

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Caracterización anatómica de fibras de clones puros e híbridos de *Eucalyptus* sp.

Anatomical characterization of fibers from pure and hybrid clones of Eucalyptus sp.

DOI: <https://doi.org/10.36995/j.yvyrareta.2026.001>

Recibido 4 de junio 2025; aceptado 10 de noviembre 2025

Christian Bulman Hartkopf^{1,2} ; **Karen B. Paiva Gonzalez**^{1,3}; **Matías S. Martínez**²; **Ciro A. Mastrandrea**²; **Rosa A. Winck**^{2,4}; **Pablo M. Stefani**^{1,5}

¹Consejo Nacional de Investigaciones en Ciencia y Técnica. Argentina. bulman.christian@inta.gob.ar

²Instituto Nacional de Tecnología Agrícola. Estación Experimental Agropecuaria. Área Tecnología de la Madera. Argentina.

³Centro de Investigación y Desarrollo en Fermentaciones Industriales. La Plata, Buenos Aires, Argentina.

⁴Universidad Nacional de Misiones. Facultad de Ciencias Forestales. Misiones. Argentina.

⁵Universidad Nacional de Mar del Plata. Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales. Div. Materiales Sostenibles. Mar del Plata. Argentina.

Resumen

Se caracterizaron anatómicamente las fibras de cuatro clones de *Eucalyptus* spp., dos puros (*E. grandis*) y dos híbridos (*E. grandis* × *E. camaldulensis*), cultivados en dos sitios contrastantes del noreste argentino, con el objetivo de identificar materiales genéticos de mayor potencial para distintos usos industriales. Se analizaron las variables longitud de fibra, ancho total y de lumen, espesor y proporción de pared celular, y ángulo microfibrilar, en tres posiciones radiales del fuste. Los resultados mostraron que los clones híbridos presentaron mayor proporción de pared celular y menor lumen, en comparación con los clones puros. El clon GC INTA 27 mostró las fibras más esbeltas y el EG INTA 157 los valores menos favorables desde el punto de vista estructural por su alto ángulo microfibrilar. Por otro lado, la longitud de fibra fue la variable más consistente en sentido radial. Se observó además una relación inversa entre esbeltez del árbol y ángulo microfibrilar. Los resultados confirman la importancia de esta variable anatómica como criterio de selección en programas de mejoramiento genético orientados a la producción de madera estructural.

Palabras clave: Ángulo microfibrilar; Espesor de pared celular; Esbeltez; Mejoramiento genético.

Abstract

The fibers of four *Eucalyptus* spp. Clones, two pure (*E. grandis*) and two hybrids (*E. grandis* × *E. camaldulensis*), grown at two contrasting sites in northeastern Argentina

were anatomically characterized with the aim of identifying genetic materials with greater potential for different industrial applications. The analyzed variables included fiber length, total and lumen width, cell wall thickness and proportion, and microfibril angle, at three radial positions along the stem. The results showed that the hybrid clones exhibited a higher cell wall proportion and smaller lumen compared to the pure clones. Clone GC INTA 27 presented the slenderst fibers, while EG INTA 157 showed the least favorable structural values due to its high microfibril angle. On the other hand, fiber length was the most consistent variable along the radial direction. An inverse relationship was also observed between tree slenderness and microfibril angle. These results confirm the importance of this anatomical variable as a selection criterion in breeding programs aimed at producing structural wood.

Keywords: Microfibril angle; Cell wall thickness; Slenderness; Genetic improvement.

Introducción

Las provincias de Corrientes y Entre Ríos cuentan con la mayor superficie implantada de diferentes especies de eucalipto dentro del territorio de la de República Argentina, contando con 131.224 ha y 100.447 ha, respectivamente (SAGyP, 2023). *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden es la principal especie comercial, ya que combina rapidez de crecimiento con rectitud de fuste y una madera apta para usos industriales, motivo por el cual la superficie de plantaciones clonales se está incrementando debido a la mayor oferta de materiales genéticos con mayor adaptación a diferentes condiciones edafo-climáticas y al aumento de la productividad y homogeneidad de las plantaciones (Aparicio y Maggio 2018). Sin embargo, la principal limitante ecológica para su cultivo a gran escala es su alta sensibilidad al frío que causa el quemado de los márgenes de las hojas, daño de la yema apical, grietas en la corteza y, en casos extremos, muerte de las plantas (Harrand et al. 2017). Por ello, Harrand y Marcó (2012) propusieron el uso de otras especies de eucaliptos resistentes al frío en reemplazo del *E. grandis* para la región Mesopotamia. Sin embargo, ninguna de ellas logra cubrir actualmente todas las ventajas que posee esta especie por sí sola, con el grado de mejora genética hasta ahora alcanzado. Razón por la cual desarrollaron híbridos interespecíficos. Una de las ventajas de empleo de estos genotipos es la posibilidad de reunir en una sola planta las características deseables de dos especies de valor forestal (vigor híbrido) (Assis y Mafia 2007; Harwood 2011).

En la Mesopotamia Argentina, los primeros cruzamientos controlados para la selección de clones híbridos interespecíficos de *E. grandis* con *E. camaldulensis* Dehnh (GC), *E. tereticornis* Sm, *E. dunni* Maiden y *E. globulus* Labill fueron generados por Harrand y Schenone (2002). En general, los resultados disponibles en la región mesopotámica indican la superioridad de los clones híbridos de GC respecto a *E.*

grandis, ya que GC presentan crecimientos similares o más elevados, mejor forma y sanidad (Rauté et al., 2005; Harrand y Marcó 2012).

Estudios comparativos entre el material de semilla mejorada de *E. grandis* y clones híbridos, evidenciaron que estos últimos presentaron alta velocidad de crecimiento, elevada proporción de corteza, alta densidad de la madera, bajo nivel de tensiones de crecimiento y una estabilidad dimensional aceptable, entre un 3,4% y 18,1% inferiores al material de semilla (López et al., 2016).

