. Instituto de Fisiología Vegetal. La Plata, Argentina.

⁴Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Asentamiento Universitario San Martín de los Andes. San Martín de los Andes, Argentina.

⁵National Research Institute for Agriculture. Food and the Environment. Ecosystem and Society Laboratory. Saint-Martin-d'Hères, Francia.

⁶Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Departamento de Ambiente y Recursos Naturales. Laboratorio de Investigaciones en Madera. La Plata, Argentina.

⁷Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. La Plata, Argentina.

⁸Universidad Nacional de Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. Laboratorio de Investigaciones en Madera. La Plata, Argentina.

⁹Universidad Nacional de Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. Laboratorio de Investigaciones en Madera. La Plata, Argentina.

*Autor de correspondencia: eleana.spavento@agro.unlp.edu.ar

Resumen:

El porcentaje de madera juvenil en coníferas de crecimiento rápido es un factor determinante de las propiedades básicas, ya que su proporción aumenta a medida que disminuye la edad de

rotación. Dicha madera se caracteriza por presentar menor longitud y espesor de pared de traqueidas y mayor ángulo micro-fibrilar, lo cual se traduce en menor densidad y propiedades elasto-resistentes más bajas. Para delimitar la edad transición de madera (juvenil-madura) se realiza el análisis radial de algunas de las características mencionadas. La importancia de establecer dicha edad, radica en la estimación de los volúmenes de ambos tipos de madera, su calidad y potencialidad de uso. El objetivo del trabajo fue determinar la edad de transición y comparar sus valores elasto-resistentes en *Pinus contorta* (lodgepole). Se trabajó con 9 muestras de 35 años, radios norte y sur para estudios anatómicos, y madera juvenil y madura para ensayos físico mecánicos. Las edades de transición resultaron entre los 12 y 16,5 años, dirección norte y sur, respectivamente. Las variables anatómicas, físicas y mecánicas se diferenciaron significativamente, siendo mayores en la madera madura. A fin de generar una base de datos de esta especie para la región, se sugiere continuar con estudios similares en otros sitios.

Palabras clave: Coníferas, espesor de pared celular, longitud de traqueidas, módulo de elasticidad, módulo de rotura.

Abstract:

The percentage of juvenile wood in fast-growing conifers is a determinant of the basic properties, since its proportion increases as the rotation age decreases. This wood is characterized by having less length and thickness of tracheids and greater microfibrillar angle, which translates into lower density and lower elasto-resistant properties. To delimit the transition age of wood (juvenile-mature), we carried out a radial analysis of some of the mentioned characteristics. The importance of establishing transition age lies in the estimation of the volumes of both woods, their quality and potential use. The objective of the work was to determine the transition age and compare its elasto-resistant values in *Pinus contorta* (lodgepole). Based on nine samples of 35 years-old, we have been working with north and south radius for anatomical studies, while we used juvenile and mature wood for physical-mechanical tests. The transition ages were between 12 and 16,5 years, north and south direction, respectively. The anatomical, physical and mechanical variables differed significantly, being higher in the mature wood. Repeating our analysis framework in other study sites could generate an informative database of this species for the region.

Keywords: Conifers, cell wall thickness, tracheid length, modulus of elasticity, modulus of rupture.

Recibido: 04.05.2023

Aceptado: 02.02.2024

Introducción

El lodgepole (*Pinus contorta*) subespecie *murrayana* es originario de América del Norte, y de acuerdo al Inventario Nacional de Plantaciones Forestales en Secano de la Región Patagonia (MA 2017), en la Patagonia Andina existe una superficie de 81189 ha. de rodales de esta especie asociada a rodales de bull pine (*Pinus ponderosa*). En la provincia de Neuquén (Argentina) se registran 63725 ha forestadas, de las cuales 63 % corresponden a Pino ponderosa, 11 % a plantaciones de *Pinus* sp. y especies mixtas, y 2,3 % a *Pinus contorta*.

Del total forestado con *Pinus*, el 40 % corresponden a plantaciones mayores de 26 años, el 50 % entre 11 - 26 años y el 8 % menores a 10 años. Una situación similar se presenta en Chile, Región de Aysén, donde el *Pinus contorta* es la segunda especie exótica más plantada en dicha región con una superficie de 5095 ha. En lo que respecta a la distribución de edades en dicho país, el 50 % de las plantaciones son mayores a 23 años, el 28 % se encuentra entre 10 y 23 años y del 22 % se desconoce la edad de plantación (INFOR 2018). De acuerdo con estas distribuciones de edades y turnos de rotación establecidos para estas coníferas de rápido crecimiento, la determinación del volumen de madera juvenil es muy importante ya que su proporción es mayor a medida que disminuye la edad de rotación, siendo en muchos casos de un 100 % si se emplean árboles pequeños (Larson *et al.* 2001, Cobas *et al.* 2013, Diaz-Vaz *et al.* 2007, Letourneau *et al.* 2014).

En este sentido, la madera juvenil fue definida para las coníferas como la zona más cercana al centro del árbol, que se extiende desde la base hasta el ápice y su proporción se reduce a medida que se incrementa la edad del árbol. En términos generales, la madera juvenil presenta, respecto a la madera madura, menor longitud de traqueidas y espesor de las paredes celulares, mayor espesor de los anillos de crecimiento y ángulo microfibrilar, entre otras diferencias anatómicas (Larson *et al.* 2001, Wang y Stewart 2012, Letourneau *et al.* 2014,

Hayatgheibi 2017). En este sentido, para delimitar la transición de madera juvenil a madura, diversos autores proponen analizar la tendencia promedio de alguna de las características mencionadas desde médula a corteza (Nahuelpán-López 2007, Diaz-Vaz *et al.* 2007, Palma *et al.* 2010).

En términos tecnológicos, las diferencias anatómicas antes mencionadas se traducen en presencia de deformaciones durante el proceso de secado e inestabilidad en servicio, menores valores de densidad y resistencia mecánica, ocasionando mayor variabilidad en dicho material con las consecuentes limitaciones en su uso final (Diaz-Vaz *et al.* 2007, Gorman y Kretschmann 2012, Wang y Stewart 2012, Letourneau *et al.* 2014, Czajka *et al.* 2015, Sackser *et al.* 2018, Taylor *et al.* 1982).

