



PARÁMETROS INDICADORES DE LA CALIDAD ESTRUCTURAL DE FAMILIAS DE PINO HÍBRIDO F1 INTA-PINDO

Rosa A. WINCK^{1,2*}, Lucía R. WINCK³, Ector C. BELABER¹, Diego R. AQUINO¹, Hugo E. FASSOLA¹, María C. AREA⁴, María E. GAUCHAT¹

RESUMEN

Se seleccionaron 15 familias híbridas F₁ INTA-PINDO, 5 de cada posición del ranking genético de crecimiento (superior, intermedio e inferior) provenientes de 2 ensayos. Se evaluaron a través de distintos indicadores de la calidad estructural de la madera. Sobre los árboles en pie se determinó la velocidad de propagación del sonido (VS) en todos los ejemplares. Paralelamente se extrajeron tarugos para estimar la densidad verde (ρ_v), contenido de humedad (CH) y ángulo microfibrilar (AMF). Una vez procesados los datos, con la ρ_v y VS se calculó el módulo de elasticidad dinámico (MOE_d) para árboles en pie. Por otro lado, se seleccionaron 90 ejemplares y la altura de 1,30 m se tomaron rodajas para evaluar la densidad básica y estacionada. Para analizar el porcentaje de área coloreada (presencia de resina) y ancho de anillos de crecimiento las muestras fueron obtenidas a las alturas de fuste 0,10; 1,30 y 4,45 m. Se identificaron 6 familias con características deseables para usos sólidos. En general, las familias de mejor desempeño para calidad estructural fueron las pertenecientes a la posición superior del ranking genético de crecimiento consolidando la factibilidad de seleccionar por crecimiento y calidad de madera, simultáneamente.

Palabras clave: rigidez, velocidad de sonido, propiedades de la madera, *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, ángulo microfibrilar

1. INTRODUCCIÓN

La estimación de la rigidez de la madera de los árboles en pie a través de la medición del tiempo de propagación de ondas es un paso importante para la caracterización de la materia prima a ser utilizada en procesos industriales, sobre todo si es destinado a usos estructurales. Para ello, existen herramientas acústicas que han sido ampliamente aceptadas por las industrias forestales para estimar la rigidez o el módulo de elasticidad de la madera (Llana et al., 2016). Las técnicas acústicas son eficaces para evaluar la calidad estructural de los árboles en pie (Merlo et al., 2014). En coníferas, comúnmente utilizada en las construcciones, los anillos de crecimiento anuales se pueden apreciar en forma de capas bien marcadas y visibles, constituidos por leño temprano y tardío. Las traqueidas del leño temprano poseen paredes celulares delgadas y lúmenes grandes, mientras que las del leño tardío presentan cavidades pequeñas con paredes gruesas, lo que le proporciona una mayor densidad a este último (Álvarez Lazo et al., 2011) y le confiere mejores propiedades mecánicas. Por otro lado, las propiedades de la madera se pueden mejorar a través de los tratamientos silvícolas y del mejoramiento genético. El fenotipo de un árbol es la combinación entre su genotipo y el ambiente, más la interacción entre ambos. Según Gonçalves et al. (2009), el factor ambiental tiene influencia importante en la coloración de la madera de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* siendo ésta una característica no deseada por el sector forestoindustrial. Para el pino híbrido F₁ INTA PINDO la industria detecta recientemente la disconformidad de los clientes en el mercado internacional de productos terminados obtenidos a partir del procesamiento industrial de esta especie, de ahí la necesidad de atender esta demanda. Mientras que, si se prefieren para usos estructurales maderas con grandes proporciones de leño tardío, con altos

¹ INTA, EEA Montecarlo, Montecarlo, Misiones, Argentina. *Contacto: winck.rosa@inta.gob.ar

² IMAM, UNaM, FCF, Laboratorio de Tecnología de la Madera, Eldorado, Misiones, Argentina.

