

Variación anatómica en la madera de clones de *Eucalyptus grandis* y sus propiedades dinámicas

Anatomical variation in *Eucalyptus* clones wood and their dynamic properties

Christian Bulman-Hartkopf¹ <https://orcid.org/0000-0002-0817-1002>*

Rosa A. Winck^{1,2} <https://orcid.org/0000-0002-2302-3219>

Karen B. Gonzales-Paiva² <https://orcid.org/0009-0005-6260-8665>

Pablo M. Stefani³ <https://orcid.org/0000-0002-8140-4415>

¹Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estación Experimental Agropecuaria (EEA). Departamento de tecnología de la madera. Montecarlo, Argentina.

²Universidad Nacional de Misiones (UNaM). Facultad de Ciencias Forestales (FCF). Laboratorio de Tecnología de la Madera. Eldorado, Argentina.

³Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA). Div. Materiales Sostenibles. Mar del Plata, Argentina.

*Autor de correspondencia: bulman.christian@inta.gob.ar

Resumen:

El uso creciente de plantaciones de rápido crecimiento para fines estructurales exige criterios confiables para evaluar la calidad mecánica de nuevos materiales genéticos mediante métodos no destructivos. No obstante, la elevada proporción de madera juvenil y la variabilidad anatómica limitan la interpretación de estas técnicas cuando no se comprende su base estructural.

El objetivo de este estudio fue analizar la variación anatómica de la madera y su relación con la densidad básica y las propiedades dinámicas determinadas por resonancia acústica en cinco clones mejorados de *Eucalyptus grandis* de 11 años. Se evaluó el espesor y proporción de pared celular, longitud de fibra, ángulo microfibrilar, diámetro y frecuencia de poros, considerando su variación entre clones y dentro del fuste.

Los resultados mostraron que el diámetro y la frecuencia de poros permiten identificar la presencia de madera madura, mientras que la proporción de pared celular explicó la variación de la densidad básica. El ángulo microfibrilar presentó una fuerte relación con la velocidad del sonido y el módulo de elasticidad dinámico.

En conclusión, la integración del análisis anatómico con la resonancia acústica mejora la interpretación de las propiedades dinámico-mecánicas y aporta una herramienta aplicada para la evaluación estructural no destructiva y la selección genética de clones de *Eucalyptus*

Palabras clave: *Eucalyptus grandis*, fibras de madera, porosidad de la madera, resonancia acústica, madera juvenil, evaluación no destructiva.

Abstract:

The increasing use of fast-growing plantations for structural purposes requires reliable criteria to assess the mechanical quality of new genetic materials using non-destructive methods. However, the high proportion of juvenile wood and the associated anatomical variability limit the effectiveness of these techniques when their structural basis is not well understood.

The objective of this study was to analyze the anatomical variation of wood and its relationship with basic density and dynamic properties determined by acoustic resonance in five improved 11-year-old *Eucalyptus grandis* clones. Cell wall thickness and proportion, fiber length, microfibril angle, vessel diameter, and vessel frequency were evaluated, considering their variation among clones and within the stem.

The results showed that vessel diameter and frequency can be used to identify mature wood, while cell wall proportion explained the variation in basic density. The microfibril angle showed a strong relationship with sound velocity and the dynamic modulus of elasticity.

In conclusion, integrating anatomical analysis with acoustic resonance improves the interpretation of dynamic mechanical properties and provides an applied tool for the non-destructive structural evaluation and genetic selection of *Eucalyptus* clones.

Keywords: *Eucalyptus grandis*, wood fibers, wood porosity, acoustic resonance, juvenile wood, non-destructive evaluation

Recibido: 21.08.2024

Aceptado: 09.01.2026

Introducción

El proceso de transición entre madera juvenil y madura ocurre durante los primeros años y se caracteriza por ser una etapa de rápido crecimiento, donde se forma madera de baja

densidad, que está influenciado por la competencia con su entorno y las características edafoclimáticas (García *et al.* 2016, Eufrade-Junior *et al.* 2017, Cobas y Monteoliva 2018). Conforme se acumulan anillos de crecimiento, cambian los requerimientos hídricos y mecánicos por lo que las células deben especializarse, formando fibras cada vez más largas, con paredes más gruesas, ángulos de microfibrillas de celulosa más agudos y poros de mayor diámetro (Zanuncio *et al.* 2017, Aiso-Sanada *et al.* 2019). Esta transición anatómica no solo define la clasificación de la madera en términos juveniles o maduros, sino que condiciona directamente su comportamiento físico y mecánico, afectando su aptitud para usos estructurales y su valorización industrial. Este cambio sistemático se estabiliza a la madurez, generando madera madura propiamente dicha (Cobas y Monteoliva 2018, Rodríguez-Zaccaro *et al.* 2019). Si bien el punto de transición está determinado por la edad, su extensión dependerá de la característica anatómica que se utilice como indicador (Cobas *et al.* 2014, Wang *et al.* 2021). Según Tsuchiya y Furukawa (2009) y Salvo *et al.* (2017), el diámetro de los vasos y su frecuencia por unidad de superficie son las variables microscópicas más importantes para determinar la edad de transición entre madera juvenil y madura en latifoliadas. Una caracterización integrada de estas variables anatómicas en materiales genéticos mejorados facilitaría la interpretación del grado real de madurez del leño y permitiría anticipar su desempeño mecánico a partir de mediciones indirectas. Las características anatómicas están íntimamente relacionadas con la densidad, la cual puede considerarse como una medida de la estructura interna de la madera. Así la densidad es una variable integradora de la fracción de poros, morfología de fibras y proporción de parénquima (Thomas *et al.* 2007, Salvo *et al.* 2017, Portal-Cahuana *et al.* 2019, Portal-Cahuana *et al.* 2023, Hamdan *et al.* 2020, Marini *et al.* 2022). Esta constituye la razón de que existen especies y genotipos de

densidad similar, pero con distinta anatomía celular (Monteoliva *et al.* 2017). En consecuencia, el uso exclusivo de la densidad como criterio de selección puede resultar insuficiente para discriminar materiales con diferente comportamiento estructural, especialmente en plantaciones jóvenes o de rápido crecimiento.

Generalmente las maderas con mejores propiedades mecánicas están asociadas a valores más altos de la densidad aparente (Cremonez *et al.* 2019). Sin embargo, Machado *et al.* (2014) informó una relación moderada ($R^2 = 0,42$) entre la densidad y el módulo de elasticidad en flexión estática. Esto pone de manifiesto que la predicción del desempeño estructural basada únicamente en parámetros físicos globales presenta limitaciones, particularmente cuando se pretende aplicar metodologías rápidas de clasificación en contextos productivos. Por otro lado, Borůvka *et al.* (2020) concluyeron que el tipo de especie influye en la sobreestimación de resultados del módulo de elasticidad dinámico (por ultrasonido y resonancia) con respecto al estático, reportando una variación del 20 % en especies coníferas, entre un 21 % a 44 % en latifoliadas de porosidad circular y entre 36 % a 68 % en latifoliadas de porosidad difusa. La misma tendencia general fue descrita por Baradit *et al.* (2013) al comparar el módulo dinámico por ultrasonido y en flexión estática, encontrando una sobreestimación del primero entre 25 % a 28 % en coníferas y entre 30 % a 47 % en latifoliadas. Según la revisión bibliográfica de Machado *et al.* (2014), la densidad solo explica parcialmente el comportamiento mecánico, ya que este depende en gran medida de la especie, de su configuración anatómica y de la variación del ángulo microfibrilar de la pared celular secundaria, el cual disminuye a medida que aumenta la densidad.

El estudio del módulo elástico de la madera ha cobrado cada vez mayor relevancia desde que las plantaciones forestales de rápido crecimiento comenzaron a abastecer el mercado.

Esto representa un problema, ya que este tipo de materia prima genera una mayor proporción de madera juvenil, la cual se asocia a una menor densidad y a propiedades mecánicas reducidas, afectando negativamente su uso con fines estructurales (Yang y Evans 2003). No obstante, la selección y el mejoramiento genético permiten potenciar los atributos heredables a la progenie, como las características anatómicas de fibras y traqueidas (Li *et al.* 2014), especialmente el ángulo microfibrilar (Donaldson 2008, Hung *et al.* 2016), que es fundamental por su influencia en la rigidez y resistencia (Winck 2023), sobre todo en la madera juvenil (Wessels *et al.* 2011). Por otro lado, la densidad adquiere mayor importancia en la madera madura (Cave y Walker 1994).

Muchos trabajos han demostrado la efectividad del uso de métodos no destructivos basados en el principio de resonancia acústica para la clasificación de piezas de madera, especies y materiales genéticos (McLean *et al.* 2010, Baar *et al.* 2015, Mastrandrea *et al.* 2016, Omonte y Valenzuela-Hurtado 2020). No obstante, la aplicabilidad de estos métodos se ve condicionada por la variabilidad anatómica interna del material, la cual puede inducir sobreestimaciones o dispersiones en los valores dinámicos si no se comprende su base estructural. En este sentido, la integración del análisis anatómico con técnicas de resonancia acústica permite interpretar las respuestas dinámicas a partir de los mecanismos celulares que las gobiernan, fortaleciendo la validez de la evaluación no destructiva (Donaldson 2008, Chauhan y Walker 2006). Este método demostró ser muy versátil para obtener estimaciones relativamente rápidas de la constante de rigidez dinámica longitudinal de la madera existiendo equipos y programas desarrollados para su aplicación directa en campo o playas de acopio, como es el caso del Hitman HM200 (Fibre-Gen®, Nueva Zelanda) o el software FFT Analyser (Fakopp Enterprise Bt., 2014, Hungría).