Harrand et al. (2017) indicaron que, de acuerdo a esto, el interés por los híbridos está determinada por la capacidad de combinar en nuevos genotipos, la rapidez de crecimiento, buena forma y calidad maderable de *E. grandis*, con la mayor adaptabilidad a ciertos ambientes pedoclimáticos (suelos secos, pobremente drenados, arcillosos y/o ambientes fríos) de especies como *E. camaldulensis*, brindando al mismo tiempo una madera de mayor densidad apta para ciertas aplicaciones (ej. pisos, usos estructurales, bioenergía). En este sentido, las propiedades tecnológicas de la madera pueden ser afectadas por las características de xilema secundario, es decir, las dimensiones de las fibras, como longitud (LF), espesor de pared celular (EPC) y el ángulo microfibrilar (AMF) de la pared celular secundaria (Ferreira et al., 2018).

Las propiedades de la madera, como la rigidez, resistencia y la estabilidad a la contracción mejoran sustancialmente con la disminución del AMF (Pellerin y Ross 2002; Huang et al., 2003). Por lo tanto, resulta de interés identificar especies y progenies que en la etapa juvenil presenten bajo AMF. Esta zona del fuste constituye la sección crítica que condiciona su validación para usos estructurales. Si bien, resulta conocida la influencia de esta variable sobre las propiedades de la madera, las investigaciones en nuestra región sobre este tema aún son escasas debido a lo dificultoso que resulta su medición con el equipamiento disponible (microscopio óptico). Una de las técnicas utilizadas para la medición del AMF es a través de la apertura de las puntuaciones por luz polarizada (Yin et al., 2011; Winck et al., 2022). Sin embargo, para su empleo en latifoliadas presenta limitaciones, ya que las puntuaciones son muy pequeñas y escasas. La madera madura de latifoliadas posee menor valor de AMF que en la madera juvenil y con menor variación radial en comparación con el leño de coníferas (Donaldson 2008). El AMF se utiliza para la selección de árboles con madera de mayor resistencia (Butterfield y Walker 1995), la inclusión de esta variable dentro de un programa de mejoramiento superaría a la selección por densidad (Gherardi Hein y Tarcisio Lima 2012). La principal razón por la que se estudia el AMF de la pared celular secundaria, constituye su relación con las tensiones de crecimiento y las contracciones, la madera de compresión en la parte

interna del fuste tiende a tener mayor ángulo microfibrilar con paredes más lignificadas, mientras que en la periferia, de forma gradual, predomina la madera de tensión menos lignificada, lo cual permite un ordenamiento de microfibrillas con mayor orientación al eje longitudinal (Donaldson 2008; López et al., 2018). Además de ser una característica altamente heredable (Donaldson 2008). Donaldson y Burdon (1995) reportaron que tanto la rigidez como el AMF presenta un control genético elevado h^2 de 0,7. A su vez, Cave y Walker (1994) concluyeron que es suficiente la variación en el AMF entre árboles para justificar la selección de clones para mejorar la rigidez, característica fundamental para fines estructurales.

La relación entre AMF y la calidad estructural de la madera está bien establecida para las maderas de coníferas. Pero no muy estudiada en latifoliadas, así como la influencia del espaciamiento de la plantación en el AMF de plantaciones jóvenes (Soares Brito et al., 2021). Se requiere mayor caracterización de éstas, así como investigaciones que correlacionen el ángulo microfibrilar con la longitud de la fibra, ancho de fibras, ancho de lumen y espesor de la pared celular (Donaldson 2008). Como ocurre con las demás propiedades de la madera, el AMF también puede sufrir influencias edafoclimáticas, ya que está íntimamente relacionado a la biometría de las fibras y, en consecuencia, a la actividad cambial (Yamamoto et al., 1997).

Ferreira et al. (2018) mencionaron que existen estudios acerca de la biometría de la fibra y el ángulo microfibrilar de eucaliptos, a fin de predecir mejores usos tecnológicos. La variación de dichas características entre las especies productoras de madera de calidad estructural, están directamente relacionada con la resistencia mecánica y propiedades físicas como la contracción y el hinchamiento. Además, demostraron en sus estudios con genotipos de eucaliptos, una correlación negativa entre longitud de fibra y el AMF.

Malan (1995) mencionó que el espesor de la pared celular de la fibra es una característica que está relacionada con factores genéticos, ambientales, con la edad del árbol y la densidad de la madera. Chowdhury et al. (2012) mencionaron que las variaciones de proporción de pared celular de fibras y su espesor dentro del perfil radial de los árboles son creciente de médula a corteza y su relación con la densidad estacionada son significativos, según estudios realizados en *Casuarina equisetifolia* L.

El objetivo de este estudio fue caracterizar nuevos clones de *Eucalyptus* spp. mediante la morfometría de sus fibras en dos zonas geográficas diferentes e identificar materiales genéticos con mayor potencialidad para diferentes usos industriales.

Materiales y métodos

El material genético utilizado consiste en 4 clones de *Eucalyptus* spp., (Tabla 1) provenientes de dos ensayos similares ubicados en sitios diferentes, instalados por la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) de INTA Concordia, Entre Ríos. El Sitio 1, posee un suelo mestizo arenoso con relieve suavemente ondulado, ubicado en el predio de la EEA (Estación Experimental Agropecuaria) de INTA Concordia, Entre Ríos, implantado a un distanciamiento de 3,5 m x 3,5 m (1225 plantas ha⁻¹), compuesto por parcelas lineales de 5 plantas en dirección norte-sur, con doble bordura perimetral de *E. grandis* proveniente de huerto semillero de progenies. El muestreo fue realizado a los 15 años de edad.

El Sitio 2, se encuentra en un suelo rojo profundo, en posición de media loma, con 11 años al momento del muestreo, fue establecido en la localidad de Leandro N. Alem, Misiones, Argentina, con un espaciamiento de 4 m x 2,5 m (1000 plantas ha⁻¹) y un diseño experimental de bloques completos al azar (BCA) con 5 repeticiones y parcelas de 4 plantas, con bordura simple de *E. grandis* proveniente de huerto semillero de progenies.

Ambos sitios se corresponden con un régimen termopluviométrico de clima templado cálido (subtropical) sin estación seca, designado como *Cfa*, según el sistema de clasificación de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007).