³ UNaM, FCF, Graduada en Ingeniería Forestal, Eldorado, Misiones, Argentina

⁴ IMAM, UNaM, CONICET, FCEQYN, Programa de Celulosa y Papel (PROCYP), Posadas, Misiones, Argentina



valores de densidad y módulo de elasticidad y bajos valores de ángulo microfibrilar. Este último tiene gran influencia sobre el comportamiento físico-mecánico y de la calidad estructural de la madera (Donaldson 1996; Deresse et al., 2003; Hein et al., 2013; Winck et al., 2013).

El objetivo de este trabajo consistió en utilizar distintos parámetros indicadores de calidad estructural de la madera para identificar a las familias híbridas F₁ INTA-PINDO de mejor comportamiento para usos sólidos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El material genético utilizado, pino híbrido, *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PEE × PCH), en adelante “F₁ INTA-PINDO”, se obtuvo de 2 ensayos. El primero, implantado en Laharrague en el campo del INTA (26° 33' latitud S y 54° 40' longitud O, sitio 1) y el segundo establecido en propiedad de la empresa PINDO SA en la localidad de colonia Delicia km 22 (26° 09' latitud S y 54° 26' longitud O, sitio 2). El diseño de plantación correspondió al de bloques completos, con tratamientos distribuidos al azar en parcelas lineales conformadas por 5 hermanos completos. El clima de la región de estudio se caracteriza por presentar una precipitación media anual de 1864,5 mm, con temperaturas medias en los meses más cálidos y fríos de 26,4 °C y 14,9 °C, en enero y julio, respectivamente (Silva et al., 2019).

A los 11 años de edad se midió el diámetro a la altura de pecho (DAP), altura total (h) y el tiempo de desplazamiento de la onda en todos los árboles de ambos ensayos. En base al ranking genético de crecimiento del 7^{mo} año, 15 de las 66 familias fueron seleccionadas para este estudio, 5 de la posición superior del ranking (R1), 5 intermedias (R2) y 5 del inferior (R3) (Cuadro 1). Se seleccionaron 90 árboles, 45 individuos de cada ensayo, abarcando la variabilidad en DAP. Paralelamente a la altura de 1,30 m se extrajeron tarugos de 5 mm de diámetro y 3 cm de profundidad para determinaciones de densidad verde (ρ_v), contenido de humedad (CH) y ángulo microfibrilar (AMF). Se apearon los ejemplares y a las alturas de 0,10; 1,30 y 4,45 m se tomaron 270 rodajas de 1” de espesor para analizar anillos de crecimientos y proporción de área coloreada (zona con presencia de resina). Las densidades, básica (ρ_b) y estacionada (ρ_e) fueron evaluadas solo en la rodaja correspondiente a 1,30 m de altura.

El procesamiento de los tarugos permitió determinar los valores medios de ρ_v (Ec.1) y el CH (Ec. 2) por familia al momento de la medición del tiempo de propagación de onda (SWT del inglés Stress Wave Time). El SWT entre un transductor de inicio y otro de finalización situados a una distancia conocida (Dc) de 1000 mm se midió en microsegundos, con el equipo TreeSonic Timer (Fakopp® Enterprise). Luego se estimó la velocidad del sonido (VS) (Ec. 3). Conociendo la ρ_v y la VS se calculó el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) (Ec. 4)

Cuadro 1: Ranking genético de crecimiento para las 15 familias de ambos sitios.

