

EFFECTO DE LA DENSIDAD DE PLANTACIÓN INICIAL EN EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO DE ÁRBOLES EN PIE Y TROZAS DE UNA PLANTACIÓN DE PINO RADIATA DE 28 AÑOS, EN LA ZONA DE ARENALES, CHILE

EFFECT OF INITIAL PLANTING DENSITY IN DYNAMIC MODULUS OF ELASTICITY IN STANDING TREES AND LOGS OF 28 YEARS OLD RADIATA PINE PLANTATION IN SANDY SOIL, CHILE

L. Soto¹, L. Valenzuela², J.P. Lasserre¹

RESUMEN

En un ensayo de densidad de plantación inicial (DPI), se evaluó el efecto de cuatro tratamientos (2500, 1667, 833 y 625 árb·ha⁻¹) en el módulo de elasticidad dinámico (MOE_d) de *Pinus radiata* D. Don, de 28 años, creciendo sobre un suelo de la serie Arenales, en la Región del Biobío, Chile.

El MOE_d se determinó con tecnología acústica utilizando el método de tiempo de vuelo (*Tv*) para árboles en pie y posterior a su volteo se usó el método de resonancia (*Res*) para dos trozas de 5 m de longitud (primera y segunda troza), extraídas desde la base y a lo largo del fuste de cada árbol.

La DPI no afectó significativamente el MOE_d de los tratamientos más densos (2500, 1667 y 833 árb·ha⁻¹), tanto para árboles en pie, como para las dos trozas. En cambio, el tratamiento menos denso (625 árb·ha⁻¹) presentó el mayor MOE_d, significativamente diferente en árboles en pie y la primera troza, y similar entre la primera y segunda troza.

Palabras clave: Módulo de elasticidad dinámico, Densidad de plantación inicial, *Pinus radiata*.

ABSTRACT

The influence of initial planting density (DPI) on the dynamic modulus of elasticity (MOE_d) was examined at a 28 years old *Pinus radiata* D. Don spacing experiment with four treatments (2500, 1667, 833 and 625 stem·ha⁻¹) growing on sandy soil, in the Biobío Region, Chile.

The MOE_d acoustic technology was determined using the method of time of flying (*Tv*) for standing trees and the resonance method (*Res*) for two logs of 5 m long, extracted from the tree base to the top of each tree.

MOE_d was not significantly influenced by DPI in high initial stocking treatments (2500, 1667 and 833 stem·ha⁻¹), both standing trees and logs level. In contrast, the lowest initial stocking treatment (625 stem·ha⁻¹) had the highest MOE_d, significantly different in standing trees and the first the log, and similar between the first and second log.

Keywords: Dynamic modulus of elasticity, initial planting density, *Pinus radiata*.

¹ Forestal Mininco, Casilla 43-C, Concepción, Chile.

² Laboratorio Silvotecnológico de la Madera, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Victoria 631, Concepción, Chile.

Autor para correspondencia: luis.soto@forestal.cmpc.cl

Recibido: 05.07.2011 Aceptado: 23.03.2012

INTRODUCCIÓN

La especie *Pinus radiata* se ha posicionado como la especie forestal más importante en la economía del sector forestal chileno, reflejado tanto en la extensión de sus plantaciones, como en sus procesos industriales y comerciales. Su madera, como materia prima industrial, presenta una calidad variable debido a que las propiedades y características de su madera, varían dentro del mismo fuste de un árbol (Valenzuela y Nakayama 1991a, b), así como también, para fustes de árboles creciendo en diferentes localidades geográficas de Chile, donde esta especie ha sido introducida.

El uso eficiente de la madera de *Pinus radiata*, como material estructural, no está exento de esta variabilidad, ya que el módulo de elasticidad en flexión (MOE), la propiedad mecánica más importante para estimar la calidad de la madera estructural (Walford 1985), está asociada a la rigidez del material. Por lo tanto, madera con un alto MOE es un material más rígido y, por ende, más difícil de flectar (Roth *et al.* 2007), de esta forma, altos valores de MOE significan mejor calidad de la madera para fines estructurales.