En lo que se refiere a los valores de resistencia de la madera, estos se pueden determinar mediante ensayos destructivos (con cambios irreversibles en el material; sin posibilidad de uso posterior) y/o no destructivos, NDT (non-destructive testing), (sin cambios irreversibles; el material puede utilizarse posteriormente). Estos últimos pueden llevarse a cabo a través de diferentes métodos los cuales, en general, presentan alta versatilidad y eficiencia para estimar las principales propiedades físicas y mecánicas (Acuña *et al.* 2023). Los NDT podrían establecerse como una herramienta de apoyo para la determinación de la transición entre madera juvenil y madura.

Por lo tanto, a fin de estimar la resistencia mecánica de la madera juvenil y madura y, de este modo, evaluar su variabilidad y posibles aptitudes de uso, es importante establecer la edad de transición entre ambas maderas para cada especie.

Así, el objetivo del trabajo fue determinar la edad de transición de madera juvenil a madura de *Pinus contorta* (Neuquén, Argentina) y sus valores elasto-resistentes.

Materiales y métodos

Material leñoso

El material de ensayo se obtuvo de plantaciones de *Pinus contorta* subespecie *murrayana* de 35 años de edad, ubicadas en la estancia Santa Lucía (Latitud: S40°23'12,48", Longitud: O 71°15'58,11", altitud: 924 metros), Meliquina, provincia de Neuquén, Argentina. Dentro de las prácticas silvícolas se registraron una primera poda hasta 2,2 metros de altura y un raleo entre los 20 y 22 años. Se seleccionaron 9 árboles al azar empleando criterios de representatividad de sitio y evitando efecto borde; una vez apeados se cortaron muestras transversales al eje, a 0,3 m del suelo en rodajas de 10 cm de espesor, identificando los radios norte y sur. Adicionalmente, en cada sección basal se realizó visualmente una estimación porcentual de la proporción de madera juvenil y madura. Luego se obtuvieron listones centrales incluyendo médula con dimensiones de 2 cm x 4 cm (Figura 1).

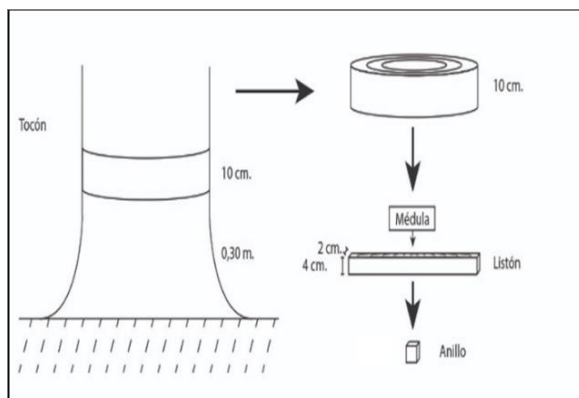


Figura 1: Representación del esquema de obtención de probetas de ensayo.

Estudios anatómicos

De cada listón de madera se separaron los anillos de crecimiento para determinar las variables anatómicas sobre los radios (norte (RN) y sur (RS)). A partir de este material se realizaron disociados según la técnica de Franklin (Rivera y Galiussi 2015), para la determinación de longitud de traqueidas (LT) y preparados en corte transversal teñidos con safranina 1% en agua para la determinación del espesor de pared de traqueidas (EPT).

Se tomaron imágenes con microscopios Biological Microscope Ceti y óptico Olympus CX31, con cámara digital adosada. Se realizó la medición en forma manual sobre dichas imágenes con el software Image-ProPlus, Media Cybernetics, USA, por cada anillo y radio N y S, 25 traqueidas (longitud) y 30 traqueidas (espesor), 15 de madera juvenil y 15 de madera madura. Con las mediciones obtenidas de cada parámetro, se empleó el método de regresión segmentada para determinar la edad de transición en la longitud (LT) y espesor de pared celular (EPT) de las traqueidas, el cual ha sido aplicado con éxito tanto en coníferas como en latifoliadas (Meza-Juárez *et al.* 2005, Cobas *et al.* 2013).

Dicho método establece que en el patrón radial de cada característica (asociado con la edad del anillo de crecimiento) existe un cambio notorio en la pendiente de la línea de regresión, siendo éste el momento (edad) en que ocurre la transición entre ambos tipos de maderas. Previo a la regresión, se aplicó una función smoothing spline a fin de eliminar las influencias

indeseables de datos anómalos (Durbán 2009). Se utilizó el test de Davies para comprobar y ajustar el punto de rotura y el intervalo de confianza (IC).

Ensayos no destructivos

Se aserraron las primeras 9 trozas basales, considerando el límite entre madera juvenil y madura (determinado previamente), unificando los radios norte y sur para cumplir con el número mínimo de muestras atendiendo a las especificaciones de la norma EN 408+A1 (2012). Para cada tipo de madera se obtuvieron 50 piezas de madera maciza de 40 mm x 60 mm x 1,200 mm para ser caracterizadas mediante metodología de ensayo no destructiva (NDT), en este caso, empleando el equipo Microsecond Timer (Fakopp) (Figura 2).

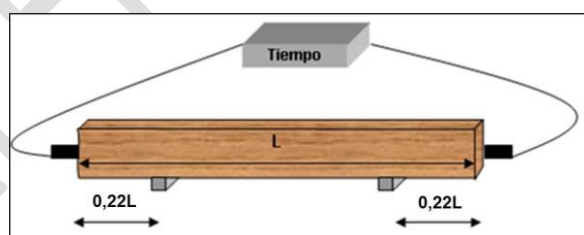


Figura 2: Esquema de ensayo de ultrasonidos en vigas bi-apoyadas.