Posición en el Ranking	Crecimiento	Familia	Código Familia
R1	superior	F19	01
		F51	02
		F20	03
		F28	04
		F29	05
R2	intermedio	F49	06
		F4	07
		F5	08
		F13	09
		F33	10
R3	inferior	F11	11
		F23	12
		F59	13
		F6	14
		F35	15

$$\rho_v = \frac{P_v}{V_v} \text{ (Ec. 1)}$$

$$CH = \left(\frac{P_h - P_0}{P_0} \right) * 100 \text{ (Ec. 2)}$$

$$VS \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{(1000 * D_c \text{ (mm)})}{(SWT \text{ (}\mu\text{s)} + 2,8)} \text{ (Ec. 3)}$$

$$MOE_d \text{ (Gpa)} = \frac{\rho_v \left(\frac{kg}{m^3} \right) * VS^2 \left(\frac{m}{s} \right)}{1000000000} \text{ (Ec. 4)}$$

Donde P_v = peso en estado verde, V_v = volumen en estado verde, P_0 = peso anhidro, D_c = distancia conocida de 1000 mm, SWT, valor medio del tiempo propagación de onda obtenido con el TreeSonic en μs , y 2,8 es un factor corrección (relación entre tiempo y distancia), especificado en cada equipo.



Por otro lado, las 270 rodajas se secaron en estufa a 70 °C durante 72 horas y se lijaron para visualizar con mayor facilidad los anillos de crecimiento e identificar falsos anillos. En cada rodaja se midió con regla el diámetro sin corteza y diámetro de la zona central coloreada de manera ortogonal; en ambos casos se obtuvo el promedio entre las dos mediciones. Con el diámetro promedio de la zona coloreada se determinó el área coloreada de la zona central de cada rodaja. La proporción de área coloreada se obtuvo respecto al área total de la sección transversal sin corteza, a diferentes alturas.

Para estimar el área del leño temprano (LTe) y leño tardío (LTa) de cada anillo de crecimiento, se midieron previamente con regla los diámetros hasta la finalización de cada anillo de crecimiento y los diámetros que abarcan el LTe desde el año 1 al 11. Luego, para cada edad se calcularon las áreas para el anillo completo y para el LTe, respectivamente. Los valores de áreas del LTa para cada edad, se obtuvieron por diferencia entre el dato del anillo completo y el área del LTe. En cada rodaja se determinó el área acumulada y el área para un anillo específico, esta última mediante la diferencia entre los valores de dos anillos sucesivos. La proporción de LTa se obtuvo respecto al área total de la sección transversal sin corteza, a diferentes alturas. Una vez finalizada la medición de la coloración y anillos de crecimiento, se confeccionaron probetas de un radio de la rodaja a la altura 1,30 m, se seleccionó solamente el cubo más cercano a la corteza y se determinó la ρ_b y ρ_e según la norma IRAM 9544 (1973).

Los tarugos para estudios anatómicos fueron secados en estufa a 70 °C hasta alcanzar un contenido de humedad del 12 %. Luego se pulieron y se tomó una fracción del leño tardío del anillo 11. Las muestras se disociaron utilizando una solución de ácido acético y agua oxigenada en partes iguales, y luego se tiñeron con safranina al 1 %. Los disociados fueron observados empleando un microscopio óptico "Nikon" con una cámara digital acoplada y un Software, "NIS-Elements", incorporado para mediciones celulares. El AMF se midió según la técnica de Huang et al. (1998). Se utilizó la norma IAWA (2004). Se realizaron en total 15000 mediciones constituidas por 25 repeticiones.

Los análisis fueron realizados con el software Infostat (Di Rienzo et al., 2020), se calcularon los estadísticos descriptivos y se verificó la presencia de datos atípicos. Posteriormente se analizaron los datos utilizando modelos lineales mixtos con efectos fijos de sitios, familias, y edad para el ancho y área de anillos, con el efecto aleatorio de árbol. Se determinó la significancia estadística a un nivel de del 5 % y para comparación de medias se utilizaron test LSD (para ancho de anillos y ρ_b y ρ_e) y DGC (para las demás variables).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

No se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre sitios (p -valor $>0,05$) para el MOEd, ancho y área de anillos de crecimiento, % de LTa, % de área coloreada, ρ_b y ρ_e . Pero sí para el AMF (p -valor $<0,05$). Por otro lado, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre familias (p -valor $<0,05$) para el MOEd, ancho y área de anillos de crecimiento, % de área coloreada y AMF. Mientras que no se detectaron diferencias entre familias para % de LTa, ρ_b y ρ_e .