En la madera, se pueden determinar dos tipos de MOE, uno estático (MOE_e) y otro dinámico (MOE_d). Básicamente, en el primero se utiliza un dispositivo que permite aplicar una carga, registrar una deflexión dentro del rango elástico, y con las dimensiones del elemento de madera se obtiene el MOE_e , y en el segundo, se usan dispositivos que facilitan el viaje de ondas acústicas a través del elemento de madera y registran el tiempo o la velocidad de tránsito de estas ondas, que en conjunto con la densidad de la madera permiten obtener el MOE_d . Varios investigadores han determinado estos dos módulos de elasticidad en la madera, y el MOE_e en función del MOE_d ha sido muy bien correlacionado (Halabe *et al.* 1997, Wang y Ko 1998, Tsehaye *et al.* 2000, Wang *et al.* 2000, Lindström *et al.* 2002).

Durante la última década, bastante atención ha recibido la aplicación de métodos acústicos para la evaluación mecánica, tanto de árboles en pie como en trozas con fines estructurales. Estas metodologías se basan en la propagación de ondas de esfuerzos que viajan a través de una porción del fuste de un árbol o a lo largo de una troza. Los métodos más utilizados son el tiempo de vuelo (Tv) y la resonancia (Res) (Grabianowski *et al.* 2004). En el método de Tv , se controla el tiempo de viaje de una onda de esfuerzo entre dos sensores acústicos (un emisor y un receptor) ubicados a una distancia conocida (Wang *et al.* 2007a), y la velocidad se obtiene de la relación tiempo (t) / distancia (d). El método de Res permite la determinación directa de la velocidad de viaje de una onda de esfuerzo, de acuerdo a su frecuencia de resonancia en una distancia conocida (Andrews 2002). Estos métodos se utilizan en árboles en pie y trozos, para el caso de Tv , y sólo en trozos, para el método de Res .

Los métodos acústicos mencionados anteriormente, de bajo costo, permiten la evaluación no destructiva de los árboles en pie y son eficientes para la clasificación de la materia prima de los bosques (Huang *et al.* 2003). Además, estos métodos proporcionan información estratégica que puede ayudar a tomar decisiones de manejo y ambientales, en los tratamientos para los árboles individuales y rodales, mejorar las operaciones de raleo y cosecha, y asignar eficientemente los recursos madereros para la utilización óptima (Wang *et al.* 2007b).

Una aplicación exitosa de esta tecnología, ha involucrado cambios en la forma de manejo de las plantaciones. Recientes investigaciones muestran que el MOE_d de la madera juvenil de *Pinus radiata* puede ser manipulado por el manejo. En sitios individuales, se ha demostrado un aumento significativo y sustancial en el MOE_d mediante el aumento de la densidad de plantación inicial (DPI) del rodal, en ensayos de 11 (Lasserre *et al.* 2004, 2005) y 17 años (Waghorn *et al.* 2007a, b). Sin embargo, estos reportes muestran claramente la tendencia del MOE_d a igualarse, a medida que la DPI aumenta. Según Waghorn *et al.* (2007b) esto estaría indicando que, al margen de la DPI, el MOE_d de la periferia de los árboles converge con la edad, y por otro lado, el aumento de la edad

y la acumulación de madera adulta podrían generar este cambio (Lasserre *et al.* 2009). Por estas razones, probablemente, Grabianowski *et al.* (2004), no encontró diferencias significativas del MOE_d en árboles en pie de *Pinus radiata* de 27 años de edad, creciendo en densidades de plantación de 100 y 625 arb·ha⁻¹, aunque, el ensayo evaluado no contempló tratamientos de DPI, ya que las densidades de 100 arb·ha⁻¹ se obtuvieron mediante la aplicación de raleos a los 11 y 13 años de edad.

En consecuencia, de acuerdo a los reportes de Lasserre *et al.* (2005) y Waghorn *et al.* (2007b), se podría pensar que, el MOE_d de plantaciones de *Pinus radiata* tienden a equilibrarse a una edad adulta, independiente de su DPI. Sin embargo, estas plantaciones corresponden a material joven, no superior a 20 años de edad, creciendo en Nueva Zelanda. Por lo tanto, la presente investigación tuvo como objetivo general, evaluar el efecto de la DPI en el MOE_d de la madera de un ensayo de *Pinus radiata* adulto, de 28 años de edad, creciendo en Chile. Específicamente, a) evaluar el efecto de la DPI en el estado de desarrollo de los árboles, densidad verde, velocidad acústica y en el MOE_d de árboles en pie y volteados (primera y segunda troza), b) relacionar el MOE_d de trozas versus MOE_d de árboles en pie, y c) relacionar los MOE_d con las variables dendrométricas diámetro a la altura del pecho (*Dap*) y esbeltez (*Es*).

