



Kurú: Revista Forestal (Costa Rica) 6 (17), 2009

ARTÍCULO CIENTÍFICO

**Influencia del ángulo del grano sobre el módulo estático en
Pinus radiata D. Don.**

Stephie Solórzano Naranjo¹

RESUMEN

Se evaluó la madera procedente de 13 árboles de pino radiata (*Pinus radiata* D. don), de plantaciones de 27 años de edad clasificadas según el diámetro y la altura. Los árboles se cortaron en piezas de 5" de ancho x 2" de espesor x 5 m de largo y se codificaron de acuerdo a su cercanía con la médula en P1 más cercana hasta P4 más lejana de la médula. Estas se secaron hasta llevarlas al 12% de contenido de humedad. Se midió la velocidad de transmisión de ondas e inclinación del grano con un medidor Director HM200. La inclinación del grano se midió según la norma chilena NCh992 (1972) y la norma ASTM D245 (2006). Se midió el módulo de elasticidad dinámico. La inclinación del grano varió de 0 a 13,5° y el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) varió de 4,8 a 15,4 GPa. La inclinación del grano afectó significativamente el módulo de elasticidad dinámico.

Palabras clave: Módulo de elasticidad estático, Ángulo de la fibra, Madera juvenil y madura, Alabeo, *Pinus radiata*, Chile.

ABSTRACT

Radiate pine (*Pinus radiata* D. don) juvenile wood from a 27 year old plantation was evaluated to determine the effect of grain inclination on the wood dynamic modulus of elasticity (MOEd). Timber samples dried to 12% of moisture content of 5" x 2" and 5 meters long were taken from different trees and classified according to their position respect to the medulla. The grain inclination was measured using the Chilean norm NCh992, and the ASTM norm D245-2006. The results show that grain inclination varied from 0 to 13,5°, and the dynamic elasticity modulus from 4,8 to 15,4 GPa. The results demonstrate that grain inclination affect the MOEd.

Keywords: Stiffness, Angle of the fiber, Juvenile wood and mature wood, Warping, *Pinus radiata*, Chile.

¹Estudiante de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica. stephiesn87@gmail.com
En cooperación con el Departamento de Manejo Forestal. Proyecto Calidad de la Madera en *Pinus radiata* D. Don. Proyecto Alfa/Euforia.

INTRODUCCIÓN

En Chile, las plantaciones forestales han surgido como una industria sustentable donde se establecen más plantaciones de las que se cosechan. Actualmente, Chile posee una superficie de plantaciones de 2,1 millones de ha, donde especies de rápido crecimiento como *Pinus radiata* (66,7 %) y eucaliptos (24,6 %), son las más sobresalientes (INFOR, 2006).

El mercado ha visto la necesidad de ser más eficientes en producción, por lo que se han disminuido los turnos de corta para reducir el costo de crecimiento. Esto resulta en una alta proporción de madera juvenil y reducción en la calidad de la madera. Estudios realizados enlistan características indeseables acerca de la madera juvenil (Walker y Butterfield, 1995): baja densidad, alto contenido de humedad, contracciones por encima del promedio, bajo contenido de celulosa, desviación de la fibra, traqueidas más cortas con lúmenes más grandes. Estas características tienen como consecuencia madera con resistencia y módulo de elasticidad bajos y una mala estabilidad dimensional (Lasserre *et al*, 2004; Walker y Nakada, 1999).

La industria forestal es la segunda generadora de divisas en Chile (CORMA, 2008), lo que produce un nuevo desafío: lograr ventajas competitivas ante un mercado tan exigente. Por las rotaciones cortas, se hacen necesarios mecanismos más eficientes de clasificación de calidad y mejoras en la calidad de la madera. Según Jayawickrama (2000), la densidad de la madera fue sustituida por el módulo de elasticidad para la clasificación estructural de piezas; el cálculo del MOE puede realizarse a través de instrumentos acústicos (mecanismos no destructivos), lo cual es una gran ventaja.