Para la extracción de muestras fueron seleccionados al azar 3 árboles de cada clon y sitio. A partir de los datos del diámetro a la altura de pecho (DAP) y la altura (H) se calculó el coeficiente de (S) que se obtiene como el cociente H/DAP. Este dato nos permite obtener una relación hipsométrica que es dependiente del sitio (Caballe et al., 2020).

Tabla 1. Variables dasométricas de cada sitio. Donde: n: número de árboles medidos; DAP: diámetro medio a la altura de pecho (1,3 m); H: altura media; (): rango de mínimo a máximo.

Table 1. Dasometric variables of each site

Clones	Tipo de clon	Taxones	Sitio	n	DAP (cm)	H (m)
EG INTA 157	Puro	<i>E. grandis</i>	1	8	22,4 (16,2 – 31,8)	27,8 (21,8 – 32,4)
			2	12	28,7 (19,0- 40,0)	34,3 (22,60 - 42,1)
EG INTA 36	Puro	<i>E. grandis</i>	1	8	30,2 (25,3 – 38,5)	33,9 (31,6 – 36,5)
			2	13	33,7 (23,4 - 36,5)	37,8 (31,4 - 43,2)
GC INTA 24	Híbrido	<i>E. grandis x E. camaldulensis</i>	1	8	22,4 (18,8 – 27,2)	28,4 (26,5 – 31,1)
			2	12	27,4 (22,0 - 36,5)	30,7 (24,2 - 38,3)
GC INTA 27	Híbrido	<i>E. grandis x E. camaldulensis</i>	1	8	27,2 (22,6 – 33,1)	33,5 (30,5 – 35,5)
			2	13	32,0 (22,6 - 40,1)	32,9 (25,8 - 38,7)

Preparación De Muestras

Para la determinación de ángulo microfibrilar AMF ($^{\circ}$), ancho de lumen AL (μm), ancho total de fibra AT (μm), longitud de fibra LF (μm), espesor de pared celular EPC (μm) y proporción de pared celular PC (%) se emplearon probetas de 2 x 2 x 2 cm de cada uno de los 24 árboles apeados, tomando 3 posiciones radiales relativas de la rodaja basal, M1 = 0 - 33,33 % (sección interna), M2 = 33,34 - 66,66 % (sección media) y M3 = 66,67 - 100 % (sección externa). De estas probetas se tomaron astillas que fueron saturadas y posteriormente disociadas empleando un tratamiento combinado de ácido acético (CH_3COOH , Cicarelli®) y clorito de sodio (NaClO_2 , Cicarelli®) según el procedimiento informado por Núñez (2014). Cabe destacar que las muestras provenientes de cada sitio corresponden dos estudios independientes, donde la rodaja basal fue la única altura de muestreo coincidente entre ambos, debido a la diferencia de longitudes en el trozado.

Medición de caracteres anatómicos

Para las mediciones de los caracteres de las fibras se utilizó un microscopio óptico trinocular marca Nikon modelo Eclipse LV100DA-U con iluminación por luz transmitida. El sistema cuenta con una cámara digital a color modelo DS-FI2-U3 y un *software* de operación para procesamiento de imágenes NIS-Elements D versión 4.13.00 64-bit. Sobre el material disociado de cada muestra se realizaron 25 repeticiones de cada una de las características anatómicas evaluadas en las fibras, siguiendo las recomendaciones de las normas IAWA (Wheeler et al., 1989). Para determinar el ángulo microfibrilar (AMF) se empleó la técnica denominada a través de la apertura de las puntuaciones presentes en fibras (Yin et al., 2011). Dicha técnica se fundamenta en que el ángulo de inclinación de las puntuaciones corresponde con el ángulo de microfibrillas de la capa S2 de la pared celular. Se emplea luz que resalta la apertura de dichas puntuaciones, lo que permite medir su ángulo de inclinación con respecto al eje longitudinal de la fibra. Utilizando un aumento de 500X, al igual que para el ancho total de fibra (AT) y el ancho de lumen (AL). Mientras que la longitud de fibra (LF) se midió a 50X. El espesor de pared celular (EPC) y la proporción de pared (PC) se obtuvo mediante cálculos $(AT - AL) / 2$ y $((AT - AL) / AT) \times 100$, respectivamente.

Análisis estadísticos

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el software Infostat (Di Rienzo et al., 2020). Primeramente, se verificó por medio de un ANOVA el cumplimiento de los supuestos estadísticos de normalidad mediante un histograma de los residuos y homocedasticidad de errores por gráfico de dispersión. Las variables AMF y EPC no presentaron distribución normal, por lo que fue necesario realizar una transformación de las variables, aplicando la raíz cuadrada. Posteriormente se eliminaron aquellos datos aberrantes con desvío estándar mayor a 3 y menor a -3.

Los datos se analizaron con gráficos de puntos y modelos lineales generales mixtos (MLM), tomando al árbol como variable aleatoria y como fuente de variación de efecto fijo el clon dentro de cada sitio. Para la comparación de medias de variables entre sitios se realizó mediante la prueba DGC (Di Rienzo, Guzmán y Casanoves) (Di Rienzo et al., 2020) empleando un nivel de significancia del 5 %, teniendo en cuenta únicamente la posición radial M1 cercana a la médula, ya que es la única coincidente entre sitios debido a la diferencia de edad de la plantación.

Resultados y discusión

En las Figuras 1 y 2 se puede observar las tendencias en sentido radial que adopta cada una de las variables anatómicas por clones y sitios.