La onda fue generada mediante un golpe de martillo en un palpador emisor y captada en el otro extremo de la pieza, mediante un palpador receptor. Se determinó el tiempo (μs) que tarda la onda ultrasónica en recorrer dicha distancia. A partir de este tiempo de paso se

determinó la velocidad de la onda y posteriormente, el módulo de elasticidad dinámico (MOE_d), a partir de la Ecuación 1.

$$MOE_d = (V)^2 \delta \quad (1)$$

Donde:

MOE_d : Módulo de elasticidad dinámico, en MPa.

V: velocidad de paso de la onda, en m/s¹.

δ : Densidad de la pieza de madera, en kg/m³.

El ensayo fue realizado con las piezas bi-apoyadas, para lo cual fueron colocadas sobre dos soportes, separados de cada extremo a 0,22 L (siendo L=longitud de la viga) (Figura 2), previa determinación del peso y dimensiones de cada pieza (cubicación) para la obtención de la densidad, atendiendo a la metodología citada por Spavento (2015).

Ensayos destructivos

En las piezas previamente ensayadas con metodología NDT, se realizó el ensayo de flexión estática y determinación de la densidad, acorde a la norma EN 408+A1 (2012) en máquina Universal de Ensayo SHIMADZU UH 300kNI, (Figura 3).

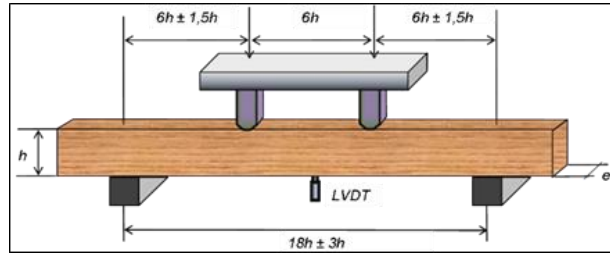


Figura 3: Esquema del dispositivo y condiciones de ensayo.

Se determinó el módulo de elasticidad estático (MOE), Ecuación 2, y el módulo de rotura (MOR), Ecuación 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 medios para el MOE, MOR y la densidad, todos al 12 % de contenido de humedad.

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

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

Donde:

MOE: módulo de elasticidad estático en MPa y MOR: módulo de rotura, 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; $F_2 - F_1$: incremento de carga sobre la línea de regresión, con un coeficiente de correlación de 0,99 o superior, en kN; $w_2 - w_1$: incremento de la deformación correspondiente a $F_2 - F_1$, en mm; F: carga, en kN.

Análisis estadístico

Análisis de las variables anatómicas y valores elasto-resistentes

Se comprobaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad. La normalidad de los datos se comprobó, para las variables anatómicas, utilizando la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, y para los parámetros elasto-resistentes, mediante el test de Shapiro-Wilk. La homocedasticidad fue contrastada por el test de Levene's.

Para las variables anatómicas se utilizaron los test comparativos de Wilcoxon, Yuen bootstrap y t-test, mientras que para los parámetros elasto-resistentes se utilizaron el test de Wilcoxon y el t-test. Se realizaron gráficos de caja como método estandarizado para representar una serie de datos a través de cuartiles, mostrándose la mediana (línea horizontal), los cuartiles de los datos (caja), y la variabilidad (bigotes), fuera de los cuartiles superior e inferior.

Todos los análisis estadísticos, para la determinación de la edad de transición de madera juvenil a madura, y para el análisis de las variables anatómicas y valores elasto-resistentes, se realizaron con el software estadístico R versión 4.1.3 (R Core Team, 2022).

Resultados y discusión

Determinación de la edad de transición de madera juvenil a madura

En la Figura 4 se muestra la variación radial de la LT y el EPT (RN y RS) y la edad de transición. Se deduce que la edad de transición determinada a través de ambas variables ocurre aproximadamente entre los 12-14,5 años (RN), y a los 16,5 años (RS). Zingoni *et al.* (2011) determinaron mediante LT una edad de transición para *Pinus ponderosa* (Neuquén) en los RN y RS, a los 18 y 20 años de edad, respectivamente, y Letourneau *et al.* (2014), determinaron una edad de transición de 20 años para *Pinus ponderosa* (Rio Negro).

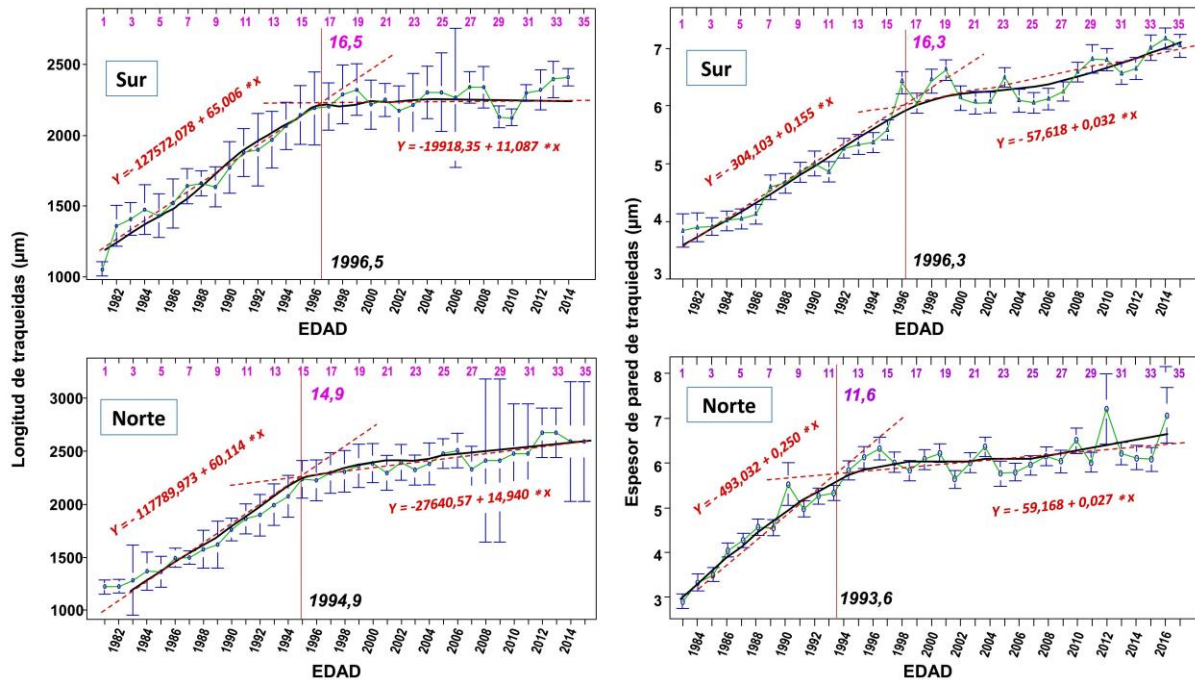


Figura 4: Patrón radial y año calendario para longitud y espesor de pared de traqueidas en madera de *Pinus contorta*.