En países como Nueva Zelanda se ha experimentado ampliamente con mecanismos no destructivos de mediciones del módulo dinámico (MOEd), como método de clasificación de árboles en pie (Donaldson, 1993; Xu *et al*, 2002; Lindström *et al*, 2004; Walker y Nakada, 1999). Estos han sido poco experimentados en Chile y pueden ser una fuente importante de información sobre el estado y calidad de las plantaciones.

Este trabajo surge como una necesidad de encontrar una forma práctica de caracterizar la madera de *Pinus radiata* D. Don por un método no destructivo. Pretende encontrar la distribución del MOEd dentro del árbol tanto en altura como en diámetro, tomando en cuenta la influencia de la inclinación del grano como un factor que afecta la estimación.

Se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Describir la inclinación del grano entre árboles.
- Determinar la distribución de la inclinación del grano en altura y diámetro.
- Establecer una distribución de la inclinación del grano según la madurez de la madera.
- Determinar la relación entre la inclinación del ángulo de la fibra y el MOEd.

MATERIAL Y METODOS

La muestra se obtuvo en una plantación de *Pinus radiata* D. Don de 27 años de edad provenientes del predio de Aragón de Forestal Masisa, Chile. La región de procedencia posee un clima templado lluvioso con influencia mediterránea, una temperatura media de 11°C y una precipitación de 1900 mm. Se obtuvo una muestra de 13 árboles que se encontraban dentro de las clases diamétricas más representativas del rodal. Las mediciones se realizaron en árboles en pie y en tablas.

Mediciones de árboles en pie

Se midió el diámetro a la altura pecho (DAP) con forcípula, a una altura de 1,3 m sobre el suelo en dirección norte-sur y este-oeste, posteriormente se trabajó con el promedio de estas mediciones.

Tablas

Se procedió a voltear los 13 árboles seleccionados, luego se seccionó el fuste en trozas de 5 m de largo y se obtuvo el mayor número de trozas posible por árbol, estas se clasificaron de la siguiente forma:

- Primera troza: Basal
- Segunda troza: Media
- Tercera troza: Media superior
- Cuarta troza: Superior

Posteriormente las trozas se aserraron en piezas de 5" de ancho x 2" de espesor x 5 m de largo y se codificaron de acuerdo a su cercanía con la médula en P1 más cercana hasta P4 más lejana de la médula. Estas se secaron en un horno al aire hasta llevarlas al 12% de contenido de humedad.

Las piezas denominadas como P1 y P2 se clasificaron como madera juvenil y las piezas P3 y P4 como madera madura, debido a que en plantaciones de rápido crecimiento existe una mayor producción de este tipo de madera dentro del árbol (Bhat *et al*, 2001; Zobel y Sprague, 1998).

El patrón de corte se muestra en la Figura 1:

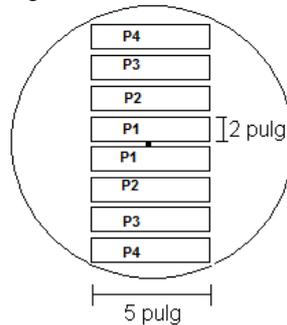


Figura 1. Patrón de corte

Se realizaron las siguientes mediciones en cada tabla:

Densidad: para cuantificar esta variable, se procedió a realizar mediciones de espesor (e), ancho (a), largo (l) y peso (P) de cada tabla. El ancho y el espesor se midieron con pie de rey en tres sectores de la tabla (parte superior, media e inferior), luego se promediaron para obtener una sola medida. En el caso del largo solamente se realizó una medición con cinta métrica. El peso se obtuvo colocando cada pieza en una pesa y se midió en kilogramos.

Finalmente, la densidad de cada pieza se obtuvo por la fórmula:

$$D \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{P(kg)}{l(m) * a(m) * e(m)}$$

Velocidad del sonido: Se midió la velocidad del sonido por medio del instrumento Director HM200. Este instrumento consta de un sensor en la parte superior y un martillo de peso conocido. El sensor se presiona contra la base de la tabla, cuando el instrumento da la señal se golpea la base con el martillo (Figura 2), lo cual produce una vibración en la tabla y permite medir la velocidad del sonido en microsegundos. Posteriormente, se transforma las unidades en segundos.