Los valores promedios obtenidos fueron 26,98 cm de DAP; 21,53 m de h; 1015 kg/m³ de ρ_v ; 58, 17 % de CH; 3689 m/s de VS; y 13,92 Gpa de MOEd, con valores extremos de 9,00 y 18,51 Gpa para este último. Merlo et al. (2014) encontraron una relación fuerte y positiva entre MOE a nivel de árbol y tabla ($r = 0,6319$, $p < 0,0001$) afirmando que las herramientas acústicas son eficaces para evaluar calidad estructural de los árboles en pie. Se identificaron 4 familias con buen desempeño en MOEd (Gráfico 1). Las familias con mayores valores de MOEd, pertenecen a la posición 1 y 2 del ranking de crecimiento, consolidando la factibilidad de seleccionar por crecimiento y calidad de madera, simultáneamente.

Las familias que arrojaron un mayor promedio en el porcentaje de coloración fueron la 01 y 03, con valores de 3,94 % y 5,00 %, respectivamente. Ambas familias tienen en común uno de los progenitores, la madre. Cabe destacar también, que la coloración no siguió un patrón cilíndrico dentro de la porción de fuste analizada pudiendo esto afectar al rendimiento industrial. Por otro lado, la familia 02 presentó mayor ancho promedio de anillos (1,35 cm), seguida por las familias 01, 03, 04, 05 y 07 (con valores medios entre 1,28 y 1,30 cm). Las familias 06, 08, 09, 10, 11, 12 y 13 presentaron valores intermedios comprendidos entre 0,98 y 1,23 cm, mientras que, los menores valores se dieron en las familias 14 (0,96 cm) y 15 (0,94 cm).

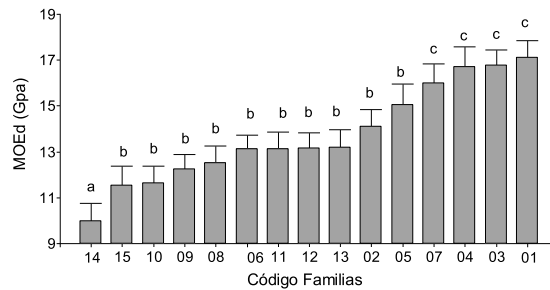


Gráfico 1. Promedio del MOEd para las familias estudiadas.

En cuanto al comportamiento en crecimiento, se destacó que las mismas familias mantienen la superioridad, independientemente de la edad considerada. El incremento en el ancho de anillos fue significativamente mayor en el primero y segundo año, con una media de 2,12 cm. A partir de esa edad, se apreció un decrecimiento lineal hasta el 8^{vo.} y 9^{no.} año, que arrojó un valor medio de 0,56 cm para los 8 y 9 años de edad, descendiendo a 0,28 cm a los 11 años. Se observó una mayor variabilidad en el ancho de anillos entre familias al primer año, donde se registraron valores desde 1,48 a 2,77 cm; aumentando la homogeneidad con la edad, arrojando a los 11 años valores medios entre 0,15 y 0,62 cm. El Gráfico 2a muestra el incremento en el ancho de anillos para una familia de cada posición del ranking genético (es decir, R1, R2 y R3), donde puede observarse que las mismas mantuvieron su performance a través de las edades. Por otro lado, el Gráfico 2b muestra que el mayor incremento del área de los anillos se registró al 5^{to.} año, alcanzando valores de 80,39 cm², 69,23 cm² y 46,57 cm² para las posiciones R1, R2 y R3, respectivamente. Seguido por el 3^{er.}, 4^{to.} y 6^{to.} año alcanzando valores diferenciados según clase de ranking. Durante el 1^{ro.} y 2^{do.} año, todas las familias alcanzaron un desarrollo similar, sin embargo, a partir del año 3, las familias de la posición R3 disminuyeron su tasa de crecimiento, lo cual se acentuó con el aumento de la edad. A partir del 5^{to.} año las familias del ranking R1 y R2 se destacaron aún más en su desarrollo respecto al R3. Al 6^{to.} año se redujo el crecimiento para las familias de todas las clases del ranking. Las familias de la posición R3 y R2 arrojaron menor valor de incremento anual en el ancho de anillos.