Análisis descriptivos y comparativos de las variables anatómicas

En la Tabla 1 y en la Figura 5 se muestran los resultados de los análisis descriptivos y comparativos, respectivamente, pertenecientes a la variable de longitud de traqueidas.

Tabla 1: Análisis descriptivo de longitud de traqueidas de *Pinus contorta* considerando diferentes factores.

Variables	Factor	Media (n) (IC robusto)	Test de normalidad	Levene's Test
Longitud de traqueidas (μm)	Radio Norte	2084,2 (242) (2033,8-2134,6)	D = 0,086 p-value = 1,2e-4	F value=0,242 p-value =0,623
	Radio Sur	1967,7 (177) (2154,4-2338,4)	D = 0,055 p-value = 0,180	
	Madera Madura Norte	2302,0 (137) (2256,4-2347,6)	D = 0,085 p-value = 1,1e-2	F value=4,594 p-value =0,33
	Madera Madura Sur	2281,9 (50) (2226,2-2337,6)	D = 0,073 p-value = 0,58	
	Madera Juvenil Norte	1752,4 (91) (1683,4-1821,3)	D = 0,081 p-value = 0,097	F value=0,390 p-value =0,533
	Madera Juvenil Sur	1753,9 (99) (1689,8-1818,0)	D = 0,083 p-value = 0,063	
	Madera Madura	2296,2 (197) (2259,8-2332,6)	D = 0,070 p-value = 0,017	F value=11,43 p-value =0,001
	Madera Juvenil	1753,2 (200) (1706,2-1800,1)	D = 0,074 p-value = 0,007	

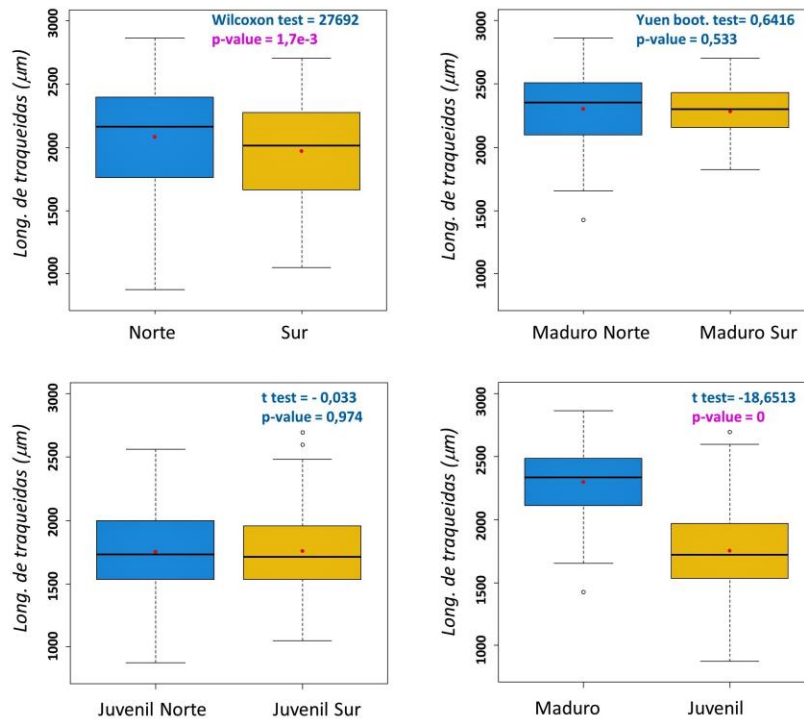


Figura 5: Análisis comparativos longitud de traqueidas vs. factores.

Los valores medios de LT (2500 μm) resultaron similares a los hallados por Irbe *et al.* (2013) y Taylor *et al.* (1982) en Pino contorta (edades >27 años, Europa y Canadá, respectivamente). Letourneau *et al.* (2014) determinaron valores medios de 1950 μm a los 15 años y 2440 μm a los 35 años, en *Pinus ponderosa* (Río Negro). En la Figura 5 se observa que no hay diferencias significativas ($p\text{-value} > 0,05$) entre la LT de la madera juvenil y madura de iguales radios (punto cardinal), aunque se observan diferencias significativas entre radios de ambas maderas (juvenil/madura). Este comportamiento es coincidente a lo expresado por Zingoni *et al.* (2011), en madera de *Pinus ponderosa* (Neuquén).

En la Tabla 2 y Figura 6, se muestran los resultados de los análisis descriptivos y comparativos, respectivamente, de los EPT.

Tabla 2: Análisis descriptivos de los EPT, considerando diferentes factores.