Figura 2. Medición de la velocidad del sonido con Director HM200.
(Fuente: www.fibre-gen.com, s.f.).

La velocidad del sonido es un método no destructivo que indirectamente permite calcular el módulo estático de la madera por la fórmula:

$$MOEd(GPa) = \left[\frac{D(kg/m^3)}{1000} \right] * v^2(km/s)$$

donde:

MOEd= módulo de elasticidad dinámico en GPa

D= densidad en kg/m^3

v= velocidad en km/s

Inclinación del ángulo de la fibra: Se utilizó un detector de inclinación de la fibra para la determinación de esta variable. Este instrumento es clavado en la madera de cada tabla y se hala del mango; la misma gira en forma libre, dejando una marca al deslizarse por las fibras, como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Detector de inclinación de la fibra

La inclinación del grano se midió según la norma chilena NCh992 (1972) y la norma ASTM D245 (2006). En ambas, se toma una pieza de madera y se mide el sector con mayor inclinación del ángulo de la fibra, con la excepción de las áreas cercanas a nudos. El sector a medir debe ser lo suficientemente amplio para realizar la medición. Como la tabla es de 5 m de largo se realizó dos mediciones por pieza y se registró la altura sobre la tabla en la que se encontraba la inclinación del grano. Esta medición se calculó empleando un triángulo rectángulo con una razón BC/AC, donde BC es un cateto igual a 1 cm y AC es el otro cateto, la hipotenusa del triángulo corresponde a la marca realizada por el detector de la inclinación de ángulo de la fibra, como se muestra en la Figura 4.

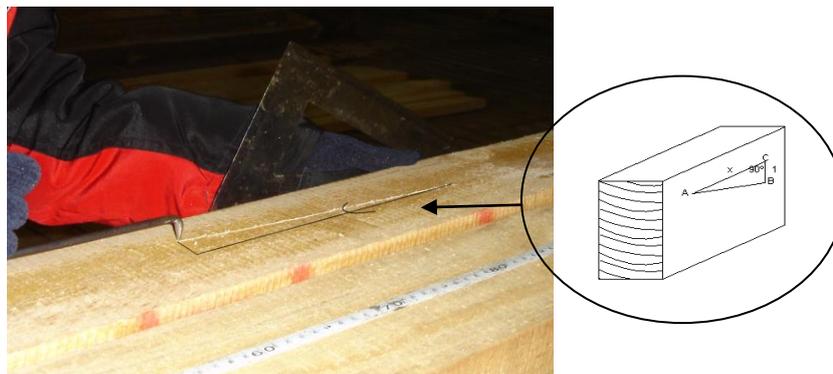


Figura 4. Medición del grano inclinado.

La distribución de la inclinación del grano en relación al diámetro se realizó por medio de la clasificación de las tablas con respecto a su cercanía con la médula (código P1-P4) y las clases diamétricas de la inclinación del grano. Se obtuvo el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación de la inclinación del grano para cada árbol.

El análisis estadístico se realizó empleando el programa Statsgraphics, por medio de análisis de regresiones simples al 95% de nivel de confiabilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variación entre árboles

El 34% de las piezas clasificaron como no estructurales (Cuadro 1), estas poseen ángulos de las fibras mayores a $4,5^\circ$ (NCh992, 1972); Cown (1992) menciona que la madera no estructural pertenece a la madera juvenil, ya que fuera de esta zona el ángulo de la fibra presenta valores cercanos a 0° . El 66% de las piezas de madera son estructurales (Cuadro 1) con inclinaciones menores a $4,5^\circ$, lo que confirma que la madera analizada es en su mayoría madera madura de 27 años de edad. La inclinación promedio del grano fue de $3,52^\circ$ con una desviación estándar de la muestra de $2,35^\circ$ y un coeficiente de variación del 67% (Cuadro 1). La alta variación de los datos se debe a que las inclinaciones de las fibras de las piezas analizadas corresponden tanto a madera juvenil como madura. Wloch *et al* (2002) atribuyen el cambio en la dirección de las fibras entre el tipo de madera al cambio del crecimiento interno de las células fusiformes, debido a la reestructuración espacial de las mismas por la actividad cambial de células juveniles a células maduras.