MATERIAL Y MÉTODO

Material y zona de estudio

Se muestrearon árboles de *Pinus radiata* a la edad de 28 años creciendo en un ensayo de densidad de plantación inicial (DPI) ubicado en el predio Colicheu, 15 km al noreste de la ciudad de Cabrero, Región del Biobío, Chile (latitud 36° 58' S, longitud 72° 20' O y altitud 100 m s. n. m.). Esta zona posee un clima templado cálido, con cuatro a cinco meses secos, y una precipitación promedio anual de 1.100 mm, concentrada entre los meses de mayo y agosto (Fuenzalida 1971). Las DPI evaluadas de este ensayo, se muestran en la Tabla 1.

El ensayo fue instalado en el año 1980, en un suelo de la serie Arenales, caracterizados por ser moderadamente profundos, ricos en arena (superior al 93 %), pobres en arcilla, con bajo contenido de nitrógeno y de materia orgánica. Estos suelos se presentan en forma de llanos aluviales de baja pendiente (2%) y poseen una alta tasa de infiltración y baja capacidad de campo (Carrasco *et al.* 1993).

El origen de las semillas fue desconocido para todo el rodal y al momento de la medición, los árboles de todos los tratamientos del ensayo presentaban una poda baja de 2 a 3 m de altura.

Tabla 1. Tratamientos de densidad de plantación inicial (DPI) en *Pinus radiata*.

TRATAMIENTO DPI (arb · ha ⁻¹)	DESCRIPCIÓN	
	Arreglo (m)	Espaciamiento (m ²)
2500	2 x 2	4
1667	2 x 3	6
833	3 x 4	12
625	4 x 4	16

Selección de árboles

Se seleccionaron nueve árboles por tratamiento, de forma aleatoria, desde los estratos dominantes y codominantes, por ser los árboles más representativos de un rodal. No se ejecutó ningún raleo en

alguna etapa previa del desarrollo de los árboles y, debido a la mortalidad natural en los tratamientos, la selección se realizó teniendo en consideración que cada unidad seleccionada debía estar rodeada por árboles vivos. Los árboles seleccionados se marcaron en terreno con un anillo de pintura blanca sobre el diámetro a la altura del pecho (Dap) y una línea vertical en el punto cardinal norte.

Antes de realizar las mediciones acústicas se midió el Dap , la altura total (Ht) y la calidad de los árboles (rectitud, estado fitosanitario y clasificación sociológica). Con esta información se determinó la sobrevivencia, el índice de sitio³ y la Es . La sobrevivencia y el índice de sitio se determinaron sobre la base de la totalidad de árboles por tratamiento. En cambio, la Es se obtuvo sólo de los árboles muestra, y corresponde a la razón Ht/Dap ($m \cdot m^{-1}$).

Determinación del MOE_d en árboles en pie

En árboles en pie se midió el tiempo de vuelo (Tv) de una onda acústica entre dos puntos de distancia conocida (d) y, mediante la relación d/Tv , se obtuvo la velocidad de la onda acústica (V). Con este valor, más la densidad verde (ρ) de la troza 1, se obtuvo el MOE_d mediante la expresión:

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

El Tv se midió con el instrumento portátil *Tree Sonic*, posicionando dos sensores acústicos en el fuste del árbol, a 1 m de distancia entre ellos, a partir de 0.8 m desde el piso (Figura 1a). Se realizaron dos mediciones para cada árbol, una en el punto cardinal norte del fuste (ya identificado con una línea vertical de color blanco) y la otra, en la dirección oeste. Estas mediciones se realizaron sin quitar la corteza y cada una de ellas es el resultado del promedio de tres lecturas de Tv sobre cada punto cardinal. Este mismo procedimiento, llamado método de “*Tiempo de vuelo*”, ha sido usado por varios autores (Lasserre *et al.* 2005 y 2008, Waghorn *et al.* 2007b, Mora *et al.* 2009).