Variabes	Factor	Media (n) (IC robusto)	Test de normalidad	Levene's Test
Espesor pared celular (μm)	Radio Norte	5,618 (4881) (5,581-5,655)	D = 0,037 p-value=2,2e-16	F value=34,836 p-value =3,7e-9
	Radio Sur	5,736 (4130) (5,692-5779)	D = 0,043 p-value=2,2e-16	
	Madera Madura Norte	5,988 (2687) (5,941-6,034)	D = 0,034 p-value = 9,5e-8	F value=0,205 p-value =0,651
	Madera Madura Sur	6,436 (2179) (6,382-6,489)	D = 0,027 p-value = 8,5e-4	
	Madera Juvenil Norte	5,111 (2079) (5,058-5,163)	D = 0,046 p-value=4,1e-11	F value=11,488 p-value=7,07e-4
	Madera Juvenil Sur	4,959 (1958) (4,908-5,010)	D = 0,058 p-value=2,2e-16	
	Madera Madura	6,236 (4881) (6,192-6,279)	D = 0,063 p-value=2,2e-16	F value=11,43 p-value =0,001
	Madera Juvenil	5,050 (4060) (5,010-5,091)	D = 0,060 p-value=2,2e-16	

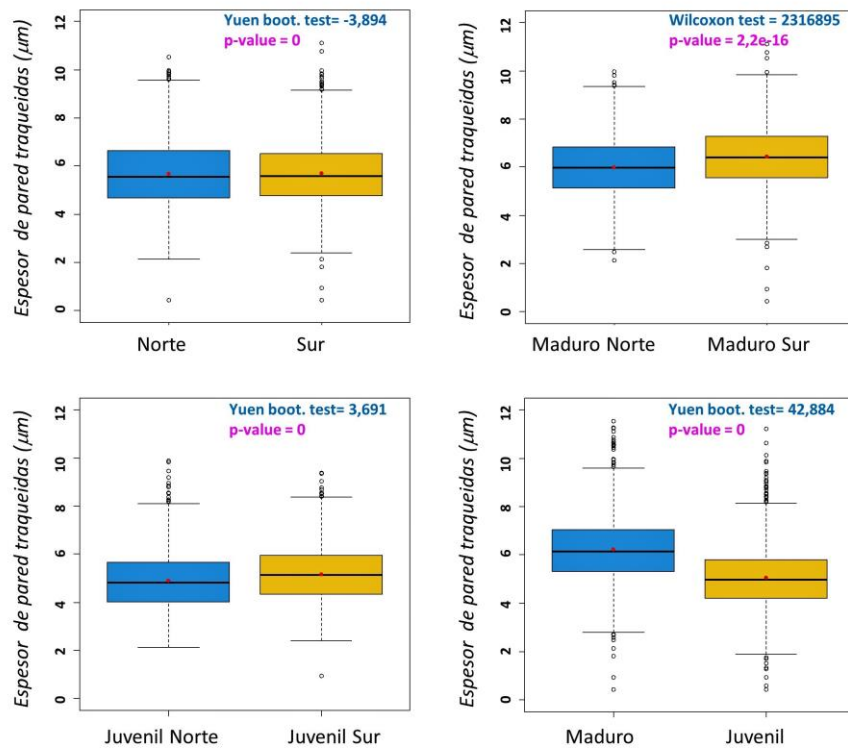


Figura 6: Análisis comparativo del espesor de pared de traqueidas versus factores.

Los valores medios de EPT (Tabla 2) fueron superiores a los encontrados por Irbe *et al.* (2013) y Wang *et al.* (2000) en Pino contorta (Europa) de 27 años (3,8 μm) y valores medios (3,6 μm) en árboles de Pino contorta (Canadá) de 12 años de edad, respectivamente. En la Figura 6 se observa que los factores orientación y tipo de madera influyen significativamente en el espesor de la pared de traqueidas (p-value < 0,05).

Si bien no se ha encontrado bibliografía que permita comparar el comportamiento de esta especie y variables estudiadas, la pequeña variación en los RN y RS puede asociarse a lo encontrado por Winck *et al.* (2015) para *Pinus taeda*, quien destaca que el efecto de los raleos produce un incremento de estas variables en sentido radial (de médula a corteza). Lo precedente, concuerda con Ruano-Sastre (2019) quien resalta que la cantidad de madera

juvenil se reduce en respuesta a los tratamientos silvícolas y, asimismo, según la experiencia de Ruano y Hermoso (2021) en *Pinus sylvestris* (España), el impacto es diferente según el momento y la intensidad en que se realizan los diferentes tratamientos.

Según Irbe *et al.* (2013), al aumentar la intensidad del raleo se produce una reducción en el EPT y LT. Asimismo, Vignote-Peña *et al.* (2013) concluyen que cuanto antes se realice el proceso de poda, antes se empezará a formar madera madura. En este sentido, Zingoni *et al.* (2011), afirman que la LT es considerado un carácter altamente heredable y junto con los factores como características de sitio y técnicas silviculturales, pueden tener efectos diferentes entre especies y aún entre individuos de la misma especie.

Con respecto a las diferencias significativas encontradas entre la madera juvenil y madura, hay una amplia bibliografía que respalda este comportamiento en diversas coníferas (Larson *et al.* 2001, Sadegh y Kiaei 2011, Wang y Stewart 2012, Letourneau *et al.* 2014, Mvolo *et al.* 2015, Hayatgheibi 2017, Márquez-Carrero *et al.* 2022, Winck *et al.* 2022).

Análisis descriptivos y comparativos de los valores elasto-resistentes

En Tabla 3 y Figura 7 se muestran los resultados de los análisis descriptivos y comparativos, respectivamente, de los valores elasto-resistentes - madera juvenil y madura.

Tabla 3: Análisis descriptivos de los valores elasto-resistentes vs factores.

Parámetros elasto-resistente	Factor	Media (CV)	Test de normalidad	Test de Levene's
Dn (kg/m ³)	Madera Madura	403,81 (8,92)	W=0,969694 p-value = 0,692123	F value=19,42 p-value: 0,0001
	Madera Juvenil	357,73 (14,01)	W=0,972925 p-value = 0,763823	
MOE _d (MPa)	Madera Madura	8984,687 (18,76)	W= 0,979362 p-value = 0,728673	F value=8,38 p-value: 0,0050
	Madera Juvenil	5898,364 (21,51)	W=0,943829 p-value 0,14529	
MOR (MPa)	Madera Madura	25,45 (24,93)	W= 0,964665 p-value= 0,437795	F value=2,94 p-value: 0,09
	Madera Juvenil	17,41 (24,15)	W=0,977383 p-value = 0,798978	
MOE (MPa)	Madera Madura	5705,60 (23,70)	W= 0,976927 p-value =0,770272	F value=2,26 p-value: 0,138
	Madera Juvenil	3230,67 (27,34)	W= 0,918209 p-value = 0,076634	

Dn: densidad aparente normal; MOE_d: módulo de elasticidad dinámico; MOE: Módulo de elasticidad; MOR: módulo de rotura; Dn, MOE_d y MOE expresados al 12% de Contenido de humedad.