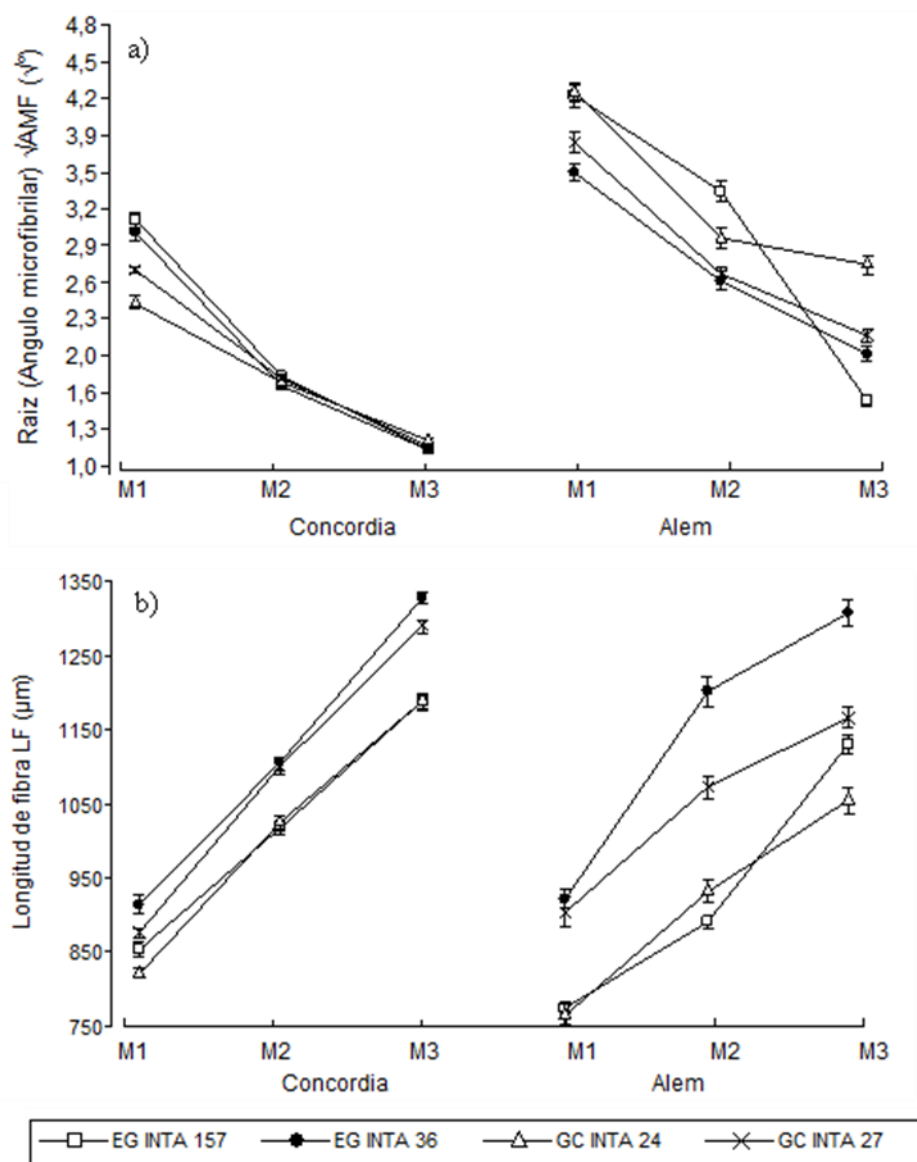


Figura 1. Tendencia de las variables anatómicas por clon dentro de cada sitio. Las barras de dispersión expresan el error estándar del promedio. a) ángulo microfibrilar (AMF); b) longitud de fibra (LF); M1: sección radial interna; M2: sección radial media; M3: sección radial externa.

Figure 1. Trend in anatomical variables by clone within each site. Scatter bars express the standard error of the average. a) microfibrillar angle (MFA); b) fiber length (LF); M1: inner radial section; M2: middle radial section; M3: outer radial section.