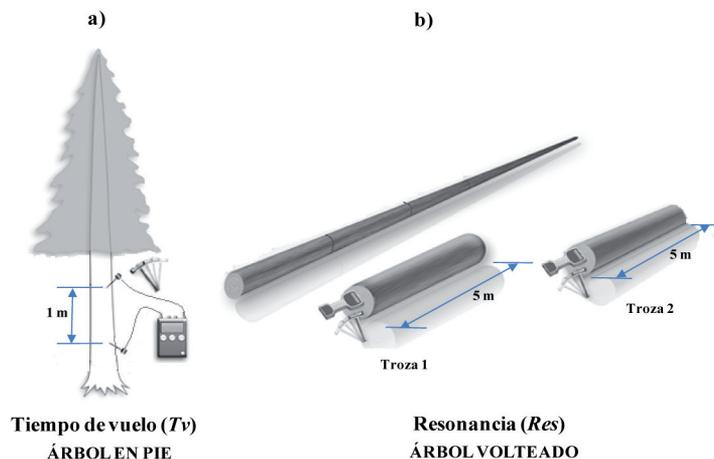


Figura 1. Medición del Tv en árboles en pie (a) y de la V acústica en trozos (b). (La figura no está a escala).

Determinación del MOE_d en trozos

Desde la base y a lo largo del fuste de cada árbol seleccionado se obtuvieron dos trozas de 5 m de longitud. En cada troza se midió directamente la V con el instrumento *Hitman*, herramienta que

³ El índice de sitio corresponde a la altura promedio de los 100 árboles más gruesos por hectárea, a la edad de 20 años.

mide la V por el llamado método de “Resonancia” (*Res*). Esta velocidad se validó al menos tres veces en la cara con mayor diámetro de cada trozo (Figura 1b). Este valor y la r de cada trozo se ingresaron directamente a la Ecuación 1, para obtener el valor de MOE_d de las trozas.

Determinación de la densidad actual

Después de realizadas las mediciones acústicas en los árboles en pie y en las trozas de los árboles, se extrajeron tres rodela ubicadas en el extremo de los trozos (0, 5 y 10 m) y una rodela en la posición del *Dap*, a 1.3 m del nivel del suelo. Cada rodela fue descortezada y pesada en terreno, luego etiquetada y, en bolsas de plástico selladas, transportadas al Laboratorio Silvotecnológico de la Madera (LSTM), en la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción. En el laboratorio se midió su volumen por desplazamiento de agua, siguiendo las recomendaciones del método B de la norma americana ASTM D-2395. Para la determinación de la ρ en las rodela se utilizó la siguiente expresión:

$$\rho = pv/vv \quad (2)$$

Donde pv y vv es el peso y volumen verde actuales de la rodela, controlados en terreno y en laboratorio, respectivamente, razón por la cual a la ρ también se le identifica como densidad actual, ya que puede variar con la estación del año y condiciones de cultivo de los árboles (Timber Advisory Notes 2005).

En esta investigación para efectos de análisis de esta variable, la ρ correspondió al promedio de los valores de las rodela a la altura de 0, 1,3 (*Dap*) y 5 m, para la primera troza, y al promedio de las rodela a los 5 y 10 m de altura, para la segunda troza.

Por otro lado, con la ρ de la primera troza se calculó el MOE_d (por *Tv*) de los árboles en pie y, con la ρ de la primera y segunda troza, se calculó el MOE_d (por *Res*) de la primera y segunda troza, respectivamente.

Determinación del porcentaje de madera tardía

El porcentaje de madera tardía se determinó en varillas de 1 x 1 cm en espesor y ancho, respectivamente, tomadas de médula a corteza, en el punto cardinal norte de los fustes, a 2,5 m de altura. Las mediciones se realizaron con la tecnología proporcionada por SilviScan-2 (Evans 2005), en el laboratorio de FPInnovations - Paprican, Vancouver, Canadá. La tecnología SilviScan se compone de un escáner celular, un densitómetro de rayos x y un difractómetro de rayos x, permitiendo el análisis de imágenes con el tamaño, tipo y distribución de células; la determinación de la densidad del material y la medición del ángulo de la microfibrilla.

Análisis de datos

Los efectos de la DPI en los parámetros de desarrollo de los árboles y en el MOE_d por *Tv* y por *Res* se determinaron mediante un análisis de varianza (andeva) y un test de comparación de medias de Tukey (con un nivel de significancia de 0.05). Todos los análisis se realizaron en SAS (SAS-Institute-Inc. 2000).