Se encontró diferencias significativas en la inclinación del grano de las piezas entre árboles ($\alpha > 0,05$), el árbol 14 presentó un 93% de piezas estructurales con una desviación estándar de $1,79^\circ$ y un coeficiente de variación de 83%, este es el mejor árbol del grupo estudiado pues aporta madera mayormente libre de alabeo por las leves desviaciones del grano (Tian *et al*, 1996), mientras que el árbol 6 presenta los mayores porcentajes de madera no estructural con 60% de piezas no estructurales (Cuadro 1); estas diferencias se deben a la procedencia de cada individuo, ya que las características morfológicas como la inclinación del ángulo de la fibra y porcentaje de madera juvenil poseen tanto un efecto ambiental como genético (Schugalsser y Witzum, 2007).

Tsehaye y Walker (1996) y Walker y Butterfield (1995) reportan inclinaciones del ángulo de la fibra entre 0° y 40° , rango más amplio al 0° y $13,5^\circ$ encontrado en este estudio, para *Pinus radiata* de 27 años de edad. Tsehaye y Walker (1996) mencionan que es necesario considerar una muestra mayor a 500 individuos para obtener mayores rangos de inclinación del grano y lograr mejores estimaciones entre los parámetros. Sin embargo, en el presente estudio solamente se consideraron 13 árboles por motivos de tiempo y recursos financieros.

Cuadro 1. Evaluación de la inclinación del grano por árbol en *Pinus radiata* D. Don de 27 años

Árbol	N	Inclinación de grano			
		NE (%)	E (%)	Ángulo medio (°) (S)	CV(%)
1	22	45,45	54,55	4,56 (3,01)	65,95
2	20	10,00	90,00	2,80 (1,78)	63,74
3	17	52,94	47,06	4,04 (2,25)	55,60
4	17	35,29	64,71	3,59 (2,54)	70,83
5	28	46,43	53,57	4,07 (1,80)	44,15
6	21	71,43	28,57	5,26 (2,20)	41,83
7	22	13,64	86,36	2,78 (2,55)	91,59
9	18	16,67	83,33	2,45 (2,19)	89,30
11	19	21,05	78,95	3,02 (1,83)	60,66
12	9	44,44	55,56	3,81 (1,46)	38,41
13	12	41,67	58,33	3,98 (2,59)	65,10
14	15	6,67	93,33	2,14 (1,78)	83,11
15	12	25,00	75,00	2,40 (2,20)	91,76
Total	232	33,62	66,38	3,52 (2,35)	66,93

Leyenda: N=Número de tablas por árbol, NE= No estructural, E= Estructural, S=Desviación estándar, CV=Coefficiente de variación.

Distribución de la inclinación de grano en altura

Según Tsehaye y Walker (1996) y Xu y Walker (2004), conforme aumenta la altura del árbol es posible encontrar valores más altos de inclinación del grano, incluso hasta grano en espiral. En este estudio, no se encontró una relación significativa entre la inclinación de la fibra y la altura a la que se tomó la muestra ($r^2 = 0,03$, $\alpha > 0,05$) (Figura 5). Tian *et al* (1996) y Cown *et al* (1983) en *Pinus radiata* encontraron una gran variabilidad de la distribución de la inclinación del grano con la altura tanto dentro de un árbol como entre árboles, lo cual dificulta hacer una comparación de una muestra y evaluar los efectos del grano sobre la calidad.