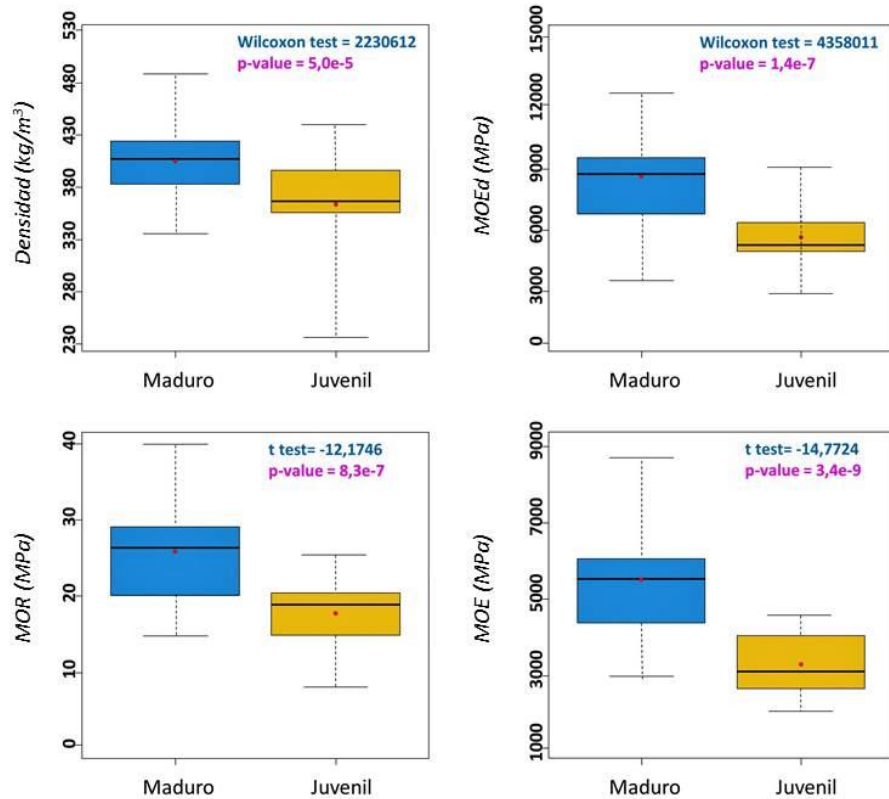


Figura 7: Análisis comparativos de los valores elasto-resistentes entre madera juvenil y madura.

Los valores elasto-resistentes hallados en la madera juvenil (Tabla 3) resultaron próximos a los citados por Manavella *et al.* (2019) y Guillaumet *et al.* (2019) en *Pinus ponderosa* Douglas, con edades superiores a 25 años (Río Negro). A diferencia de esto último, Aranda *et al.* (2018) en *Pinus ponderosa* (Río Negro), Fank *et al.* (2017) y Ramos *et al.* (2016) con *Pinus eliottii* Engelm. y *Pinus taeda* (Mesopotamia; árboles superiores a 25 años) encontraron valores elasto-resistentes similares a los obtenidos en este estudio en madera madura.

Lomagno (2003) menciona que para el diseño de piezas estructurales de Pino ponderosa, el MOE recomendado debería situarse como mínimo en 4120 MPa, en este caso, los valores de

MOE de la madera madura de *Pinus contorta* fue de 5705,60 MPa, superior al valor recomendado por dicho autor.

Asimismo, los valores encontrados en madera madura de *Pinus contorta* se asemejan a los encontrados por Caballé *et al.* (2020) en madera de *Pinus ponderosa* (20-30 años de edad), quienes determinaron valores promedios de 22,95 MPa (MOR) y 5458,5 MPa (MOE). De acuerdo con lo indicado en la Figura 7, los valores elasto-resistentes presentan diferencias significativas (p -valor $< 0,05$) entre maderas, siendo superiores en la madera madura. Este comportamiento diferencial podría corresponderse con lo citado por Bustamante-Orellana (2019), donde menciona que una de las características anatómicas de mayor influencia en las propiedades de resistencia mecánica de la madera es el espesor de las paredes de las traqueidas.

Asimismo, Larson *et al.* (2001) indican que las traqueidas de mayor longitud se asocian con una mayor resistencia a la tracción y rigidez en flexión estática. La LT y la proporción de madera juvenil-madura, están asociados a las propiedades físicas y mecánicas emergentes de la madera y esto a su vez, está relacionado con el potencial uso de la madera en general (Ruggirello 2017). Cabe destacar que en base a lo último mencionado, en este estudio se evidenció en las secciones basales una proporción mayor de madera madura, siendo de aproximadamente, 62 % frente a un 38 % de madera juvenil.

Conclusiones

Los resultados del estudio arrojaron que la edad de transición determinada a través de longitud y espesor de pared de traqueidas ocurre aproximadamente entre los 12-14,5 años (RN), y a los 16,5 años (RS).

Los análisis comparativos entre madera juvenil y madura demostraron diferencias significativas en los parámetros anatómicos (LT y EPT), físicos (densidad) y elasto-resistentes (MOE_d , MOE y MOR en flexión estática). Esto destaca la importancia de la determinación de la edad de transición, para un correcto procesamiento y diferenciación en cuanto a resistencia y calidades de la misma, lo cual se reflejaría en un mejor uso y valorización de la madera en el mercado local y regional.

A fin de obtener mayor fiabilidad y generar una base de datos de esta especie para la región, se sugiere continuar con estudios similares en otros sitios, otras alturas de muestreo y otras propiedades (sentido radial y axial), considerando además el estudio de rendimiento en el aserrado, para obtener una evaluación integral de la calidad de la madera estructural.