Debido a la gran variabilidad que experimenta la morfología celular a causa de los factores genéticos, de competencia y del sitio, no existe una especie con estructura capaz de adaptarse a todos los usos potenciales de la madera. Por esta razón, el mejoramiento genético se enfoca en estudiar la producción de madera con características predefinidas para usos cada vez más específicos y para ello es necesario una correcta comprensión de su anatomía (Santos *et al.* 2022).

Bajo este enfoque, la caracterización conjunta de la anatomía celular y de las propiedades dinámicas se plantea como una herramienta clave para reducir la incertidumbre en la evaluación estructural de clones mejorados y para sustentar criterios de selección basados en desempeño y no únicamente en crecimiento o resistencia ambiental.

El programa de mejoramiento genético del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) ha desarrollado y certificado diferentes materiales genéticos resistentes a las bajas temperaturas, pertenecientes al género *Eucalyptus* (Harrand y Marcó 2012) de los cuales aún existe una falta de información sobre sus propiedades tecnológicas. En particular, se parte de la hipótesis de que determinadas características anatómicas (especialmente aquellas asociadas a la pared celular y al ángulo microfibrilar) controlan de manera significativa la respuesta dinámica de la madera, y que su integración con mediciones por resonancia acústica permite explicar y predecir las diferencias en rigidez entre clones.

El presente artículo es una continuación de Bulman-Hartkopf *et al.* (2024), dónde se investigó la variación radial de la densidad aparente a tres alturas, y la proporción de albura y duramen de cinco materiales genéticos mejorados de *Eucalyptus* spp. De este modo, el estudio busca aportar un marco interpretativo que vincule la variabilidad

anatómica con las propiedades dinámicas, contribuyendo a una evaluación más robusta y funcional de materiales genéticos de *Eucalyptus* destinados a usos estructurales.

Materiales y métodos

Obtención de las muestras

Se utilizaron cinco clones intra e interespecíficos del género *Eucalyptus* de 11 años, detallados en la Tabla 1. Los mismos provienen de un ensayo de mejoramiento genético implantado en el año 2009 por el INTA, en la localidad de Leandro N. Alem, provincia de Misiones, Argentina (27°37'22,88"S; 55°18'4,27"O; 335 m.s.n.m). Se instaló con un diseño experimental de bloques completos al azar (BCA) con bordura simple, 5 repeticiones y parcelas conformadas por 4 plantas, con un distanciamiento 4 m x 2,5 m. El sitio posee un régimen termopluviométrico templado cálido (subtropical) sin estación seca, designado como *Cfa*, según el sistema de clasificación de Köppen-Geiger (Beck *et al.* 2018), con un suelo rojo profundo, en posición de media loma. No se observaron efectos de heladas ni problemas sanitarios durante su desarrollo.

Tabla 1: Clones seleccionados.

Clones	Nomenclatura	Taxón	Genética	n	dap (cm)
1	EG INTA 157	<i>Eucalyptus grandis</i>	Puro	3	30,0 (1,0)
2	EG INTA 36	<i>Eucalyptus grandis</i>	Puro	3	38,2 (1,8)
3	GC INTA 24	<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Híbrido	3	30,9 (4,8)
4	GC INTA 27	<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Híbrido	3	37,4 (2,4)
5	GT INTA 31	<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus tereticornis</i>	Híbrido	3	32,2 (1,5)

n: árboles extraídos; *dap*: diámetro medio a la altura de pecho; (): desvío estándar.

Después del apeo, se obtuvieron tres rodajas de cada árbol, ubicadas a alturas de 0,1 m, a 2,8 m y a 5,5 m. Estas rodajas fueron pesadas con una balanza portátil (precisión de 0,01 g) y medidas con una regla milimétrica (dos diámetros ortogonales y cuatro espesores) para determinar su volumen y, de esta manera, calcular la densidad 'verde' (D_v), es decir, con el contenido de humedad (CH_v) del árbol recién apeado. El CH_v se calculó por diferencia de masa entre una muestra verde y la misma secada en estufa ($103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) hasta peso constante.

A partir de cada rodaja se cortó un listón de médula a corteza que fue seccionado en cubos consecutivos cada 2 cm, a partir de los cuales se obtuvo la densidad básica (D_b), tal como se informó en Bulman-Hartkopf *et al.* (2024) y posteriormente se determinaron las características anatómicas. Para analizar su variación en sentido radial, los cubos fueron agrupados en cuatro clases radiales relativas, correspondiendo las primeras tres al área del duramen, del 0 % al 33 % (clase A), 33 % al 66 % (clase B) y del 66 % al 100 % (clase C), mientras las probetas pertenecientes a la albura corresponden a una única clase (clase D).

Módulo de elasticidad dinámico

Luego del apeo y corte de las dos primeras trozas de 2,7 m de longitud (L), se estimó el módulo de elasticidad dinámico por un método no destructivo (MND), basado en la lectura de la frecuencia de resonancia. La medición se llevó a cabo impartiendo un golpe de martillo sobre una cara libre de cada troza y captando la respuesta en el extremo opuesto con un micrófono. La onda acústica que es recibida corresponde a un espectro amplio y complejo de señales que se generan como respuesta de la heterogeneidad de la madera. Esta señal es procesada por medio del software FFT Analyzer (2014, Fakopp Enterprise Bt., Hungría) que determina la frecuencia fundamental de resonancia (f) aplicando el algoritmo de Transformada Rápida de Fourier (Wang 2013). Con el dato de frecuencia f y la longitud L de la troza se calculó la velocidad acústica (V) (Ecuación 1), y por medio de esta, y la densidad verde (D_v) del material, se calculó el módulo de elasticidad dinámico (Ed) (Ecuación 2) de cada troza.

$$V = f2L \quad (1)$$

$$Ed = D_v V^2 \quad (2)$$

Características anatómicas

La evaluación de la anatomía celular se realizó según el criterio de la norma IAWA Committee (1989). El diámetro tangencial (D_{tg}) de los elementos de los vasos o poros y

su frecuencia por unidad de superficie (F) se realizó sobre cortes transversales de 30 μm de espesor, obtenidos con un micrótopo de deslizamiento Heidelberg® (Alemania).

Para la obtención de fibras se utilizó un tratamiento combinado de ácido acético (CH_3COOH , Cicarelli®) y clorito de sodio (NaClO_2 , Cicarelli®) según el procedimiento informado por Núñez (2014).

Sobre las fibras extraídas se midió su longitud (L_f), el espesor de pared celular (E_p) (definido como la mitad de la diferencia entre el ancho total de la fibra y el ancho del lumen), la proporción de pared celular (P_c) (definido como la diferencia entre el ancho de fibra y el ancho del lumen, dividido por el ancho de fibra), y el ángulo de microfibrilla (AMF). El AMF se midió indirectamente, considerando la orientación de la abertura de las puntuaciones simples, las cuales presentan una característica apariencia lenticular (Donaldson 2008). El AMF se determinó como el ángulo formado entre el eje mayor de la abertura de la puntuación y el eje longitudinal de la célula, según el procedimiento descrito por Yin *et al.* (2011). Este enfoque supone que el ángulo de las microfibrillas coincide con la orientación del eje mayor de la abertura de la puntuación (Donaldson 2008, Yin *et al.* 2011).

Todas las muestras fueron montadas sobre un portaobjetos de forma temporal y teñidas con safranina al 1 %. Las observaciones fueron llevadas a cabo en un microscopio Eclipse LV100 Nikon® (Japón) con una cámara digital DS-Fi2-U3 Nikon® (Japón), las mediciones se realizaron con el software NIS Elements (2013, versión 4.13.00 64-bit, Nikon®, Japón).

Análisis estadístico

El análisis de los datos se llevó a cabo con el programa estadístico InfoStat/Profesional (InfoStat: statistical software 2020). Los valores medios y los estadísticos de la dispersión fueron obtenidos por análisis de la variancia, mientras que la comparación de promedios se realizó con la prueba DGC (Di Rienzo *et al.* 2002). Las variables que no cumplieran con los supuestos de normalidad y homogeneidad de variancia se analizaron por análisis de la variancia no paramétrica de Kruskal y Wallis, que permite comparar las esperanzas de dos o más distribuciones sin necesidad de que se cumplan los supuestos ya mencionados (Ramírez-Ríos y Polack-Peña 2020).

El grado de asociación entre las variables anatómicas con la densidad básica y la velocidad del sonido se estimó con el análisis de correlación lineal de Pearson.

A partir de los resultados obtenidos se seleccionó a aquellas características celulares que resultaron significativas para predecir las propiedades dinámicas, y se realizó un análisis de regresión. La bondad de ajuste de los modelos de regresión se comprobó con el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}). La importancia que genera el aporte de las pendientes de cada una de las variables aceptadas se midió por medio del error estándar (E.E) y el p -valor. Todo el análisis se realizó con un nivel de significancia del 5 %.

Resultados y discusión

Todas las variables anatómicas presentaron distribución normal y homogeneidad de varianza, excepto la variable frecuencia de poros (F), que se analizó por estadística no paramétrica.

Caracterización anatómica

En la Figura 1 se muestran los valores del promedio ponderado del diámetro tangencial de poros (Dtg) y su frecuencia por unidad de superficie (F), y la comparación de medias entre clones y entre trozas.