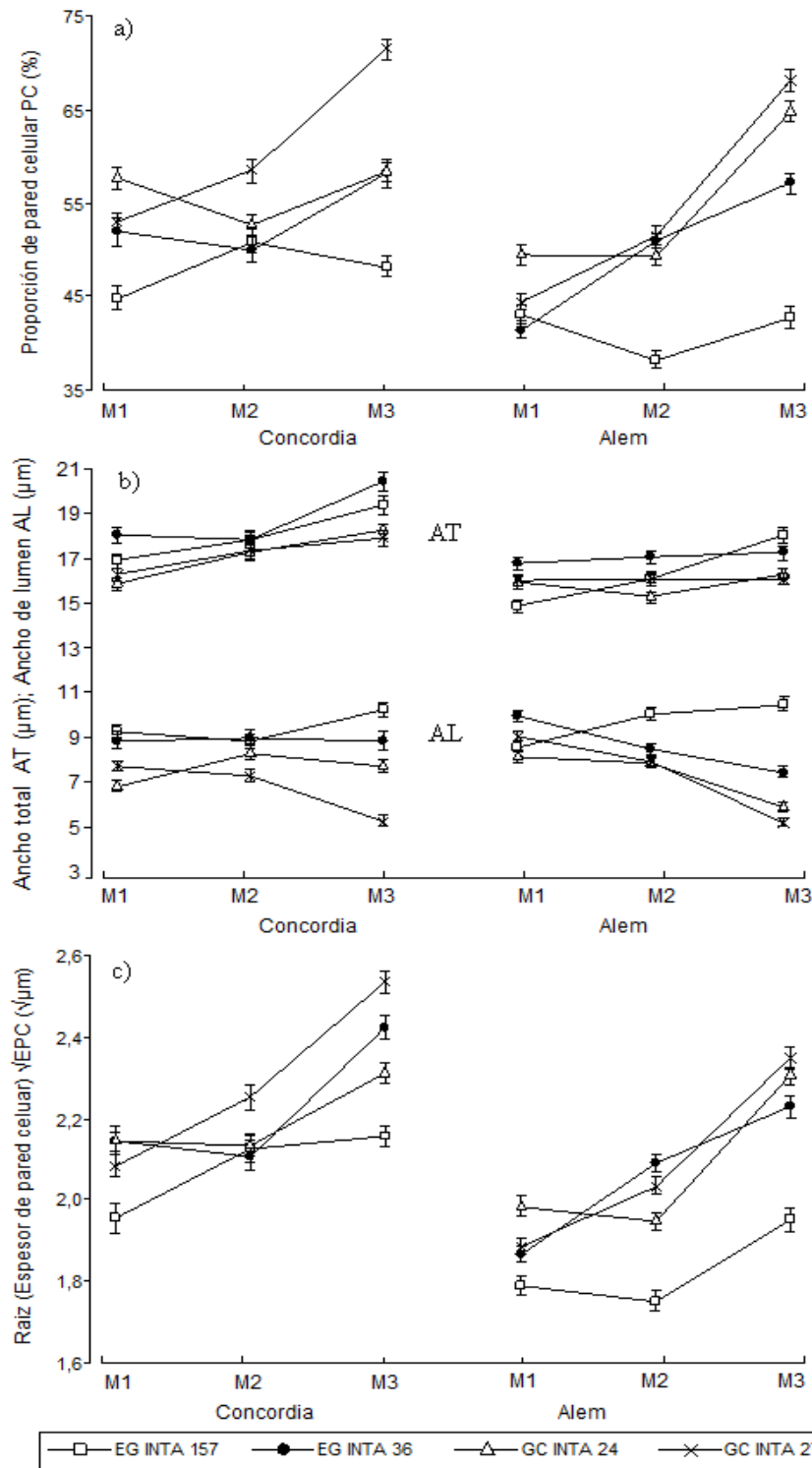


Figura 2. Tendencia de las variables anatómicas por clon dentro de cada sitio. Las barras de dispersión expresan el error estándar del promedio. a) proporción de pared celular (PC); b) ancho total de fibra (AT), ancho de lumen (AL); c) espesor de pared celular (EPC); M1: sección radial interna; M2: sección radial media; M3: sección radial externa.

Figure 2. Trend in anatomical variables by clone within each site. Scatter bars express the standard error of the average. a) cell wall proportion (PC); b) total fiber width (AT), lumen with (AL); c) cell wall thickness (EPC); M1: inner radial section; M2: middle radial section; M3: outer radial section.

Se observó una marcada tendencia decreciente del AMF y creciente de LF con respecto al radio, con mayor dispersión entre y dentro de los clones para el sitio 2 (L.N. Alem). Mientras que el comportamiento radial para el AL de los distintos clones resultó ser bastante homogéneo, y con patrones similares en el sitio 1 y 2. El AT presentó una tendencia de aumento radial, pero con una menor pendiente. Teniendo en cuenta la posición radial M1 (edad similar), los valores medios de AT fueron superiores para el sitio de Concordia. La variable PC presentó una tendencia poco definida a lo largo del radio para los clones EG INTA 36 y GC INTA 24 en el sitio 1, mientras que los menores valores se registraron en el clon EG INTA 157 y los mayores para el GC INTA 27 en ambos sitios. En la Tabla 2 se comparan los valores medios entre clones, obtenidos para cada sitio.

La variable $\sqrt{\text{AMF}}$ no presentó diferencias estadísticas entre clones para el sitio 1, mientras que sí en el sitio 2. Por otro lado, más allá de las similitudes estadísticas o no que existieron entre clones, es necesario destacar para las demás variables, el *ranking*, el cual fue consistente entre sitios. Donde EG INTA 157 presentó el mayor AL y consecuentemente, menor $\sqrt{\text{EPC}}$ y PC, así como las menores LF, junto con GC INTA 24. El clon híbrido GC INTA 27 demostró tener fibras relativamente más esbeltas con el bajo AT y alta LF, mientras el clon puro EG INTA 36 arrojó valores de fibras más voluminosas con alto AT y mayor LF, pero no necesariamente mayor $\sqrt{\text{EPC}}$ ni PC. A su vez, el clon GC INTA 24 posee las fibras de menores dimensiones, menor LF, AT y AL, pero una PC relativamente alta. Los resultados aquí presentados concuerdan con hallados en la bibliografía con taxones similares. Palermo et al. (2015) reportaron valores medios del radio de espesor de pared celular de 3,7 μm (4,8 μm y 4,1 μm promedio de EPC en los sitios 1 y 2 respectivamente), 48,7 % de proporción de pared y 1061 μm de longitud de fibra en *E. grandis*. Veenin et al. (2005) hallaron valores de longitud de fibra de 880 μm en árboles provenientes de semilla de la especie *E. grandis* con 9 años de edad. A su vez, Leonello et al. (2008) reportó 1053 μm para esta variable en *E. grandis* de 28 años. En cuanto al AMF, existe escasa información con la cual comparar, no obstante Ferreira et al. (2018) describió valores medios de 10,5° a 11,1° para la especie *E. urophylla* ST.Blake. Mientras que Wessels et al. (2016) halló valores de 15,7° en un híbrido *E. grandis* x *E. camaldulensis*. Dichos resultados son similares a los descriptos en la Tabla 2 para el sitio 2, entre 11,22° y 12,67° para los clones puros y entre 12,25° y 15,05° en híbridos aproximadamente.

Tabla 2. Comparación de variables anatómicas entre clones. Donde: AMF: ángulo microfibrilar; AT: ancho total; AL: ancho de lumen; EPC: espesor de pared celular; PC: proporción de pared celular; LF: longitud de fibra; medias con letras en común no presentan diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$)

Table 2. Comparison of anatomical variables between clones

		Sitio 1 (Concordia)		Sitio 2 (Alem)	
		Media	DE	Media	DE
√AMF	EG INTA 157	2,54 a	1,07	3,56 b	1,18
	EG INTA 36	2,49 a	1,02	3,35 c	0,84
	GC INTA 24	2,36 a	0,74	3,88 a	0,80
	GC INTA 27	2,45 a	0,87	3,50 b	0,77
AT	EG INTA 157	18,38 b	3,36	16,66 b	3,11
	EG INTA 36	19,11 a	3,67	17,36 a	2,54
	GC INTA 24	17,48 c	3,03	16,15 b	2,34
	GC INTA 27	17,51 c	2,84	16,38 b	2,16
AL	EG INTA 157	9,58 a	2,75	9,84 a	2,60
	EG INTA 36	9,05 b	3,28	8,77 b	2,40
	GC INTA 24	7,73 c	2,47	7,38 c	2,29
	GC INTA 27	6,86 d	2,47	7,47 c	2,50
√EPC	EG INTA 157	2,08 c	0,29	1,83 b	0,24
	EG INTA 36	2,22 b	0,33	2,06 a	0,24
	GC INTA 24	2,20 b	0,24	2,08 a	0,25
	GC INTA 27	2,29 a	0,31	2,09 a	0,28
LF	EG INTA 157	1018,05 b	160,97	930,45 c	169,95
	EG INTA 36	1109,35 a	187,67	1140,82 a	216,94
	GC INTA 24	1011,23 b	173,09	917,67 c	177,87
	GC INTA 27	1085,45 a	182,02	1048,96 b	178,08
PC	EG INTA 157	48,02 d	10,77	41,22 c	9,07
	EG INTA 36	53,00 c	12,76	49,73 b	10,36
	GC INTA 24	56,25 b	9,97	54,51 a	11,52
	GC INTA 27	60,78 a	12,53	54,53 a	13,34