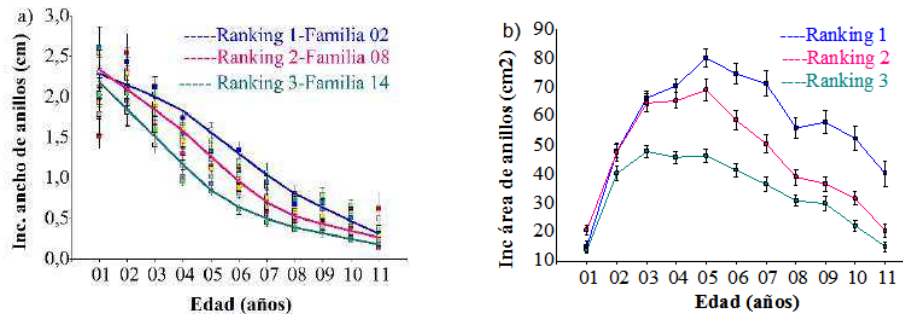


Gráfico 2. a) Variación anual en el incremento medio del ancho de los anillos de crecimiento para familias representativas de las 3 posiciones del ranking genético. b) Incremento anual promedio en el área de los anillos de crecimiento para las 3 posiciones del ranking.

Los valores medios de ρ_b variaron entre 0,40 y 0,48 g/cm³ y los de ρ_e entre 0,52 y 0,62 g/cm³. La tendencia fue de registrar valores superiores para el sitio 2 y para las familias 01 y 13. La familia 01 presentó la mayor proporción de área coloreada (resina) influyendo en los valores de ρ_b y ρ_e , la familia 13 se corresponde a la posición R3 del ranking y con menores valores en ancho de anillos repercutiendo también en los valores de densidad, esto estaría indicando que no es suficiente utilizar a la densidad como único predictor de la calidad estructural de la madera. Los valores medios de AMF para el sitio 1 y 2 fueron de 18,92° y 20,40°, respectivamente, similares a los registrados por Harding et al. (2004) para F₁ de pino híbrido. Las familias con menores valores de AMF comunes en ambos sitios fueron 02, 03, 04, 07 y 09 y para el sitio 1 también las familias 01 y 05. Estas familias en su mayoría forman parte del R1, esto sugiere la factibilidad de realizar la selección del material genético en base a su crecimiento volumétrico, sin que sean afectadas negativamente las características relacionadas a la calidad estructural.



4. CONCLUSIONES

Las familias de la posición R1 del ranking genético de crecimiento y la familia 07 de la posición R2 del ranking, presentaron características indicadoras de un mejor desempeño para uso estructural, con mayor crecimiento a través del tiempo, mayores valores de velocidad del sonido, densidad, módulo de elasticidad dinámico y menores valores de ángulo microfibrilar, consolidando la factibilidad de seleccionar por crecimiento y calidad de madera, simultáneamente. Mientras que las familias pertenecientes a la posición R3 del ranking presentaron características poco alentadoras como para ser reproducidas. En principio, sin estudios más detallados, no sería recomendable la propagación y difusión de las familias 01 y 03, debido al alto porcentaje de área coloreada que presentaron, esta característica restringe la fabricación de productos macizos.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Pindó S.A. quien facilitó el sitio donde oportunamente se instaló uno de los ensayos de progenies, además por su colaboración en el mantenimiento y el cuidado del mismo. Al Proyecto INTA 2019-PE-E6-I146-001: Mejoramiento genético de especies forestales cultivadas de rápido crecimiento: un desarrollo clave para el fortalecimiento de la foresto industria nacional, por el financiamiento brindado para desarrollar la investigación. Y a los técnicos de INTA (Iris Elsa Figueredo, Cristian Rotundo, Tomas Joaquín Haberle, Diego Bogado y Otto Knebel) por la cooperación en las tareas de campo y de laboratorio.