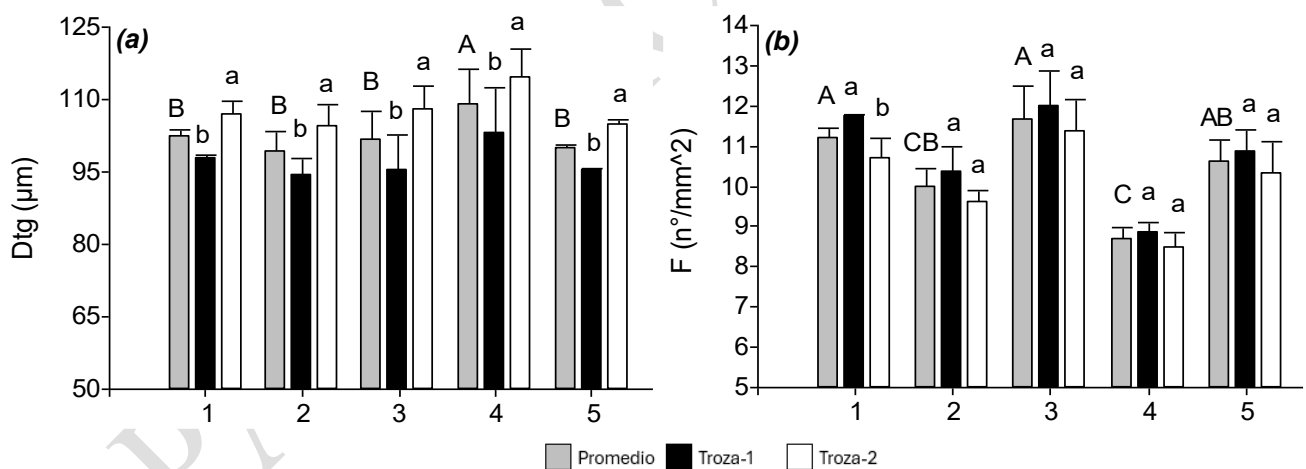


Figura 1: Promedio ponderado por clon; (a): Diámetro tangencial de poros (Dtg); (b): Frecuencia de poros (F); letras distintas indican diferencia significativa ($p \leq 0,05$); mayúsculas: comparación entre clones; minúsculas: comparación entre trozas del mismo clon; dispersión: desvío estándar.

Por un lado, no se observaron diferencias significativas entre clones para la variable Dtg , con excepción del clon 4, que presentó el valor medio más alto. En cambio, la variable F sí mostró diferencias entre clones, pudiéndose identificar cuatro grupos estadísticos,

donde los clones 1 y 3 presentaron valores medios similares entre sí y superiores a los de los demás materiales genéticos. Monterubbianesi (2020) analizó los mismos clones 2, 3 y 4 a la edad de 2 años, obtenidos de una repetición de este ensayo, ubicado en Concordia, Entre Ríos, Argentina. El mismo observó que la frecuencia de los clones 2 y 4 fueron estadísticamente iguales entre sí y con valores menores que los del clon 3, siguiendo una tendencia similar a la observada en la Figura 1b. A su vez, Savero *et al.* (2023) encontraron diferencias significativas en la frecuencia de poros, pero no en el diámetro de estos, entre diferentes especies con porosidad difusa.

En cuanto a la diferencia de medias entre la 1° y 2° troza, la variable *Dtg* mostró diferencia estadística ($p \leq 0,05$), con un aumento significativo del diámetro de vasos en la segunda troza para todos los clones. En cambio, *F* no presentó diferencias entre trozas, excepto en el clon 1 donde la tendencia fue decreciente con la altura. Los resultados que se encontraron del promedio de *Dtg*, de estos clones fue menor a los hallados por Ramos *et al.* (2011) (130,2 μm) y Palermo *et al.* (2015) (133,1 μm) en rose gum (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden) de 23 años, así como los de Sánchez Acosta (2012) (155,2 μm) en un híbrido rose gum (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden) x blue gum (*Eucalyptus tereticornis* Sm.) INTA de 6 años. En resumen, las diferencias en los resultados en parte pueden atribuirse a la edad del árbol, su distanciamiento y el sitio.

En la Figura 2 se muestran los promedios ponderados de las variables anatómicas de las fibras.

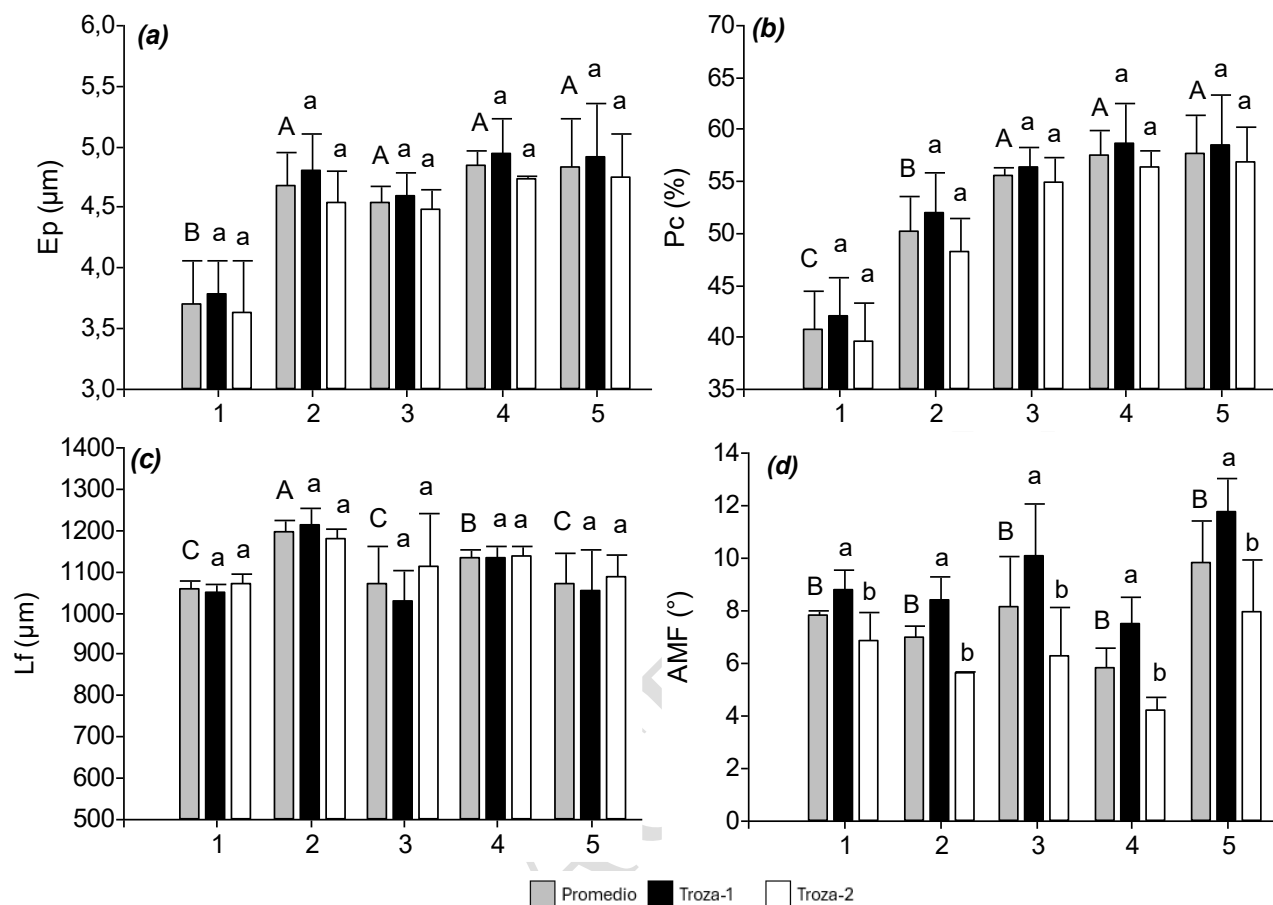


Figura 2: Promedio ponderado por clon; (a): Espesor de pared (*Ep*); (b): Proporción de pared (*Pc*); (c): Longitud de fibra (*Lf*); (d): Angulo microfibrilar (*AMF*); letras distintas indican diferencia significativa ($p \leq 0,05$); mayúsculas: comparación entre clones; minúsculas: comparación entre trozas del mismo clon; dispersión: desvío estándar

El *Ep* y *Pc* respectivamente (Figura 2a y Figura 2b), muestran similar tendencia entre clones, por ser variables relacionadas a la pared celular. En ambas variables, el clon 1 arrojó los menores valores medios.

En cuanto a la longitud de fibras *Lf* (Figura 2c), el clon 2 presentó mayores valores medios, seguido por el clon 4, mientras que entre los clones 1, 3 y 5, la *Lf* media fue similar, aunque se observó una mayor dispersión de la *Lf* para el clon 3. Los promedios del *AMF* (Figura 2d) fueron estadísticamente iguales entre clones, con excepción del material híbrido 5, que alcanzó los mayores valores. La variación entre trozas depende de

la variable anatómica que se esté analizando, en general no hubo diferencia estadística ($p \leq 0,05$), excepto para los casos del diámetro de poros (*Dtg*) (Figura 1a) y el ángulo microfibrilar (*AMF*) (Figura 2d), que mostraron aumento y disminución respectivamente, desde la troza 1 hacia la troza 2. El mismo patrón de disminución del ángulo microfibrilar (*AMF*) con la altura de fuste también fue observado por Wessels *et al.* (2016) para rose gum (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden) x river red gum (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) Por otro lado, el valor promedio de *Ep* del clon 1 (puro de rose gum (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden)) concuerda con lo descrito por Palermo *et al.* (2015), para la especie rose gum (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden) ($3,7 \mu\text{m}$), además los valores que hallaron de *Pc* (48,7 %) son similares a la media obtenida para el clon 2 (puro de rose gum (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden)). En cuanto a *Lf*, los mismos autores observaron un valor medio de $1061 \mu\text{m}$, igual al hallado en el clon 4, pero superior a los otros materiales genéticos (1, 3 y 5). Leonello *et al.* (2008) observó un valor medio de *Lf* en rose gum (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden) de 28 años ($1053 \mu\text{m}$) similar a la media del clon 2 aunque con mayor variación entre mínimo y máximo. A su vez, Veenin *et al.* (2005) reportaron para la *Lf*, valores medios de $876 \mu\text{m}$ en clones de river red gum (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) de 5 años y $880 \mu\text{m}$ en árboles de semilla de la misma especie a los 9 años. Estos promedios, aunque inferiores, concuerdan con los obtenidos para los híbridos 3 y 4 (rose gum (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden) x river red gum (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.)), No se encontraron otros antecedentes bibliográficos que describan la variación de *Pc* para las especies river red gum (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) y blue gum (*Eucalyptus tereticornis* Sm.).