Para analizar la diferencia entre sitios, se comparó las medias de las variables anatómicas en la posición radial M1, más cercana a la médula. Donde se minimiza el efecto de la diferencia de edad entre plantaciones. En la Tabla 3 se presentan los valores medios de las características de las fibras para la posición radial M1.

Se puede observar que todas las variables obtenidas para la posición radial M1 presentaron valores similares entre sitios. A diferencia del AMF que demostró

diferencias estadísticamente significativas entre sitios, con valores medios inferiores para el sitio 1, excepto para el clon EG INTA 36, que los valores de AMF fueron iguales para el sitio 1 y 2 (Tabla 3).

Tabla 3. Promedio de variables anatómicas en la zona medular, comparación entre sitios. Donde: 1: Concordia; 2: L.N. Alem; AMF: ángulo microfibrilar; AT: ancho total; AL: ancho de lumen; EPC: espesor de pared celular; PC: proporción de pared celular; LF: longitud de fibra; medias con letras en común no presentan diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$).

Table 3. Average anatomical variables in the spinal cord area, comparison between sites.

Clon	Sitio	$\sqrt{\text{AMF}} (\sqrt{^\circ})$	AT (μm)	AL (μm)	$\sqrt{\text{EPC}} (\sqrt{\mu\text{m}})$	PC (%)	LF (μm)
EG INTA 157	1	3,8 b	17,2 a	9,4 a	1,9 a	45,1 a	853,0 a
	2	4,6 a	15,2 a	8,7 a	1,8 a	43,1 a	775,6 a
EG INTA 36	1	3,7 a	18,4 a	9,0 a	2,1 a	51,4 a	910,1 a
	2	4,1 a	17,1 a	10,1 a	1,9 a	41,4 a	921,4 a
GC INTA 24	1	3,1 b	16,2 a	6,9 a	2,1 a	57,7 a	821,3 a
	2	4,6 a	16,2 a	8,2 a	2,0 a	49,4 a	766,4 a
GC INTA 27	1	3,4 b	16,6 a	7,8 a	2,1 a	52,9 a	874,9 a
	2	4,3 a	16,3 a	9,2 a	1,9 a	44,0 a	912,7 a

La diferencia entre valores absolutos puede deberse a las condiciones climáticas y edáficas propias de cada sitio (Harrand et al., 2017; Moreno et al., 2018). El sitio 2 que presentó mayor crecimiento en diámetro y altura, arrojó atributos anatómicos de menor calidad desde el punto de vista estructural, es decir, mayor AMF (aunque sin diferencia estadística), y menor espesor y proporción de pared celular. Inversamente a lo hallado por Wimmer et al. (2008), quienes reportaron, para *E. globulus* Labill., un aumento de la longitud de fibra y una disminución del ángulo microfibrilar, acompañado del aumento del diámetro a la altura de pecho y altura total. A su vez, la influencia de la densidad de plantación es un factor que influye en el crecimiento y por consiguiente en la morfometría de fibras (Watson et al., 2003). Los valores medios encontrados en la zona interna del fuste para EPC y PC son comparables a los resultados obtenidos por Palermo et al. (2015) en *E. grandis*, no así AL, AT y LF, quienes hallaron valores de 3,51 μm espesor de pared (EPC), 44,5 % proporción de pared (PC), 986 μm longitud de fibra (LF), 14,1 μm ancho de lumen (AL), 21,04 μm ancho total de fibra (AT) en la zona de la madera juvenil. Mientras que en este trabajo los valores medios por sitio fueron de 4,2 μm EPC, 51,7 % PC, 864,8 μm LF, 8,4 μm AL, 17,2 μm AT y 3,6 μm EPC, 44,4 % PC, 846,3 μm LF, 9,7 μm AL, 16,2 μm AT para el sitio 1 y 2 respectivamente. Veenin et al. (2005) reportaron para la longitud de

fibra, valores medios de 876 μm en clones de *E. camaldulensis* de 5 años. En cuanto al AMF, Wessels et al. (2016) reportaron ángulos para un clon híbrido *E. grandis* x *E. camaldulensis* en la parte interna del fuste, aproximadamente entre 20° y 16°, mientras que, para los sitios 1 y 2, respectivamente, el clon GC INTA 24 presentó un ángulo medio de 21,4° y 10,0° y el clon GC INTA 27 de 18,8° y 11,8°.

Caballe et al. (2020) atribuyeron la disminución del ángulo microfibrilar (AMF) a un aumento de la esbeltez (S) del árbol en relación al sitio. Dicha relación entre AMF y S influye directamente sobre la rigidez de la madera, una propiedad mecánica que no ha sido analizada en el presente trabajo. A su vez, Warren et al. (2009) encontraron para tres especies de *Eucalyptus* spp, que la rigidez dinámica en pie fue la única variable que presentó una respuesta significativa con respecto a la esbeltez, entre otras, como el diámetro a la altura de pecho, altura total, proyección de copa, altura de copa y densidad básica. En la tabla 4 se puede observar los valores medios de S y $\sqrt{\text{AMF}}$ por tratamiento.

Tabla 4. Comparación de esbeltez y ángulo microfibrilar de cada clon y sitio. Donde: 1: Concordia; 2: L.N. Alem; S: esbeltez; AMF: ángulo microfibrilar; DE: desvío estándar.

Table 4. Comparison of slenderness and microfibrillar angle of each clone and site.