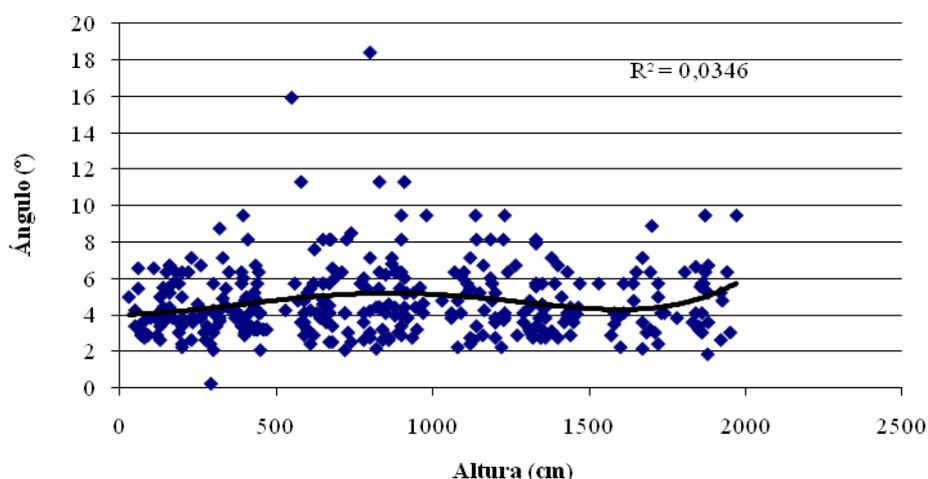


Figura 5. Relación de la inclinación del grano con la altura para la muestra en *Pinus radiata* D. Don de 27 años.

Distribución del MOEd-Grano en diámetro

El MOEd promedio aumenta para las piezas extraídas de la parte más externa del árbol (P3 y P4), mientras que las piezas cercanas a la médula y las que probablemente contenga el mayor porcentaje de madera juvenil (P1 y P2) presenta los valores de MOEd más bajos (Figura 6). Dungey *et al* (2006) menciona que el MOEd presenta un valor bajo cerca de la médula, que aumenta conforme se acerca a la corteza, debido a diferencias en la densidad de la madera. La madera juvenil es anatómicamente diferente y estructuralmente inferior en comparación con la madera madura y por tanto se obtienen valores más bajos del MOEd y ángulo del grano en esta sección del árbol (Lee y Wang, 1996; Zobel y Sprague, 1998).

El ángulo del grano se caracteriza por tender a ser espiral en la madera juvenil y aumenta la inclinación conforme se aumenta en altura, a menor inclinaciones de la fibra la madera es más resistente (Xu y Walker, 2004). Sin embargo, este comportamiento no se mantuvo entre los 2° y 4° porque en las piezas P2 el MOEd presenta disminución de su resistencia y posteriormente aumenta, esto sucede porque probablemente esta pieza representa la transición entre madera juvenil a madura y por tanto ocurre un cambio en el comportamiento del MOEd (Dungey *et al*, 2006).

Las mayores inclinaciones del grano se presentaron en las piezas que contienen madera juvenil, específicamente P1 y P2, inclinaciones del grano entre 13-14° se presentaron solamente en las piezas P1, inclinaciones entre 10-11° se presentaron en P2 (Figura 6). Xu y Walker (2004) mencionan que el ángulo mayor a 8° se caracteriza por tender a espiral en la madera juvenil. Estas clases de inclinaciones del grano presentaron valores del MOEd bajos en comparación con clases estructurales (<5°), por ejemplo en piezas cercanas a la médula (P1) inclinaciones entre 13-14° presentó una resistencia promedio de 7,82 GPa, mientras que inclinaciones entre 1-2° presentan resistencia de 10,10 GPa. Cown *et al* (1996) menciona que la resistencia presentada por efecto de la inclinación del grano sufre variaciones menores a 1,2% en inclinaciones menores a 4°, por esta razón se considera este como el límite de clasificación de la madera estructural.