Se ha informado que el *AMF* en especies de latifoliadas, varía en forma general de 20° a 5° de médula a corteza (Liu *et al.* 2020). Los resultados medios obtenidos en este estudio

son inferiores al descrito por Ferreira *et al.* (2018), de 10,5° a 11,1° para diferentes genotipos de ampupu (*Eucalyptus urophylla* S.T.Blake), así como los encontrados por Wessels *et al.* (2016), quienes midieron 15,7° en un híbrido de rose gum (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden) x river red gum (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.), donde también se reportó una marcada disminución con la altura.

La evolución en sentido radial de la anatomía se observa en la Tabla 2, dónde se comparan los valores medios por clase radial. El límite entre la madera juvenil y madura no es visible a simple vista, y está definido por el grado de madurez que presentan las células del xilema. Según Tsuchiya y Furukawa (2009) la característica que mejor predice el punto de inflexión es el diámetro de los poros.

Tabla 2: Variación radial de las características anatómicas por clon.

Clon	Variable	Clase radial							
		A		B		C		D	
1	<i>Dtg</i> (μm)	65,5 a	(15,5)	91,3 b	(14,5)	103,6 c	(13,1)	106,9 c	(8,2)
	<i>F</i> ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$)	18,8 c	(5,4)	12,8 b	(2,5)	11,1 a	(2,4)	10,6 a	(1,5)
	<i>Ep</i> (μm)	3,3 a	(0,7)	3,4 a	(1,0)	3,3 a	(0,9)	4,1 b	(1,2)
	<i>Pc</i> (%)	42,1 b	(8,5)	40,9 b	(10,3)	36,7 a	(8,4)	43,4 c	(11,4)
	<i>Lf</i> (μm)	789 a	(81)	881 b	(104)	1057 c	(129)	1145 d	(117)
	<i>AMF</i> ($^\circ$)	17,8 d	(5,4)	14,0 c	(5,3)	7,9 b	(4,7)	4,5 a	(2,7)
2	<i>Dtg</i> (μm)	62,3 a	(10,3)	85,5 b	(13,5)	101,7 c	(15,4)	101,8 c	(11,6)
	<i>F</i> ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$)	16,7 c	(4,4)	11,8 b	(2,5)	9,5 a	(1,6)	9,2 a	(1,3)
	<i>Ep</i> (μm)	3,9 a	(0,9)	4,1 b	(1,0)	4,6 c	(1,1)	5,1 d	(1,1)
	<i>Pc</i> (%)	45,4 a	(9,4)	47,1 b	(10,3)	48,1 b	(9,3)	54,5 c	(10,2)
	<i>Lf</i> (μm)	874 a	(112)	1050 b	(153)	1221 c	(144)	1284 d	(149)
	<i>AMF</i> ($^\circ$)	14,5 d	(4,8)	10,4 c	(4,4)	6,9 b	(4,0)	6,0 a	(4,1)
3	<i>Dtg</i> (μm)	57,5 a	(12,1)	82,4 b	(13,3)	99,7 c	(13,1)	112,0 d	(14,7)
	<i>F</i> ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$)	22,2 d	(6,9)	14,8 c	(2,6)	11,7 b	(2,0)	10,2 a	(1,3)
	<i>Ep</i> (μm)	3,6 a	(0,8)	4,0 b	(0,9)	4,3 c	(0,9)	5,0 d	(1,0)
	<i>Pc</i> (%)	47,9 a	(8,9)	51,4 b	(9,8)	52,7 b	(9,2)	61,5 c	(10,6)
	<i>Lf</i> (μm)	778 a	(114)	910 b	(158)	1041 c	(164)	1142 d	(182)
	<i>AMF</i> ($^\circ$)	16,2 d	(6,7)	13,3 c	(5,6)	8,7 b	(4,1)	7,3 a	(4,9)
4	<i>Dtg</i> (μm)	67,2 a	(11,8)	93,0 b	(12,7)	106,7 c	(16,7)	114,5 c	(19,0)
	<i>F</i> ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$)	15,5 c	(4,0)	10,3 b	(2,0)	8,3 a	(1,3)	8,2 a	(1,4)
	<i>Ep</i> (μm)	3,8 a	(0,9)	4,1 b	(1,0)	4,7 c	(1,1)	5,3 d	(1,1)
	<i>Pc</i> (%)	47,4 a	(9,6)	49,2 b	(8,9)	55,7 c	(11,4)	63,6 d	(11,3)
	<i>Lf</i> (μm)	861 a	(147)	996 b	(115)	1141 c	(120)	1198 d	(116)
	<i>AMF</i> ($^\circ$)	14,1 d	(5,7)	9,4 c	(4,7)	6,6 b	(4,3)	5,0 a	(3,4)
5	<i>Dtg</i> (μm)	70,3 a	(11,5)	87,2 b	(15,5)	98,5 c	(14,3)	103,9 c	(11,3)
	<i>F</i> ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$)	15,3 c	(2,6)	12,7 b	(2,2)	10,7 a	(2,0)	9,7 a	(1,5)
	<i>Ep</i> (μm)	3,9 a	(0,9)	4,3 b	(0,8)	4,5 c	(1,3)	5,3 d	(1,4)
	<i>Pc</i> (%)	48,5 a	(10,2)	51,1 b	(8,7)	54,5 c	(13,1)	63,2 d	(10,9)
	<i>Lf</i> (μm)	793 a	(118)	915 b	(158)	1039 c	(158)	1137 d	(152)
	<i>AMF</i> ($^\circ$)	18,3 d	(6,1)	16,5 c	(6,4)	12,0 b	(6,0)	7,2 a	(4,0)

A, B, C y D: clases radiales de médula a corteza; ($^\circ$): desvío estándar; letras diferentes indican diferencia significativa al entre clases radiales para el mismo clon ($p \leq 0,05$); *Dtg*: diámetro tangencial de poros; *F*: frecuencia de poros; *Ep*: espesor de pared celular; *Pc*: proporción de pared celular; *Lf*: longitud de fibra; *AMF*: ángulo microfibrilar.

En el sentido radial se puede observar un patrón creciente del *Dtg* y decreciente de *F*, para todos los clones. Este comportamiento biológico se debe al ajuste del suministro de agua en función de la demanda de la creciente superficie foliar (Zhao 2015, Andrade-Bueno *et al.* 2020). Se observó que no existe diferencias significativas para *F* y *Dtg* entre las últimas posiciones radiales C y D, excepto para el clon 3. Esto sugiere, en general,

una estabilización de estas características anatómicas en sentido radial y por lo tanto la presencia de madera madura (Duong *et al.* 2021).

En cuanto a las características de las fibras, existió en todos los casos diferencias estadísticas significativas entre las últimas dos clases radiales, por lo que en base a estas variables no se puede afirmar que estemos en presencia de madera madura. Otros autores determinaron diferentes edades de transición de madera juvenil a madura a partir de distintas características anatómicas (Ramos *et al.* 2011, Cobas *et al.* 2014, Souza *et al.* 2017).

Al observar las variables Ep y Pc notamos que existe una tendencia creciente en sentido radial. Excepto para el clon 1, el cual muestra inicialmente un decrecimiento y un posterior aumento de estas variables hacia la albura, dicha tendencia se corresponde con la variación transversal de la densidad básica observada en Bulman-Hartkopf *et al.* (2024).

Por otro lado, las variables Lf y AMF , también mostraron un comportamiento esperable creciente y decreciente, respectivamente.

Relación entre la densidad y las características anatómicas.

La densidad de la madera se puede interpretar como una medida global de la anatomía interna. Esta no se correlaciona simplemente con el espesor de la pared secundaria de fibras, ya que tiene en cuenta el volumen de poros y de parénquima que reducen los valores de densidad (Monteoliva *et al.* 2017).

Para determinar la relación entre la *Db* (informado por Bulman-Hartkopf 2024) y las variables anatómicas se analizó la correlación por la prueba de Pearson (Tabla 3), a partir de los valores medios para cada muestra.

Tabla 3: Coeficientes de correlación (*r*) entre las variables anatómicas y la densidad básica.