Clon	Sitio	S (m/cm)	DE (S)	$\sqrt{\text{AMF}}$ (°)	DE ($\sqrt{\text{AMF}}$)
EG INTA 157	1	1,27	0,16	2,54	1,07
	2	1,24	0,28	3,56	1,18
EG INTA 36	1	1,13	0,10	2,49	1,02
	2	1,10	0,13	3,35	0,84
GC INTA 24	1	1,30	0,13	2,36	0,74
	2	1,13	0,14	3,88	0,80
GC INTA 27	1	1,25	0,13	2,45	0,87
	2	1,05	0,18	3,50	0,77

Se puede observar una relación inversa entre $\sqrt{\text{AMF}}$ y S. Un mayor valor de esbeltez en el sitio 1 podría deberse a la mayor densidad de plantación (225 plantas por hectárea más que en el sitio 2). Aunque la disparidad de edad entre los ensayos invalida una comparación directa, es factible asumir una diferencia constante en el índice de esbeltez (H/DAP). Esto se fundamenta en que la densidad de plantación influye predominantemente en el diámetro a la altura pecho, más que en la altura total del árbol, tal como reportaron Díaz Bravo et al. (2012). Como se observó en la tabla 1, el sitio 2 (Alem) con menor edad ya habría superado en DAP al sitio 1 (Concordia).

Conclusión

Los clones híbridos GC INTA 24 y GC INTA 27 presentaron fibras de menor ancho, menor lumen y mayor proporción de pared celular que los clones puros.

Comparativamente, con respecto a los otros clones, el puro EG INTA 157 presentó aptitudes anatómicas no deseadas, desde el punto de vista estructural por su alto ángulo microfibrilar. Y aunque el sitio Concordia (sitio 1) presentó valores más homogéneos. La mayor tasa de crecimiento de L.N. Alem (sitio 2) acorta los turnos forestales. A su vez, los materiales genéticos provenientes de Concordia (sitio 1) alcanzaron mayor longitud y ancho total de fibra, espesor y proporción de pared celular, menor ancho de lumen y ángulo microfibrilar respecto a los de L.N. Alem (sitio 2) en la zona interna de la rodaja.

La longitud de fibras resultó ser la variable más consistente respecto a su comportamiento en el sentido radial. En ambos sitios y para las 3 posiciones radiales se mantuvo la tendencia de mayores valores medios de longitud de fibra para los clones EG INTA 36 y GC INTA 27.

Los resultados demuestran la importancia del ángulo microfibrilar en respuesta al sitio en los ensayos de mejoramiento genético.

Para futuras investigaciones se recomienda realizar estudios de las variables anatómicas a otras alturas, dado que existe una variación longitudinal con el perfil del fuste, además porque la rodaja basal no constituye la región más representativa debido a que las mayores deformaciones en la madera se producen en la base del fuste y a su vez está sometida a esfuerzos de tensión.

Por otro lado, se sugiere incorporar los ensayos mecánicos para comprobar si las propiedades alcanzasen valores estructurales, a pesar de que las características anatómicas evaluadas en ambos sitios mejoran en el sentido radial sus valores indicadores de las propiedades estructurales de la madera.

Agradecimientos

Los autores agradecen especialmente al propietario del terreno, Sr. Ricardo Schesani e hijo; a los Ing. Javier Oberschelp y Leonel Harrand de EEA-INTA Concordia quienes instalaron el ensayo y a los técnicos de EEA-INTA Montecarlo.

Referencias bibliográficas

- Aparicio J. L.; Maggio A. D. 2018. Respuesta a la fertilización con NPK en 5 clones de *Eucalyptus grandis* en planicies arenosas de Corrientes. *XXII Jornadas Forestales de Entre Ríos*. 5 p.
- Assis, T. F.; Mafia, R. G. 2007. Hibridação e clonagem. In: Borém, A. (Ed.) *Biotecnologia florestal*. Viçosa, MG: [s.n.], 2007: 93-121.
- Butterfield, B.; Walker, J. 1995. The importance of microfibril angle for the processing industries. *New Zealand Forestry*. 4(4):34-40.
- Caballé, G.; Santaclara, O.; Diez, J. P.; Letourneau, F.; Merlo, E.; Meier, A. M. 2020. Where to find structural grade timber: a case study in ponderosa pine based on stand and tree level factors. *Forest Ecology and Management*, 459, 117849.
- Cave, I.D.; Walker, J.C.F. 1994. Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods: the influence of microfibril angle. *Forest Prod J*, 44(5), 43-48.
- Chowdhury, M. Q.; Ishiguri, F.; Hiraiwa, T.; Matsumoto, K.; Takashima, Y.; Iizuka, K.; Yokota, Y.; Yoshizawa, N. 2012. Variation in anatomical properties and correlations with wood density and compressive strength in *Casuarina equisetifolia* growing in Bangladesh. *Australian Forestry*, 75(2), 95-99.
- Díaz Bravo, S., Espinosa, M., Valenzuela, L., Cancino, J., Lasserre, J. P. 2012. Efecto del raleo en el crecimiento y algunas propiedades de la madera de *Eucalyptus nitens* en una plantación de 15 años. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 14(3).
- Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G.; González, L.; Tablada, M.; Robledo, C. W. 2020. InfoStat 2020. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Donaldson, L. A. 2008. Microfibril angle: measurement, variation and Relationships. A review. *IAWA Journal*, 29(4), 345-386.
- Donaldson, L.A.; Burdon, R. D. 1995. Clonal variation and repeatability of microfibril angle in *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 25(2):164-174.
- Ferreira, C. A.; Ribeiro, A. D. O.; Urbinati, C. V.; Mori, F. A. 2018. Biometria das fibras eo ângulo microfibrilar em genótipos de Eucalipto. *Scientia Agraria Paranaensis*, 17(3), 352-358.
- Gherardi Hein, P. R.; Tarcísio Lima, J. (2012). Relationships between microfibril angle, modulus of elasticity and compressive strength in *Eucalyptus* wood. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 14(3), 267-274.
- Harrand, L.; Schenone, R. 2002. Obtención de individuos híbridos de *Eucalyptus* a través de la realización de cruzamientos controlados. *XVII Jornadas Forestales de Entre Ríos*. 10.p