Declaración de autorías

M. M. R.: Conceptualización, análisis formal, metodología, investigación, redacción-borrador original. L. A-R.: Conceptualización, análisis formal, metodología, redacción-revisión y edición. S. M.: Recursos, visualización, redacción-revisión y edición. C. M.: Investigación, visualización. P. C.: Investigación, visualización. D. P.: Investigación, visualización. C. P.: Investigación, visualización. G. K.: Recursos, obtención de fondos, visualización. E. S.: Conceptualización, investigación, recursos, redacción-revisión y edición.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Sr. Thomas Retschitzegger, Estancia Santa Lucía (Meliquina, Neuquén) por el aporte del material de ensayo.

Referencias:

- Acuña, L.; Martínez, R.; Spavento, E.; Casado, M.; Álvarez-Martínez, J.; O'Ceallaigh, C.; Harte, A.M.; Balmori, J.A. 2023.** Modulus of elasticity prediction through transversal vibration in cantilever beams and ultrasound technique of different wood species. *Construction and Building Materials* 371(130750): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130750>
- Aranda, J.; Moreno, I.; De La Maza, J.; O'Donohe, T. 2018.** Determinación de la Resistencia a la Flexión y Módulo de Elasticidad de *Pino Ponderosa*. *Revista Tecnología y Ciencia* 32:181-188. <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/rtyc/article/view/67>
- Bustamante-Orellana, E.L. 2019.** Validación de un método no destructivo para medir módulo de elasticidad en trozas de *Calycophyllum spruceanum* de una plantación en Uacayali -Perú. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3875>
- Caballé, G.; Guillaumet, A.; Diez, J.P.; Martínez-Meier, A. 2020.** Normalización de la madera de pino ponderosa. Un paso esencial para su uso en la construcción de viviendas. *Revista Presencia* 74: 8-74. https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/INTADig_c5faa5267a8733f2ea00daee673bf60a
- Cobas, A.C.; Area, M.C.; Monteoliva, S. 2013.** Transición de madera juvenil a madura en un clon de *Populus deltoides* implantado en Buenos Aires Argentina. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 15(2): 223-234. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2013005000018>
- Czajka, M.; Fabisiak, E.; Krauss, A. 2015.** Duration of juvenile period in diameter growth of trees selected coniferous Species. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW Forestry and Wood Technology* 92: 68-73. <https://bibliotekanauki.pl/articles/8192.pdf>
- Diaz-Vaz, J.E.; Fernandez, A.; Valenzuela, L.; Torres, M. 2007.** Madera de compresión en *Pinus radiata*. D. Don: I, Características Anatómicas. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 9(1): 29-43. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2007000100003>
- Durbán, M. 2009.** An introduction to smoothing with penalties: P-splines. *Boletín de Estadística e Investigación Operativa* 25 (3): 195-205. http://emis.icm.edu.pl/journals/BEIO/files/BEIOVol25Num3_MDurban.pdf
- EN. 2012.** Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. EN 408+A1 2010+2012. Madrid. España.
- Fank, P.Y.; Stefani, P.M.; Piter, J.C. 2017.** Clasificación mecánica de tablas de pinos resinosos cultivados en el nordeste de Argentina. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 19(3): 247-264. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2017005000021>
- Guillaumet, A.A.; Filippetti, M.C.; Manavella, R.D.; Meyer, L.C.; Caballé, G.; Martínez Meier, A. 2019.** Resistencia en flexión del Pino ponderosa de la Patagonia norte, Argentina. En Actas del 4^{to} Congreso Latinoamericano de estructuras de maderas. Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay e Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de

Ingeniería, Universidad de la República: Montevideo. Uruguay.
<http://hdl.handle.net/20.500.12272/7016>

Gorman, T.M.; Kretschmann, D.E. 2012. Characterization of juvenile wood in lodgepole pine in the Intermountain West. En Actas de la 55ª Convención Internacional de la Sociedad de Ciencia y Tecnología de la Madera. Beijing, China.
<https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/42087>

Hayatgheibi, H. 2017. Quantitative genetics of lodgepole pine (*Pinus contorta*) wood quality traits in Sweden. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Umeå. Sweden. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55555220>

INFOR. 2018. Los recursos forestales en Chile. En Informe final: Inventario continuo de bosques nativos y actualización de plantaciones forestales.
<https://doi.org/10.52904/20.500.12220/30348>

Irbe, I.; Sable, I.; Treimanis, A.; Jansons, A.; Grinfelds, U. 2013. Variation in the tracheid dimensions of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) and Lodgepole Pine (*Pinus contorta* Dougl. Var. *latifolia* Engelm) Trees Grown in Latvia. *Baltic Forestry* 19(1): 120-127.
https://www.researchgate.net/publication/276286465_Variation_in_the_Tracheid_Dimensions_of_Scots_Pine_Pinus_sylvestris_L_and_Lodgepole_Pine_Pinus_contorta_Dougl_var_latifolia_Engelm_Trees_Grown_in_Latvia

Larson, P.R.; Kretschmann, D.E.; Clark, A.; Isebrands, J.G. 2001. Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis. En General Technical Report. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
<https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-129>

Letourneau, F.J.; Medina, A.A.; Andia, I.R.; Andenmatten, E.; De Agostini, N.; Mantilario, N. 2014. Caracterización xilo-tecnológica de la madera de una plantación adulta de *Pinus ponderosa* de Patagonia argentina. *Revista de Investigacion Agropecuaria* 40(2): 196-201. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1669-23142014000200012&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Lomagno, J. 2003. Esfuerzos característicos y de diseño en piezas estructurales de madera. Resistencias de diseño de maderas de la Patagonia. *Revista Patagonia Forestal (CIEFAP)* 3: 9-12.