Clon	<i>Ep;Db</i>	<i>Pc;Db</i>	<i>Lf;Db</i>	<i>AMF;Db</i>	<i>Dtg;Db</i>	<i>F;Db</i>
1	0,25ns	0,34*	0,04ns	0,07ns	-0,33*	0,22ns
2	0,55**	0,65**	0,64**	-0,21ns	0,20ns	-0,40**
3	0,48**	0,61**	0,16ns	-0,13ns	0,29ns	-0,52**
4	0,75**	0,79**	0,79**	-0,50**	0,61**	-0,63**
5	0,63**	0,69**	0,65**	-0,58**	0,44**	-0,51**

** : significativo $p \leq 0,01$; * : significativo $p \leq 0,05$; ns: no significativo ($p > 0,05$); *Dtg*: diámetro tangencial de poros; *F*: frecuencia de poros; *Ep*: espesor de pared celular; *Pc*: proporción de pared celular; *Lf*: longitud de fibra; *AMF*: ángulo microfibrilar; *Db*: densidad básica.

Se observó que las variables de la pared celular (*Ep* y *Pc*) fueron buenos indicadores de la densidad básica (*Db*), con una correlación alta y positiva para todos los clones, a excepción del clon 1, que no fue significativa para el *Ep*. Otros autores también determinaron correlaciones elevadas entre estas variables (Evans *et al.* 2000, Melo *et al.* 2016, Talgatti *et al.* 2020, Marini *et al.* 2022).

Pc presentó mayor influencia sobre *Db*, y resultó ser la única variable de significancia para todos los clones. Por otro lado, se observó que *Lf* posee una fuerte correlación con *Db*, excepto para los clones 1 y 3. Thomas *et al.* (2007) indicaron que el espesor de pared de las fibras, su diámetro externo e interno y la proporción de área ocupada por vasos explicaron en conjunto, hasta el 76 % de la variación de la densidad de la especie rose gum (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden). Duong *et al.* (2017), Duong *et al.* (2021) también señalaron, que a mayor longitud de fibra aumenta la sección transversal y el espesor de la pared celular, lo que se traduce en mayor densidad. Sin embargo, esta

tendencia no fue observada para el clon 3 ($Lf; Db$ $r = 0,16ns$), posiblemente debido a la amplia dispersión de Lf (Figura 2c)

La relación entre el ángulo microfibrilar (AMF) y la densidad es variable. El AMF , presentó una correlación significativa y negativa con la Db solo en los clones 4 y 5 mientras que para los otros clones no fue significativa. Hein *et al.* (2013) hallaron un coeficiente de determinación (R^2) también bajo (0,16) entre estas variables para el híbrido Urograndis (ampupu (*Eucalyptus urophylla* S.T.Blake) x rose gum (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden)). Sin embargo, Evans *et al.* (2000) concluyeron que existe una fuerte y negativa correlación entre la densidad y el AMF durante los primeros años en shining gum (*Eucalyptus nitens* (H.Deane & Maiden) Maiden) cuya tendencia se pierde con el crecimiento diamétrico provocando la independencia de estas variables. Por otro lado, Yang y Evans (2003) hallaron un R^2 de 0,35 entre densidad estacionada y AMF para el conjunto de datos de blue gum (*Eucalyptus globulus* Labill.), shining gum (*Eucalyptus nitens* (H.Deane & Maiden) Maiden) y mountain ash (*Eucalyptus regnans* F.Muell.)

A su vez, en la revisión bibliográfica de Donaldson (2008) se informaron estudios sobre diferentes especies latifoliadas con fuerte correlación entre el ángulo microfibrilar y la densidad, y otros donde la correlación fue nula o pobre como en shining gum (*Eucalyptus nitens* (H.Deane & Maiden) Maiden). Cabe destacar que, aquellos estudios realizados en especies coníferas (loblolly pine (*Pinus taeda* Carl Linnaeus) y radiate pine (*Pinus radiata* D. Don)) mostraron correlaciones fuertes la mayoría de las veces (Donaldson 2008). Esta relación variable entre la densidad y AMF para las distintas especies, puede deberse a las diferencias de la conformación anatómica de estos 2 grupos taxonómicos, coníferas (leño más homogéneo) y latifoliadas (leño heterogéneo).

Por otro lado, Melo *et al.* (2018) obtuvieron valores altos de regresión y correlación en tallowwood (*Eucalyptus microcorys* F.Muell.) al explicar la variación del *AMF* a partir de la *Db* y *Lf*.

Entre las variables que describen la porosidad (*Dtg* y *F*) podemos observar que *Dtg* representa la variación de la *Db* de forma significativa solo para los clones de mayor densidad (4 y 5), y en menor medida para el clon 1, mientras que *F* es significativa para todos los materiales genéticos, excepto para el clon 1. Lundqvist *et al.* (2017) hallaron que un híbrido rose gum (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden) x river red gum (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) fue el de mayor volumen, pero menor densidad, debido a la alta fracción de poros, comparado con otros genotipos de *Eucalyptus* spp.

Por otro lado, Marini *et al.* (2022), establecieron que existe una fuerte correlación entre las variables densidad en asociación con la longitud de fibra y el espesor de pared para predecir la resistencia y la rigidez de la madera en diferentes especies de *Eucalyptus* spp. También observaron gran influencia de la altura y ancho de los radios parenquimáticos sobre la densidad y las propiedades mecánicas.

Módulo de elasticidad dinámico

La velocidad acústica determinada para cada troza expresa una gran cantidad de señales que están en función de la proporción de madera juvenil-madura, defectos como nudos, grietas internas y la variación de la anatomía celular. En la Tabla 4 se presentan los

resultados de las propiedades físicas y dinámicas de las trozas, incluyendo el módulo de elasticidad dinámico obtenido a partir del método no destructivo (MND) por resonancia.

Tabla 4: Evaluación no destructiva de las características físicas y dinámicas de las trozas, valores del promedio ponderado por clon.

Clon	Troza 1				Troza 2			
	CHv (%)	Dv (kg/m ³)	V (m/s)	Ed (Gpa)	CHv (%)	Dv (kg/m ³)	V (m/s)	Ed (Gp)
1	147,3 a	949 a	3129 a	9,3 a	142,5 a	868 b	3424 a	10,2 a
2	109,5 b	1034 a	3530 b	12,9 c	118,6 b	1017 a	3734 b	14,2 b
3	92,5 c	1004 a	3376 b	11,5 b	88,3 c	952 a	3695 b	13,1 b
4	80,1 c	1012 a	3519 b	12,5 c	81,8 c	1003 a	3782 b	14,4 b
5	77,1 c	987 a	3309 b	10,8 b	77,0 c	979 a	3574 a	12,5 b

CHv: Contenido de humedad verde; Dv: Densidad verde; V: Velocidad del sonido; Ed: módulo de elasticidad dinámico. Letras iguales indican similitud estadística ($p > 0,05$).

Los resultados muestran un claro aumento de V y Ed con la altura, asociado a las diferencias en las características anatómicas (Figura 1 y Figura 2) entre las trozas 1 y 2. Un aumento de V con la posición de la troza también fue observado por Omonte y Valenzuela-Hurtado (2020) para *Eucalyptus nitens* (H.Deane & Maiden) Maiden. Por otro lado, se puede notar para la troza 1, que los clones 2 y 4 se destacan por presentar los más altos y estadísticamente iguales valores de Ed . En cambio, en la troza 2 no se observó diferencia estadística de Ed entre los clones 2, 3, 4 y 5, diferenciándose estos del clon 1, que presentó un valor menor de Ed y V .

La diferencia estadística del clon puro 1 respecto de los clones 2, 3 y 4 también fue reportada por López *et al.* (2018) en muestras de los mismos clones obtenidas de diferentes sitios y edades de la Mesopotamia Argentina (14 años en Entre Ríos y 7 años en Misiones), al analizar el módulo dinámico en Tablas con y sin presencia de médula. López *et al.* (2018) también informó que el clon híbrido 4 resultó ser el de mayor módulo y estadísticamente igual al clon 2 en el ensayo de Entre Ríos, pero no así en el ensayo de Misiones donde el clon puro 2 presentó valores del módulo dinámico intermedios entre

el puro 1 y el híbrido 3, contrariamente a lo observado en este trabajo donde el clon puro 2 presentó valores de modulo dinámico más altos que los clones puro 1 e híbrido 3. Este resultado podría estar asociada a la diferente edad entre las muestras evaluadas en cada ensayo.

Los programas de mejoramiento genético aprovechan la gran variabilidad en la expresión de genes de la progenie para seleccionar aquellos individuos que presentan las características deseadas por el programa. El objetivo del INTA en el desarrollo de estos clones de *Eucalyptus* fue la expresión de los genes que manifiestan principalmente resistencia a bajas temperaturas, rectitud de fuste y crecimiento diamétrico, entre otros, no así la mejora a nivel celular o mecánico. Debido a esto, puede suceder que la hibridación no necesariamente produzca progenies con propiedades mecánicas y anatómicas iguales. Por ejemplo, Arunkumar y Chauhan (2020) seleccionaron 26 de 52 genotipos de large-fruited red mahogany (*Eucalyptus pellita* F.Muell.) con características superiores en densidad y rigidez por un MND. Por otro lado, Muneera-Parveen *et al.* (2021) compararon la variabilidad de diferentes características entre clones híbridos de river red gum (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) x blue gum (*Eucalyptus tereticornis* Sm.) notando que la variación entre progenies es más dispersa en la expresión del módulo dinámico que en la velocidad del sonido.

Relación entre las variables dinámicas y las características anatómicas de la madera.

En la Tabla 5 se presentan los resultados del análisis de correlación entre las variables anatómicas y la velocidad del sonido.