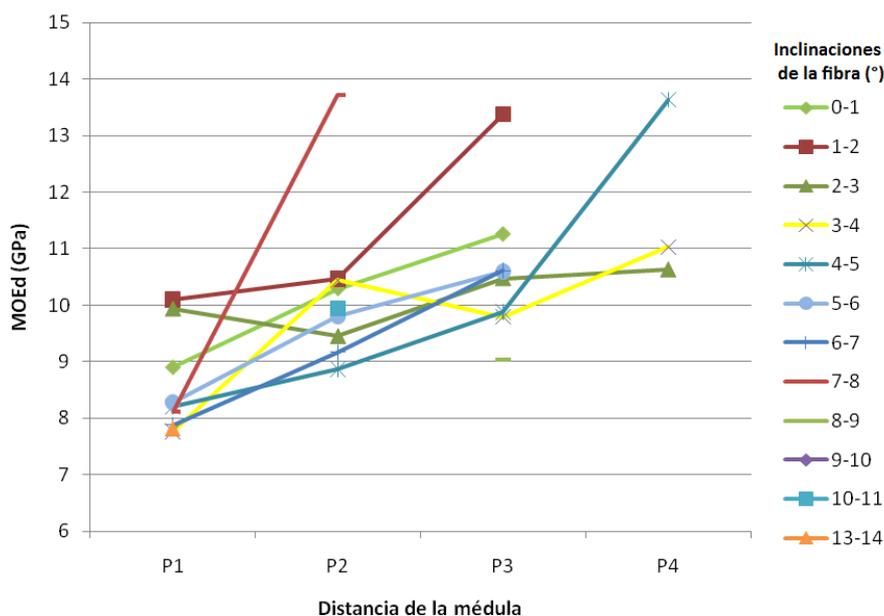


Figura 6. Comportamiento del MOEd en diámetro según inclinaciones del ángulo de la fibra en *Pinus radiata* D. Don de 27 años.

Relación de la inclinación del grano con MOEd

Existe una relación estadísticamente significativa entre la inclinación del grano y el MOEd ($p > 0,05$). Sin embargo, no existe un patrón específico entre la inclinación del grano y el MOEd

obtenido por tabla ($r^2=3,72\%$) (Figura 7). Cown *et al* (1996) reportan que el ángulo de la fibra no es influyente sobre el MOEd. Tsehaye y Walker (1996) encontraron una relación de $-0,07$ entre la madera juvenil y la inclinación del grano, valor cercano al encontrado por este estudio en madera juvenil (Figura 8a).

Las bajas correlaciones se ven afectadas por la variabilidad de las propiedades de la madera juvenil, entre ellas: paredes celulares delgadas, fibras más largas, ángulos de las microfibras, bajo contenido de celulosa y un bajo porcentaje de madera tardía (Lee y Wang, 1996; Zobel y Sprague, 1998; Bhat *et al*, 2001). Sin embargo, la relación de la inclinación del grano con el MOEd aumenta en madera madura, ($r^2=0,11$ para P3 y $r^2=0,22$ para P4), con valores similares a los reportados por Tsehaye y Walker (1996) y Lindström *et al* (2004) para piezas al 12% CH (Figura 8b).

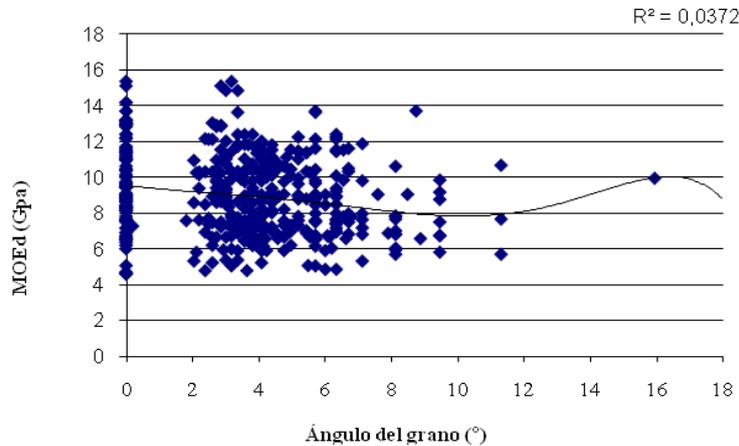


Figura 7. Relación MOEd e inclinación de la fibra para la muestra en *Pinus radiata* D. Don de 27 años.