- Harrand, L.; Marcó, M.A. 2012. Investigación hacia el desarrollo de material genético tolerante al frío. XXVI *Jornadas Forestales de Entre Ríos*. Concordia.
- Harrand, L.; Oberschelp, J.; Mastrandrea, C. 2017. Curso: Principios técnicos para el cultivo de especies Forestales de Entre Ríos. Mejoramiento Genético de especies cultivadas en Entre Ríos Chajarí. INTA EEA Concordia. 19 pp.
- Harwood, C. 2011. New introductions-Doing it right. In: Developing a Eucalypt Resource: Learning from Australia and elsewhere. *University of Canterbury. Christchurch, New Zealand: Wood Tech. Research Centre*. Workshop Proc.: 43-54.
- Huang, C. L.; Lindström, H.; Nakada, R.; Ralston, J. 2003. Cell wall structure and wood properties determined by acoustics—a selective review. *Holz als Roh-und werkstoff*, 61, 321-335.
- Leonello, E.C.; Palma, H.A.L.; Ballarin, A.W. 2008. Delimitação da madeira juvenil e adulta de *Eucalyptus grandis* em Sao Paulo, Brasil. *Rev Forest Venez*, 52(1), 93-99.
- López, J. A.; Harrand, L.; Marco, M. A.; López, A. J. 2016. Variación genética de clones híbridos de *Eucalyptus. Quebracho*. Santiago del Estero. 24(1):5-6.
- López, J.A.; Mastrandrea, C.A.; López, J.A.; Hernandez, M.A.; Martinez, M.S.; Oberschelp, G. P.J.; Harrand, L. 2018. Tensiones de crecimiento, propiedades físicas, mecánicas y defectos en tablas de clones puros e híbridos de *Eucalyptus grandis* del INTA, XXXII *Jornadas Forestales de Entre Ríos*, Concordia, Argentina, 41-53.
- Malan, F. 1995. *Eucalyptus* improvement for lumber production. In: Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria. Trabalhos apresentados. *Piracicaba, São Paulo. IPEF/IPT*. pp. 1 - 19.
- Moreno, K. G.; Spavento, E. M.; Monteoliva, S. E. 2018. Variabilidad en la anatomía y densidad de la madera de *Eucalyptus globulus*: análisis preliminar del efecto de la procedencia, suelo y edad. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*. Vol 117 (1): 163-170.
- Núñez, C. E. 2014. Morphological study of fibers of four trees of *Eucalyptus saligna* implanted in Concordia, Entre Rios, Argentina. *RECYT* (22), 40-44.
- Palermo, G.P.; Figueredo-Latorraca, J.V.; De Carvalho, A.M.; Calonego, F.W.; Severo, E.T.D. 2015. Anatomical properties of *Eucalyptus grandis* wood and transition age between the juvenile and mature woods. *Eur J Wood Wood Prod*, 73, 775-780.
- Peel, M.C.; Finlayson, B.L.; McMahon, T.A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences* 11: 1633-1644.

- Pellerin, R. F.; Ross, R. J. 2002. Nondestructive evaluation of wood. Forest Products Society, Madison Wisconsin. 210 pp.
- Rauté, G.; Bunse, G.C.; Paul, J.L. 2005. Crecimiento a los 2 años de clones de *Eucalyptus* spp. En suelos arenosos del norte de Corrientes. 3^{er} Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Corrientes, Argentina. ISSN 1669-6786.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. 2023. Tablero de plantaciones forestales. SAGyP. Extraído el 14 de noviembre de 2023, de: <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/desarrollo-foresto-industrial/inventarios/tablero.php>
- Soares Brito, A., Baptista Vidaurre, G., da Silva Oliveira, J. T., Missia da Silva, J. G., Ferreira Oliveira, R., Dias Junior, A. F., ... & Valverde Zauza, E. A. (2021). Interaction between planting spacing and wood properties of *Eucalyptus* clones grown in short rotation. *Iforest-biogeosciences and forestry*, 14(1), 12.
- Veenin, T.; Fujita, M.; Nobuchi, T.; Siripatanadilok, S. 2005. Radial variations of anatomical characteristics and specific gravity in *Eucalyptus camaldulensis* clones. *IAWA J*, 26(3), 353-361.
- Warren, E., Smith, R. G. B., Apiolaza, L. A., & Walker, J. C. 2009. Effect of stocking on juvenile wood stiffness for three *Eucalyptus* species. *New Forests*, 37(3), 241-250.
- Watson, P., Garner, C., Robertson, R., Reath, S., Gee, W., Hunt, K., 2003. The effects of initial tree spacing on the fiber properties of plantation grown coastal western hemlock. *Can. J. For. Res.* 33, 2460-2468.
- Wessels, C.B.; Crafford, P.L.; Du Toit, B.; Grahn, T.; Johansson, M.; Lundqvist, S.O.; Säll, H.; Seifert, T. 2016. Variation in physical and mechanical properties from three drought tolerant *Eucalyptus* species grown on the dry west coast of Southern Africa. *Eur J Wood Wood Prod*, 74, 563-575.
- Wheeler, E.A.; Baas, P.; Gasson, P.E. (Eds.).1989. IAWA list of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bulletin n.s.*, 10(3), 219-332.
- Wimmer, R.; Downes, G.; Evans, R.; French, J. 2008. Effects of site on fibre, kraft pulp and handsheet properties of *Eucalyptus globulus*. *Annals of Forest Science*, 65(6), 1.
- 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(44):1-22.
- Yamamoto, H.; Okuyama, T.; Yoshida, M. 1997. Growth stress generation and microfibril angle in reaction wood. In: Butterfield, B.G. (Ed.). Microfibril angle in wood. Westport: *International Association of Wood Anatomists*, 1997. p.225-239

Yin, Y.; Song, K.; Liu, B.; Jiang, X. 2011. Variación del ángulo de las microfibrillas en árboles de plantación de *Cunninghamia lanceolata* determinada por aperturas de pozos y difracción de rayos x. *IAWA Journal*, 32 (1), 77-87.