Tabla 5: Coeficientes de correlación (r) entre las variables anatómicas y la velocidad del sonido

Clon	$Ep;V$	$Pc;V$	$Lf;V$	$AMF;V$	$Dtg;V$	$F;V$
1	-0,20ns	-0,21ns	0,60**	-0,80**	0,90**	-0,87**
2	0,01ns	0,14ns	-0,15ns	-0,72**	0,24ns	-0,35ns
3	0,09ns	-0,56*	0,89**	-0,95**	0,82**	-0,18ns
4	-0,65**	-0,67**	-0,19ns	-0,94**	0,88**	-0,23ns
5	-0,12ns	-0,21ns	0,41ns	-0,92**	0,88**	-0,33ns

** : significativo con $p \leq 0,01$; * : significativo con $p \leq 0,05$; ns: no significativo ($p > 0,05$); Dtg : diámetro tangencial de poros; F : frecuencia de poros; Ep : espesor de pared celular; Pc : proporción de pared celular; Lf : longitud de fibra; AMF : ángulo microfibrilar; V : velocidad del sonido por resonancia.

La velocidad acústica mostró una correlación inversa y altamente significativa con el AMF resultando para este estudio, un excelente indicador de la calidad estructural de la madera, coincidiendo con lo expresado por Chauhan y Walker (2006) y Monteoliva *et al.* (2017). El diámetro tangencial de poros (Dtg) también resulta ser un indicador significativo excepto para el clon 2. Por otro lado, la frecuencia de poros (F) solo es significativa en el clon 1. Mientras que la longitud de fibra (Lf) muestra correlación con los clones 1 y 3.

A pesar de que la densidad está fuertemente relacionada con las variables de la pared celular (Ep y Pc), estas no presentan significancia estadística con la velocidad acústica, excepto el clon 4 y en menor medida el Pc con el clon 3, incluso con tendencias negativas en la mayoría de los casos. Debemos considerar que la densidad es la cantidad de materia en un determinado volumen, y en el caso de la madera, un volumen heterogéneo, donde interactúan diferentes tipos celulares con proporción y distribución variable, según la especie. Chauhan y Sethy (2016) y Hassan *et al.* (2013) hallaron que la velocidad acústica por el método de resonancia y de árboles en pie mostró una correlación no significativa e

incluso negativa con la densidad de la madera, a pesar de que ésta es buen predictor del módulo estático. A su vez, Muneera-Parveen *et al.* (2021) determinaron, para híbridos river red gum (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) \times blue gum (*Eucalyptus tereticornis* Sm.) valores de correlación entre la velocidad acústica y la densidad de -0,12 y -0,68 en dos sitios diferentes. Esto indicaría que densidad y la velocidad son parámetros independientes.

En la Figura 3 se puede observar el grado de asociación entre V y AMF , con su respectiva línea de tendencia. Se observó que el clon 1 (EG INTA 157) presentó un agrupamiento de datos distinto del resto de los materiales, por lo que se optó analizar también la exclusión de este clon del conjunto de datos.

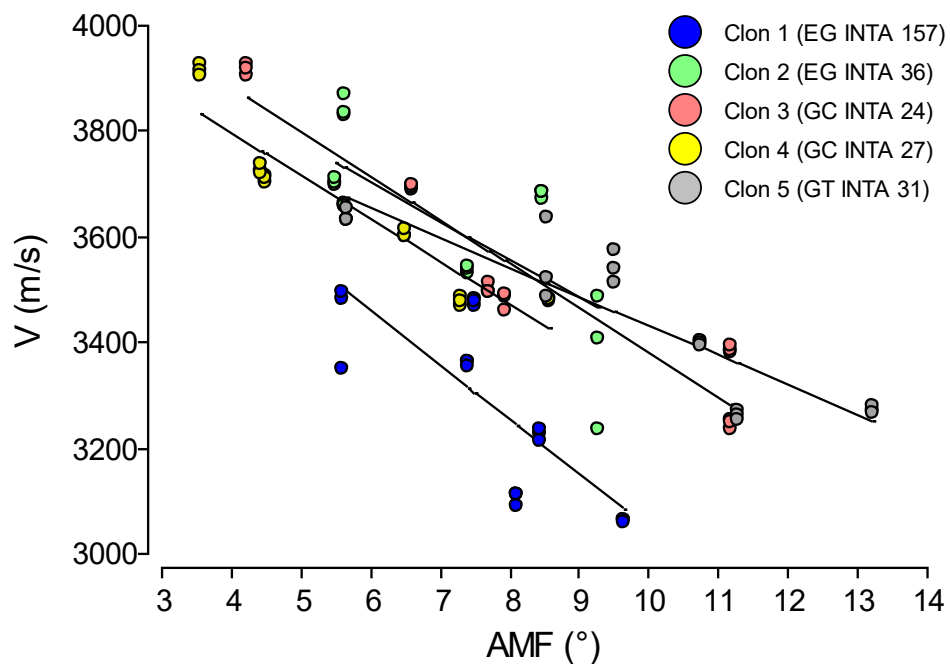


Figura 3: Correlación entre la velocidad del sonido (V) y el ángulo microfibrilar (AMF).

A partir de estos resultados se llevó a cabo un análisis de regresión (Tabla 6). Donde se analizó la variación del módulo de elasticidad dinámico (Ed) a partir de la densidad verde (Dv) y el ángulo microfibrilar (AMF).

Tabla 6: Ajustes del módulo dinámico en función del ángulo microfibrilar y la densidad.

Dependiente	Variable	Coefficiente	E.E.	p -valor	R^2 aj
Ed (Gpa)	Constante	-1,84	1,69	0,2803	0,73
	AMF (°)	-0,50	0,04	<0,0001	
	Dv (kg/m ³)	0,018	1,71	<0,0001	
Ed^* (Gpa)	Constante	4,61	1,98	0,0226	0,82
	AMF (°)	-0,47	0,03	<0,0001	
	Dv (kg/m ³)	0,012	1,96	<0,0001	

Ed : módulo dinámico incluyendo todos los clones; Ed^* : módulo dinámico excluyendo al clon 1 EG INTA 157; E.E.: error estándar; p -valor: significancia estadística (< 0,05 significativo al 95% de confianza); R^2 aj: coeficiente de determinación ajustado.

Los resultados del análisis de regresión resultaron ser más precisos al excluir los datos del clon 1 del conjunto. De esta manera no solo el coeficiente de determinación (R^2 aj) aumenta, sino que la ordenada al origen adquiere un valor de significancia estadística.

El resultado de los valores anatómicos a nivel celular, son el resultado de la manifestación genética adoptada de sus respectivos parentales a través de un cruzamiento controlado. Por esta razón los valores medios de los clones puros no son necesariamente similares. En esta oportunidad el clon 1 se destacó por presentar un fenotipo estadísticamente diferente a los otros clones, aunque no necesariamente deficiente.

El ángulo microfibrilar resultó ser una variable de importancia como indicador de las propiedades mecánico-dinámicas de la madera (McLean *et al.* 2010), por estar fuertemente relacionado a la velocidad del sonido. Por lo tanto, el conocimiento de los valores de AMF y la Dv , que podrían ser obtenidos con ayuda de un barreno, nos permitiría, a priori, predecir el módulo de elasticidad dinámico en trozas sin la necesidad de medir la velocidad acústica.

Conclusiones

Las variables de los poros (diámetro tangencial y frecuencia de poros) estarían indicando la presencia de madera madura en todos los clones, sin embargo, no se manifestó para las demás variables anatómicas. En este sentido, se observó una variación anatómica consistente tanto entre clones como dentro del fuste, particularmente en las características asociadas a la porosidad y a la morfología de las fibras, lo que pone de manifiesto la influencia conjunta del material genético y de la posición axial y radial sobre la estructura del leño.

La proporción de pared celular de fibras y la frecuencia de poros son las variables anatómicas que mayor influencia tienen sobre la variación de la densidad de la madera. Estas variables permitieron interpretar de manera más precisa las diferencias de densidad observadas entre materiales genéticos, superando el uso de indicadores físicos globales como único criterio de evaluación.

La velocidad del sonido mostró para todos los clones una fuerte relación con el ángulo microfibrilar, pudiendo ser utilizado como un buen predictor de esta variable anatómica que es de lenta y de difícil determinación. Esta relación confirma la influencia del ángulo microfibrilar en el control de la respuesta dinámico-elástica de la madera.

Es posible realizar estimaciones del módulo de elasticidad dinámico en trozas a partir del promedio del ángulo microfibrilar y su densidad aparente verde. Desde una perspectiva aplicada, estos resultados refuerzan la utilidad de integrar el análisis anatómico con

métodos no destructivos basados en resonancia acústica, aportando criterios prácticos para la evaluación estructural de trozas y la selección de clones de *Eucalyptus* con aptitud para usos estructurales.

Declaración de autorías

C.B-H.: investigación, escritura borrador original, redacción: revisión y edición, conceptualización. R.A.W.: redacción: investigación, revisión y edición, conceptualización, adquisición de fondos, supervisión. K.B.P-G.: investigación P.M.S.: conceptualización, investigación, adquisición de fondos, administrador del proyecto, supervisión, redacción: revisión y edición.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (proyectos 2019-PE-E7- I 148-001, Procesos y tecnologías sostenibles para el agregado de valor en las cadenas y regiones), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) (PIP 11220200100926CO), Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) (PICT 2020-1003) y Universidad Nacional de Mar del Plata (PDTS 2024 UNMdP) por el financiamiento recibido. Los autores agradecen especialmente al propietario del terreno Sr. Ricardo Schesani; a los Ing. Javier Oberschelp y Leonel Harrand de EEA-INTA Concordia quienes instalaron el ensayo y a Diego R. Aquino, técnico de EEA-INTA Montecarlo, por el apoyo en las actividades de campo.

Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés personal, vinculados al presente trabajo

Referencias:

- Aiso-Sanada, H.; Ishiguri, F.; Diloksumpun, S.; Nezu, I.; Tanabe, J.; Ohshima, J.; Yokota, S. 2019.** Effects of thinning on anatomical characteristics and wood properties of 12-year-old *Eucalyptus camaldulensis* trees planted in Thailand. *Tropics* 28(3): 67-73. <https://doi.org/10.3759/tropics.MS19-04>
- Andrade-Bueno, I.G.; de Toledo-Picoli, E.A.; dos Santos-Isaias, R.M.; Barbosa Lopes-Mattos, K.L.; Cruz, C.D.; Kuki, K.N.; Valverde-Zauza, E.A. 2020.** Wood anatomy of field grown eucalypt genotypes exhibiting differential dieback and water deficit tolerance. *Current Plant Biology* 22. e100136. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2020.100136>
- Arun Kumar, A.N.; Chauhan, S.S. 2020.** Non-destructive selection of genotypes with better wood properties from morphologically superior genotypes of *Eucalyptus pellita*. *Current Science* 118(12): 1953-1958. <https://www.jstor.org/stable/27226474>
- Baar, J.; Tippner, J.; Rademacher, P. 2015.** Prediction of mechanical properties-modulus of rupture and modulus of elasticity-of five tropical species by nondestructive methods. *Maderas. Ciencia y tecnología* 17(2): 239-252. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000023>
- Baradit, E.; Niemz, P.; Fernández-Pérez, A. 2013.** Propiedades físico-mecánicas de algunas maderas nativas chilenas coníferas y latifoliadas por ultrasonido. *Maderas. Ciencia y tecnología* 15(2): 235-244. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2013005000019>
- Beck, H.E.; Zimmermann, N.E.; McVicar, T.R.; Vergopolan, N.; Berg, A.; Wood, E.F. 2018.** Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data* 5. e180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Borůvka, V.; Novák, D.; Šedivka, P. 2020.** Comparison and analysis of radial and tangential bending of softwood and hardwood at static and dynamic loading. *Forests* 11. e896. <https://doi.org/10.3390/f11080896>
- Bulman-Hartkopf, C.; Winck, R.A.; Aquino, D.R.; Fassola, H.E.; Stefani, P.M. 2024.** Densidad y proporción de albura y duramen en nuevos clones de *Eucalyptus* spp. *Maderas. Ciencia y tecnología* 26. e24. <https://doi.org/10.22320/s0718221x/2024.24>
- Cave, I.D.; Walker, J.C.F. 1994.** Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods: the influence of microfibril angle. *Forest Products Journal* 44(5): 43-48. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=4086010>
- Chauhan, S.; Sethy, A. 2016.** Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity. *Maderas. Ciencia y tecnología* 18(2): 373-382. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000034>
- Chauhan, S.S.; Walker, J.C.F. 2006.** Variations in acoustic velocity and density with age, and their interrelationships in radiata pine. *Forest Ecology and Management* 229(1-3): 388-394. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.04.019>
- Cobas, A.C.; Area, M.C.; Monteoliva, S. 2014.** Patterns of variation of wood density and cellular morphometry in *Salix babylonica* for determining the age of transition between juvenile and mature wood. *Maderas. Ciencia y tecnología* 16(3): 343-354. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000027>
- Cobas, A.C.; Monteoliva, S. 2018.** Modelos descriptivos de distribución de madera juvenil y madura en *Robinia pseudoacacia*. *Maderas. Ciencia y tecnología* 20(2): 287-296. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005021201>

Cremonez, V.G.; Bonfatti, E.A.; Andrade, A.S.D.; Silva, E.L.D.; Klitzke, R.J.; Klock, U. 2019. Wood basic density effect of *Eucalyptus grandis* in the paper making. *Matéria* 24(3). e12420. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190003.0735>

Di Rienzo, J.A.; Guzmán, A.W.; Casanoves, F. 2002. A multiple-comparisons method based on the distribution of the root node distance of a binary tree. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 7(2): 129-142. <https://www.jstor.org/stable/1400690>

Donaldson, L. 2008. Microfibril angle: measurement, variation and relationships-a review. *IAWA Journal* 29(4): 345-386. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000192>

Duong, D.V.; Schimleck, L.; Dinh, T.T.; Tran, C.V. 2021. Radial variation in cell morphology of *Melia azedarach* planted in northern Vietnam. *Maderas. Ciencia y tecnología* 23. e7. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2021000100407>

Duong, D.V.; Missanjo, E.; Matsumura, J. 2017. Variation in intrinsic wood properties of *Melia azedarach* L. planted in northern Vietnam. *Journal of Wood Science* 63: 560-567. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1652-1>

Eufrade-Junior, H.D.J.; Ballarin, A.W.; Villamagua-Vergara, G.C.; Guerra, S.P.S. 2017. Efecto del manejo silvícola sobre la densidad básica de la madera en sistemas forestales de rotación corta. *Maderas. Ciencia y tecnología* 19(3): 285-292. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2017005000024>

Evans, R.; Stringer, S.; Kibblewhite, R.P. 2000. Variation of microfibril angle, density and fibre orientation in twenty-nine *Eucalyptus nitens* trees. *Appita Journal* 53(6): 450-457. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=823023>

Ferreira, C.A.; de Oliveira Ribeiro, A.; Urbinati, C.V.; Mori, F.A. 2018. Biometria das fibras e o ângulo microfibrilar em genótipos de eucalipto. *Scientia Agraria Paranaensis* 17(3): 352-358. <https://saber.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/view/20099>

García, E.A.; Guerra, S.P.S.; Lanças, K.P.; Eufrade-Junior, H.J.; Sansigolo, C.A.; Pereira Lanças, K.; Minoru Yamaji, F. 2016. Componentes químicos da madeira com casca proveniente do sistema florestal de curta rotação. *Revista Árvore* 40(1): 163-171. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000100018>

Hamdan, H.; Nordahlia, A.S.; Anwar, U.M.K.; Mohd Iskandar, M.; Mohamad-Omar, M.K.; Tumirah, K. 2020. Anatomical, physical, and mechanical properties of four pioneer species in Malaysia. *Journal of Wood Science* 66. e59. <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01905-z>

Harrand, L.; Marcó, M.A. 2012. Investigación hacia el desarrollo de materiales genéticos tolerantes al frío. In: XXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Argentina, pp. 7-10. <https://www.jornadasforestales.com.ar/jornadas/2012/514.I.HARRAND.pdf>

Hassan, K.T.S.; Horáček, P.; Tippner, J. 2013. Evaluation of stiffness and strength of Scots pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques. *BioResources* 8(2): 1634-1645. <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.1634-1645>

Hein, P.R.G.; Silva, J.R.M.; Brancheriau, L. 2013. Correlations among microfibril angle, density, modulus of elasticity, modulus of rupture and shrinkage in 6-year-old *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*. *Maderas. Ciencia y tecnología* 15(2): 171-182. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2013005000014>

Hung, T.D.; Brawner, J.T.; Lee, D.J.; Meder, R.; Dieters, M.J. 2016. Genetic variation in growth and wood-quality traits of *Corymbia citriodora* subsp. *variegata*

across three sites in south-east Queensland, Australia. *Southern Forests* 78(3): 225-239. <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1183095>

IAWA Committee - International Association of Wood Anatomists. 1989. List of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bulletin* 10(3): 210-232.

InfoStat: statistical software. 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba: Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>

Leonello, E.C.; Palma, H.A.L.; Ballarin, A.W. 2008. Delimitação da madeira juvenil e adulta de *Eucalyptus grandis* em São Paulo, Brasil. *Revista Forestal Venezolana* 52(1): 93-99. <https://link.gale.com/apps/doc/A303756926/IFME>

Li, R.L.; Huang, S.X.; Liang, J.; Zhou, C.M.; He, C.M.; Li, L.M.; Tang, G.Q. 2014. Genetic variation of growth traits and wood properties in Chinese fir clones. *Journal of Southern Agriculture* 45(9): 1626-1631. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1191.2014.9.1626>

Liu, Y.; Zhou, L.; Zhu, Y.; Liu, S. 2020. Anatomical features and its radial variations among different *Catalpa bungei* clones. *Forests* 11. e824. <https://doi.org/10.3390/f11080824>

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. In: XXXII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Argentina, pp. 41-53. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/13905>

Lundqvist, S.O.; Grahn, T.; Olsson, L.; Seifert, T. 2017. Comparison of wood, fibre and vessel properties of drought-tolerant eucalypts in South Africa. *Southern Forests* 79(3): 215-223. <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1254910>

Machado, J.S.; Louzada, J.L.; Santos, A.J.; Nunes, L.; Anjos, O.; Rodrigues, J.; Simões, R.M.S.; Pereira, H. 2014. Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.). *Materials & Design* 56: 975-980. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.016>

Marini, L.J.; Cavalheiro, R.S.; de Araujo, V.A.; Cortez-Barbosa, J.; de Campos, C.I.; Molina, J.C.; Silva, D.A.L.; Lahr, F.A.R.; Christoforo, A.L. 2022. Estimation of mechanical properties in *Eucalyptus* woods towards physical and anatomical parameters. *Construction and Building Materials* 352. e128824. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128824>

Mastrandrea, C.A.; Dacoregio, H.M.; Sbravati, M.; Lovatell, Q.C. 2016. Utilización de métodos no destructivos por vibración para evaluar el módulo de elasticidad en Tablas aserradas de *Eucalyptus grandis*. In: XXX Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Argentina, pp. 1-5.