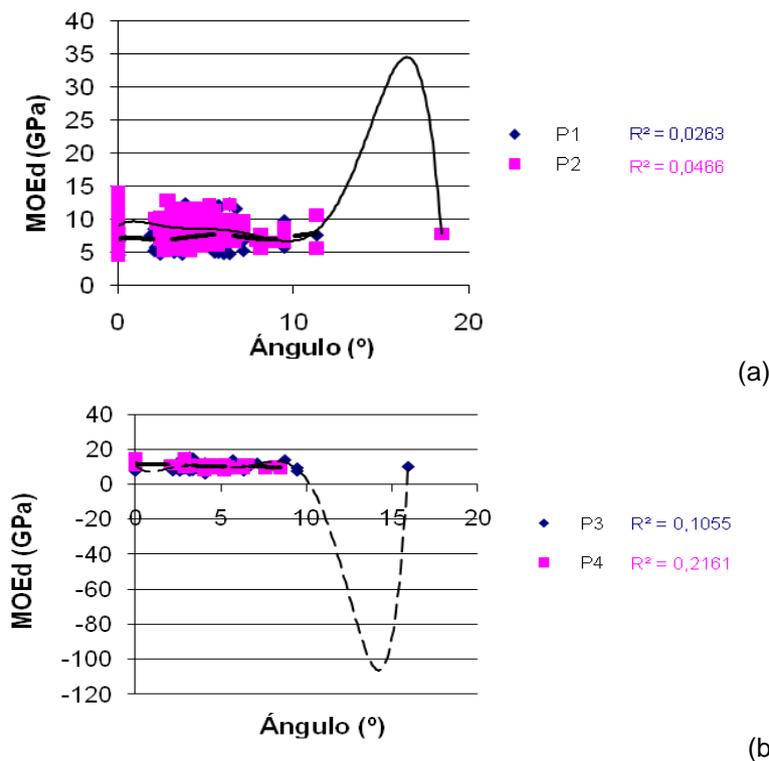


Figura 8. Relación del MOEd con la inclinación del grano para la madera juvenil (a) y madura (b) en *Pinus radiata* D. Don de 27 años.

CONCLUSIONES

En este estudio no se encontró un patrón definido de la inclinación del grano con relación a la altura, siendo esta una característica de cada individuo. Inclinaciones del grano estructurales se presentan en las piezas externas del árbol que poseen madera madura (P3 y P4) e inclinaciones del grano no estructurales (mayores a 5°) suelen ubicarse en piezas cercanas a la médula.

En las piezas denominadas P3 y P4, el MOEd aumentó en dirección de médula-corteza, con efecto contrario sobre el ángulo, el cual disminuyó conforme se acerca a la corteza. El comportamiento inverso se presentó en las piezas P1 y P2, debido al efecto de la madera juvenil.

No existe una relación significativa entre el MOEd y la inclinación del grano para la madera juvenil ni para la madera madura.

AGRADECIMIENTOS

A los integrantes de la Beca ALFA/EUFORLA, por el apoyo financiero para realizar el presente estudio, así como al Departamento de Manejo Forestal de la Universidad Austral de Chile por el apoyo académico y guía brindada, especialmente al grupo de trabajo CALIRO.