Manavella, R.D.; Guillaumet, A.A.; Filippetti, M.C.; Meyer, L.C. 2019. Determinación del módulo de elasticidad por ultrasonido y vibraciones en vigas de pino ponderosa. En Actas del 4to Congreso Latinoamericano de estructuras de maderas. Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay e Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo. Uruguay.
https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/7011/UTN_FRVT_ACI017.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Márquez-Carrero, G.; Valero, S.W.; León-Hernández, W.J.; Gutiérrez-Gotera, I.J.; Maldonado-Rangel, J.C. 2022. Variabilidad transversal de características dimensionales de traqueidas en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* de plantaciones de 25 años de edad. *Tecnología en Marcha* 35(3): 82-93. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5868>

Meza-Juárez, D.J.; Vargas-Hernández, J.; López-Upton, J.; Aquera-Huerta, H.; Borja de la Rosa, A. 2005. Determinación de la edad de transición de madera juvenil a madura en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Ra Ximhai* 1(2): 305-324.
<https://doi.org/10.35197/rx.01.02.2005.05.DM>

Ministerio de Agroindustrias Presidencia de La Nación Argentina. MA. 2017. Inventario Nacional de Plantaciones Forestales en Secano.

<https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/desarrollo-foresto-industrial/inventarios/>

Mvolo, C.S.; Koubaa, A.; Defo, M.; Beaulieu, J.; Yemele, M.C.; Cloutier, A. 2015.

Prediction of tracheid length and diameter in white spruce (*Picea glauca*). *IAWA Journal* 36(2): 186-207. <https://doi.org/10.1163/22941932-00000095>

Nahuelpán-López, C.E. 2007. Determinación del límite entre la madera juvenil y madura en *Pinus taeda* L. Tesis de grado. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Valdivia. Chile. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2007/fifn154d/doc/fifn154d.pdf>

Palma, H.A.L.; Leonello, E.C.; Ballarin, A.W. 2010. Demarcação da madeira juvenil e adulta de *Corymbia citriodora*. *CERNE* 16(5): 141-148.

<https://www.redalyc.org/pdf/744/74459381018.pdf>

Ramos, R.; Fank, P.; Gómez, R.; Torrán, E.; Piter, J.C. 2016. Propiedades mecánicas y densidad de la madera de *Pinus elliottii* cultivado en la Mesopotamia. Análisis comparativo entre plantaciones cultivadas en entre ríos y misiones. En *Actas de XXX Jornadas Forestales de Entre Ríos*. Concordia. Entre Ríos.

<https://www.jornadasforestales.com.ar/jornadas/2016/PROPIEDADES-MECANICAS-Y-DENSIDAD-DE-MADERA-DE-Pinus-elliotti.pdf>

R Core Team. 2022. A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Version 4.1.3.

Rivera, S.; Galiussi, E. 2015. Identificación de Maderas Comerciales: Técnicas, Certificación de Identidad y Pericias. Ed. Edulp. La Plata. Argentina.

<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/50103>

Ruano-Sastre, A. 2019. Análisis de metodologías para la evaluación de la madera juvenil en la calidad de la madera. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba. Córdoba. España.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=249989>

Ruano, A.; Hermoso, E. 2021. Juvenile-mature wood evaluation along the bole considering the influence of silvicultural treatments. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 23(25): 1-10.

<http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100421>

Ruggirello, M. 2017. Nondestructive Testing of Ponderosa Pine Wood Quality. Influence of Stand and Tree-Level Variables on Acoustic Velocity and Wood Density. Thesis of master. School of Forestry. Northern Arizona University. Arizona. USA.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19678.36169>

Sackser, M.R.; Valdés, P.A.; Grance, L.A.; Bohren, A.V.; Aguilera, M.A.; Andrade,

N.Y.; Grance, J.R.F. 2018. Densidad de la madera de *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm de 21 años de edad, a distintas alturas desde la medula a la corteza; estimación del límite madera juvenil-madura. *Yvyrareta: Revista Forestal País de Árboles* 26: 29-37.

<https://hdl.handle.net/20.500.12219/2588>

Sadegh, A.N.; Kiaei, M. 2011. Formation of Juvenile/Mature Wood in *Pinus eldarica* medw and Related Wood Properties. *World Applied Sciences Journal* 12(4): 460-464.

[http://idosi.org/wasj/wasj12\(4\)/10.pdf](http://idosi.org/wasj/wasj12(4)/10.pdf)

Spavento, E. 2015. Caracterización y mejora tecnológica de la madera de *Populus x euramericana* I-214 (Dode) Guinier, austral y boreal, con fines estructurales. Tesis doctoral. Universidad de Valladolid, Palencia, España. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/16541>

Taylor, F. W.; Wang, E.I.C.; Micko, M.M. 1982. Differences in the wood of Lodgepole pine in Alberta. *Wood and Fiber Science* 14(4): 296-309.

<https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/777>

Vignote-Peña, S.; Martínez-Rojas, I.; Villasante-Plágaro, A. 2013. *Silvicultura y calidad de madera. Monografía (Informe técnico)*. E.T.S.I. Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. España. <https://oa.upm.es/21580/>

Wang, T.; Aitken, S.N.; Rozenberg, P.; Millie, F. 2000. Selection for improved growth and wood density in Lodgepole pine: effects on radial patterns of wood variation. *Wood Fiber and Science* 32(9): 391-403. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/387>

Wang, M.; Stewart, J.D. 2012. Determining the transition from juvenile to mature Wood microfibril angle in lodgepole pine: a comparison of six different two-segment models. *Annals of Forest Science* 69: 927-937. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0226-z>

Winck, R.A.; Fassola, H.E.; Área, M.C. 2015. Efecto del raleo sobre las propiedades anatómicas de la madera de *Pinus taeda*. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 17(2): 391-406. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000037>

Winck, R.A.; Area, M.C.; Belaber, E.C.; Aquino, D.R.; Fassola, H.E.; Gauchat, M.E. 2022. Caracterización morfológica de las traqueidas de pino híbrido de rápido crecimiento. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 24(43): 1-12. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100443>

Zingoni, M.I.; Andía, I.R.; Laffitte, L. 2011. Variación radial y vertical en la longitud de traqueidas en un árbol de Pino ponderosa de 50 años (Neuquén, Argentina). *Ciencia e Investigación Forestal* 17(1): 77-90. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2011.360>