<https://www.jornadasforestales.com.ar/jornadas/2016/METODOS-NO-DESTRUCTIVOS-PARA-TABLAS-DE-Eucalyptus-grandis.pdf>

McLean, J.P.; Evans, R.; Moore, J.R. 2010. Predicting the longitudinal modulus of elasticity of Sitka spruce from cellulose orientation and abundance. *Holzforschung* 64(4): 495-500. <https://doi.org/10.1515/hf.2010.084>

Melo, L.E.L.; Silva, J.R.M.; Napoli, A.; Lima, J.T.; Trugilho, P.F.; Nascimento, D.F.R. 2016. Influence of genetic material and radial position on the anatomical structure and basic density of wood from *Eucalyptus* spp. and *Corymbia citriodora*. *Scientia Forestalis* 44(111): 611-621. <https://doi.org/10.18671/scifor.v44n111.07>

Melo, L.E.L.; Goulart, S.L.; Guimarães, B.M.R.; Guimarães-Neto, R.M.; Sartori, C.J.; Lima, J.T. 2018. Prediction of microfibril angle for *Eucalyptus microcorys* wood

by fiber length and basic density. *Maderas. Ciencia y tecnología* 20(4): 553-562.
<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005004301>

Monteoliva, S.E.; Barotto, A.J.; Alarcón, P.; Tesón, N.; Fernández, M.E. 2017. Densidad de la madera como variable integradora de la anatomía del leño: análisis de ramas y fuste en cuatro especies de *Eucalyptus*. *Revista de la Facultad de Agronomía* 116(1): 1-11. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/61781>

Monterubbianesi, R.I. 2020. Caracterización anatómica de nuevos clones del género *Eucalyptus* desarrollados por INTA Concordia. Tesis de grado. Universidad Nacional de La Plata. 36p. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/93620>

Muneera-Parveen, A.B.; Muthupandi, M.; Kumar, N.; Chauhan, S.S.; Vellaichamy, P.; Senthamilselvam, S.; Rajasugunasekar, D.; Nagarajam, B.; Mayavel, A.; Waman Bachapai, V.K.; Sivakumar, V.; Ghosh Dasgupta, M. 2021. Quantitative genetic analysis of wood property traits in biparental population of *Eucalyptus camaldulensis* × *Eucalyptus tereticornis*. *Journal of Genetics* 100. e46. <https://doi.org/10.1007/s12041-021-01299-x>

Núñez, C.E. 2014. Morphological study of fibers of four trees of *Eucalyptus saligna* implanted in Concordia, Entre Ríos, Argentina. *RECYT* 22: 40-44. <https://www.fceqyn.unam.edu.ar/recyt/index.php/recyt/article/view/378/242>

Omonte, M.; Valenzuela-Hurtado, L. 2020. Relationship between acoustic wave velocity and different characteristics of wood in *Eucalyptus nitens* trees with sawing dimensions. *Maderas. Ciencia y tecnología* 22(4): 559-568. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000414>

Palermo, G.P.; Figueiredo-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. *European Journal of Wood and Wood Products* 73: 775-780. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0947-4>

Portal-Cahuana, L.A.; Figueiredo-Latorraca, J.V.; Camargo-Pace, J.H.; Vieira dos Santos, G.C.; Oliveira-Lima, D.; Alves-Ramos, L.M.; Figueiredo do Carmo, J. 2019. Variabilidad radial física y anatómica del leño de árboles de *Amburana cearensis* (Allemão) A.C. Sm. *Colombia Forestal* 22(1): 17-26. <https://dx.doi.org/10.14483/2256201X.13083>

Portal-Cahuana, L.A.; Piña, E.A.G.; Tuesta, G.P.; Tomazello-Filho, M. 2023. Radial variation of wood density and fiber morphology of two commercial species in a tropical humid forest in Southeastern Peru. *Cerne* 29. e103143. <https://doi.org/10.1590/01047760202329013143>

Ramírez-Ríos, A.; Polack-Peña, A.M. 2020. Estadística inferencial. Elección de una prueba estadística no paramétrica en investigación científica. *Horizonte de la Ciencia* 10(19): 191-208. <https://doi.org/10.26490/uncp.horizonteciencia.2020.19.597>

Ramos, L.M.A.; Figueiredo-Latorraca, J.V.; Pastro, M.S.; Souza, M.T.; Garcia, R.A.; Carvalho, A.M. 2011. Variação radial dos caracteres anatómicos da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. *Scientia Forestalis* 39(92): 411-418. <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr92/cap03.pdf>

Rodriguez-Zaccaro, F.D.; Valdovinos-Ayala, J.; Percolla, M.I.; Venturas, M.D.; Pratt, R.B.; Jacobsen, A.L. 2019. Wood structure and function change with maturity: age of the vascular cambium is associated with xylem changes in current-year growth. *Plant, Cell & Environment* 42(6): 1816-1831. <https://doi.org/10.1111/pce.13528>

- Salvo, L.; Leandro, L.; Contreras, H.; Cloutier, A.; Elustondo, D.; Ananías, R.A. 2017.** Radial variation of density and anatomical features of *Eucalyptus nitens* trees. *Wood and Fiber Science* 49(3): 301-311.
<https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/2575>
- Sánchez Acosta, M.M. 2012.** Caracterización de la madera del nuevo híbrido *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden × *Eucalyptus tereticornis* Smith, su aptitud de usos en Argentina. Tesis doctoral. Universidad de Valladolid. 126p.
<http://uvadoc.uva.es/handle/10324/1708>
- Santos, C.M.; Romeiro, D.; Amorim, E.P.; Longui, E.L.; de Lima, I.L. 2022.** Variation in wood properties of 26-year-old *Handroantus impetiginosus* cultivated in Luiz Antônio, SP. *Scientific Electronic Archives* 15(3): 1-7.
<https://doi.org/10.36560/15320221524>
- Savero, A.M.; Kim, J.H.; Purusatama, B.D.; Prasetya, D.; Park, S.H.; Van Duong, D.; Kim, N.H. 2023.** Characterization of anatomical and non-anatomical properties for the identification of six commercial wood species from Vietnamese plantation forests. *Forests* 14. e496. <https://doi.org/10.3390/f14030496>
- Souza, M.T.; Lima, J.T.; Soares, B.C.D.; Goulart, S.L.; Lima, L.C. 2017.** Statistical delimitation of juvenile and mature wood of *Eucalyptus* and *Corymbia*. *Scientia Forestalis* 45(116): 611-618. <https://doi.org/10.18671/scifor.v45n116.02>
- Talgatti, M.; da Silveira, A.G.; Baldin, T.; de Oliveira, L.H.; Santini, E.J.; Pasa, D.L. 2020.** Caracterização anatômica de clones comerciais de *Eucalyptus* para a produção de papel. *BIOFIX Scientific Journal* 5(1): 65-70.
<https://dx.doi.org/10.5380/biofix.v5i1.67625>
- Thomas, D.S.; Montagu, K.D.; Conroy, J.P. 2007.** Temperature effects on wood anatomy, wood density, photosynthesis and biomass partitioning of *Eucalyptus grandis* seedlings. *Tree Physiology* 27(2): 251-260. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.2.251>
- Tsuchiya, R.; Furukawa, I. 2009.** Radial variation of vessel lumen diameter in relation to stem increment in 30 hardwood species. *IAWA Journal* 30(3): 331-342.
<https://doi.org/10.1163/22941932-90000222>
- Veenin, T.; Fujita, M.; Nobuchi, T.; Siripatanadilok, S. 2005.** Radial variations of anatomical characteristics and specific gravity in *Eucalyptus camaldulensis* clones. *IAWA Journal* 26(3): 353-361. <https://doi.org/10.1163/22941932-02603006>
- Wang, X. 2013.** Acoustic measurements on trees and logs: a review and analysis. *Wood Science and Technology* 47: 965-975. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0552-9>
- Wang, Y.; Zhang, R.; Zhou, Z. 2021.** Radial variation of wood anatomical properties determines the demarcation of juvenile-mature wood in *Schima superba*. *Forests* 12. e512. <https://doi.org/10.3390/f12040512>
- Wessels, C.B.; Malan, F.S.; Rypstra, T. 2011.** A review of measurement methods used on standing trees for the prediction of some mechanical properties of timber. *European Journal of Forest Research* 130: 881-893. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0484-6>
- 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. *European Journal of Wood and Wood Products* 74: 563-575.
<https://doi.org/10.1007/s00107-016-1016-3>
- Winck, R.A. 2023.** Calidad estructural de la madera de pino híbrido F1 *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* basada en métodos no destructivos y

destructivos. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Misiones. 222p.

<https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/14834>

Yang, J.L.; Evans, R. 2003. Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density. *Holz als Roh- und Werkstoff* 61: 449-452.

<https://doi.org/10.1007/s00107-003-0424-3>

Yin, Y.; Song, K.; Liu, B.; Jiang, X. 2011. Variation of microfibril angle in plantation trees of *Cunninghamia lanceolata* determined by pit apertures and X-ray diffraction.

IAWA Journal 32(1): 77-87. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000044>

Zanuncio, A.J.V.; Carvalho, A.G.; Oliveira-Carneiro, A.C.; Valenzuela, P.;

Gacitúa, W.; Leite, F.P.; Colodette, J.L. 2017. Characterization of *Eucalyptus* clones subject to wind damage. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 52(11): 969-976.

<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017001100002>

Zhao, X. 2015. Effects of cambial age and flow path-length on vessel characteristics in birch. *Journal of Forestry Research* 20(1): 175-185. <https://doi.org/10.1007/s10310-014-0458-x>