BIBLIOGRAFÍA

- ASTM (American Society for Testing and Materials, US) . 2006. Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumbe. ASTM D 245-06 . West Conhohocken, PA, US, ASTM, 16 p .
- Bhat, KM; Priya, PB; Rugmini, P. 2001. Characterization of juvenile wood in teak. Wood Science and Technology 34:517-532.
- CORMA (Corporación Chilena de la Madera, CL). 2008. Recurso forestal. Consultado 25 jul 2008. Disponible en http://www.corma.cl/portal/menu/recurso_forestal/antecedentes_generales
- Cown, DJ. 1992. New Zealand radiata pine and Douglas fir: Sustainability for processing. New Zealand, Ministry of Forestry, FRI Bulletin No. 168. 73 p.
- Cown, DJ; McConchie, DL; Young, GD. 1983. Wood properties of *Pinus radiata* var. *hondurensis* growth in Fiji. New Zealand, Ministry of Forestry, FRI Bulletin No. 128.
- Cown, DJ; Walford, B; Kimberley, MO. 1996. Cross-grain effect on tensile strength and bending stiffness of *Pinus radiata*. Structural lumber. New Zealand Journal of Forestry Science 25(2):256-262.
- Donaldson, LA. 1993. Variation in microfibril angle among three genetic groups of *Pinus radiata* trees. New Zealand Journal of Forestry Science 23(1):90-100.
- Dungey, H; Mathenson, C; Kain, D; Evans, R. 2006. Genetics of wood stiffness and its component traits in *Pinus radiata*. Canadian Journal Forestry Research 36(1):1165-1178.
- INFOR (Instituto Forestal, CL). 2006. El sector forestal chileno. (en línea). Consultado 11 abril 2008. Disponible en http://www.infor.cl/centro_documentacion/documentos_digitales/sector_forestal%20chileno2006.pdf

- Jayawickrama, K. 2000. Breeding radiata pine for wood stiffness: review and analysis. *Australian Forestry* 64(1):51-56.
- Lasserre, J; Mason, N; Watt, M. 2004. The influence of initial stocking on corewood stiffness in a clonal experiment of 11-year-old *Pinus radiata* D. Don. *New Zealand Journal of Forestry*. p.18-23. (Disponible además en http://nzif.org/free_issues/NZJF49_2_2004/828AB53E-41DA-4DCF-8BE1-F139429288B9.pdf)
- Lee, C; Wang, S. 1996. A new technique for the demarcation between juvenile and mature wood in *cryptomeria japonica*. *IAWA Journal* 17(2):125-131.
- Lindström, H; Harris, P; Sorensson, CT; Evans, R. 2004. Stiffness and wood variation of 3-year old *Pinus radiata* clones. *Wood Science Technology* 38:579-597.
- NCh992. 1972. Madera - Defectos a considerar en la clasificación, terminología y métodos de medición. Santiago, CL, Instituto Nacional de Normalización de Chile. 22 p. (Norma: NCh 992 EOf72).
- Schugalsser, K; Witztum, A. 2007. The mechanism of spiral grain formation in trees. *Wood Sci. Technol.* 41:133-156.
- Tian, X; Cown, DJ; Lausberg, JF. 1996. Modelling of *Pinus radiata* wood properties. Part 1: Spiral grain. *New Zealand Journal of Forestry Science* 25(2):200-213.
- Tsehaye, A; Walker, JCF. 1996. Spiral grain in Canterbury *Pinus radiata*: Within-and between-tree variations and effect on mechanical properties. *New Zealand Journal of Forestry Science* 25(3):358-366.
- Walker, JCF; Butterfield, BG. 1995. The importance of microfibril angle for the processing industries. *New Zealand Journal of Forestry Science* 40 (11):34-40.
- Walker, JCF; Nakada, R. 1999. Understanding corewood in some softwoods: a selective review on stiffness and acoustics. *International Forestry Review* 1(4):251-259.
- Wloch, W; Mazur, E; Beltowski, M. 2002. Formation of spiral grain in the wood of *Pinus sylvestris* L. *Trees* 16:306-312.
- Xu, P; Buchanan, AH; Walford, BG; Walker, JC. 2002. Estimating tensile strength in *Pinus radiata* structural timber. *New Zealand Journal of Forestry Science* 32(1):70-85.
- Xu, P; Walker, JCF. 2004. Stiffness gradient in radiata pine. *Wood Science Technology* 38(1):1-9.
- Zobel, BJ; Sprague, JR. 1998. Juvenil wood in forest trees. Berlin, GE, Springer-Verlag. 300 p.