6. LITERATURA CITADA

- ÁLVAREZ LAZO, D.; DORADO, M.; CAMUSSO, C.; LUBRANO, P. 2011. Tecnología de la madera. Edit. Universitos, Córdoba, Argentina. 153 pp.
- DERESSE, T.; SHEPARD, R.K.; SHALER, S.M. 2003. Microfibril angle variation in red pine (*Pinus resinosa* Ait.) and its relation to the strength and stiffness of early juvenile wood. For Prod J 53: 34– 40. <http://kb.forestprod.org/Main/ind/?id=67004>.
- DI RIENZO, J.A.; CASANOVES, F.; BALZARINI, M.G.; GONZALEZ, L.; TABLADA, M.; ROBLEDO, C.W. 2020. InfoStat versión 2020. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <https://www.infostat.com.ar/index.php?mod=page&id=46>.
- DONALDSON, L.A. 1996. Effect of physiological age and site on microfibril angle in *Pinus radiata*. IAWA J 17(4): 421-429. https://brill.com/view/journals/iawa/17/4/article-p421_8.xml.
- GONÇALEZ, J. C.; SOARES VIEIRA, F.; ALVES CAMARGOS, J. A.; JORDÃO ZERBINI, N. 2009. Influência do sítio nas propriedades da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Cerne, 15(2):251-255.
- HARDING, K.J., COPELY, T.R., TOON, P.G.; DIETERS, M.J. 2004. Improving wood quality in a hybrid pine clonal forestry program in Queensland, Australia. IUFRO Forest Genetics Meeting Proceedings. Pg. 359-371. <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:101610>.
- 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-Cienc Tecnol 15(2): 171-182. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/maderas/v15n2/aop1413.pdf>.
- HUANG, C.L.; KUTSCHA, N.P.; LEAF, G.J.; MEGRAW, R.A. 1998. Comparison of microfibril angle measurement techniques. In: B.G. Butterfield (ed.), Microfibril angle in wood: 177-205. IAWA and IUFRO, Christchurch, New Zealand.
- IAWA. INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMY. 2004. List of microscopic features for softwood identification. IAWA bulletin, Utrecht, 25 (1): 1-70. https://www.iawa-website.org/uploads/soft/Abstracts/01_IAWA-Softwood_List.pdf.
- LLANA, D.F.; INÍGUEZ-GONZALEZ, G.; ARRIAGA, F.; WANG, X. 2016. Acoustic test of timber, BioResources 11 (2), 3303-3317.
- MERLO, E.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; SANTA CLARA, O.; RIESCO, G. 2014. Modelling modulus of elasticity of *Pinus pinaster* Ait. in northwestern Spain with standing tree acoustic measurements, tree, stand and site variables. Forest Syst 23(1): 153-166. <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2014231-04706>.
- NORMA IRAM 9544, 1973. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales-IRAM 9544. Método de la determinación de la densidad aparente.
- SILVA, F.; HABERLE, T.; MÜLLER, H.; MÜNZ, R.; VISENTINI, J. 2019. Normales del clima de la región de Montecarlo. Actas XVIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. - FCF, UNaM - EEA Montecarlo, INTA. Eldorado, Misiones, Argentina Pg. 526-528. <https://www.jotefa.com/actas#portada>.
- WINCK, R.A.; FASSOLA, H.E.; TOMAZELLO, M.F.; AREA, M.C. 2013. Case Study: Microfibril angle and its relationship with basic density in *Pinus taeda* L. wood from silvopastoral systems. Revista O Papel. 745: 55-61. http://www.revistaopapel.org.br/edicoes_impresas/71.pdf.