Las relaciones entre el MOE_d por *Tv* y *Res*, MOE_d entre tipos de trozas, MOE_d con el *Dap* y *Es*, se realizaron a través de análisis de regresión simple.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estado de desarrollo de los árboles asociados a los tratamientos

Se sabe que, la sobrevivencia es mayor a medida que la densidad de plantación inicial (DPI) disminuye. Los resultados muestran que esta tendencia no se encontró en los tratamientos analizados (Tabla 2), fundamentalmente, dado a que la sobrevivencia mostró estar directamente relacionada con el índice de sitio. Por lo tanto, la menor sobrevivencia encontrada en el tratamiento de 833 árb·ha⁻¹, se debe al índice de sitio notablemente más bajo. Esto permite señalar que sitios de baja productividad no soportarían densidades tan altas.

La diferencia entre índices de sitio se manifiesta en los tratamientos de menor DPI. Primeramente este índice, baja fuertemente de 24 a 21.4 m, desde el tratamiento de 1667 al de 833 árb·ha⁻¹, respectivamente, y luego sube, de 21.4 a 28.7 m desde el tratamiento de 833 al de 625 árb·ha⁻¹. Sin embargo, en suelos de arena no resulta sorprendente encontrar tanta variación en un área plana y reducida. Los suelos arenosos de la zona de estudio se caracterizan por ser altamente variables y presentar limitaciones en el crecimiento y desarrollo de las plantas, debido a la poca presencia de agua disponible (Carrasco y Millán 1990).

El efecto de la DPI en el *Dap* fue significativo ($p < 0.05$), como se muestra en la Tabla 2, donde el *Dap* aumentó a medida que la DPI disminuyó, llegando a ser un 62% mayor en el tratamiento de 625 árb·ha⁻¹ con respecto al de 2500 árb·ha⁻¹.

Tabla 2. Variables de estado (del bosque) y del tamaño de los árboles muestreados al momento de la medición (28 años de edad).

TRAT.	Parámetros de desarrollo de los Tratamientos				Características dasométricas de la muestra						
	DPI (árb·ha ⁻¹)	N (árb·ha ⁻¹)	Sobrevivencia (%)	Índice de Sitio (m)	n (árb)	<i>Dap</i> (cm)		<i>Ht</i> (m)		<i>Es</i> (m·m ⁻¹)	
						$p < 0.0001$		$p < 0.0001$		$p < 0.0001$	
						<i>Dap</i> (cm)	Tukey	<i>Ht</i> (m)	Tukey	<i>Es</i> (m·m ⁻¹)	Tukey
2500	1749	70%	24.4	9	23.9 ±2.4	A	27.1 ±2.2	A	113.9 ±7.36	A	
1667	1136	68%	24.0	9	27.4 ±2.6	B	28.4 ±2.5	A	104.0 ±5.74	B	
833	520	62%	21.4	9	31.6 ±2.4	C	25.7 ±3.9	A	81.4 ±9.42	C	
625	541	87%	28.7	9	38.3 ±4.1	D	34.4 ±1.3	B	90.4 ±8.31	D	

N corresponde a la cantidad de árboles vivos por hectárea presentes en el rodal al momento de la evaluación.

n corresponde a la cantidad de árboles muestreados por tratamiento.

Cada valor mostrado de *Dap*, *Ht* y *Es* corresponde al promedio por tratamiento, seguido por la *Desviación Estándar*. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Por otro parte, la *Ht* presentó un comportamiento totalmente ajeno a lo esperado, donde esta variable de estado no fue afectada estadísticamente por la DPI en los tres primeros tratamientos (2500, 1667 y 833 árb·ha⁻¹), como se puede apreciar en la Tabla 2. Sin embargo, la *Ht* del tratamiento de menor DPI fue estadísticamente diferente de los otros tres tratamientos de mayor DPI. Esto probablemente es consecuencia de la calidad del sitio, lo cual también se reflejó en los porcentajes de sobrevivencia, como fuera anteriormente mencionado.

En relación con la *Es* de los árboles, esta disminuyó a medida que la DPI se hizo menor, con diferencias estadísticamente significativas entre los cuatro tratamientos, como se muestra en la tabla 2. Sin embargo, la DPI de 833 árb·ha⁻¹ presentó un menor valor que la DPI de 625 árb·ha⁻¹. La razón de esta diferencia se debe a la baja *Ht* que presentaron los árboles muestreados para este tratamiento.

Comportamiento de la ρ

De acuerdo a la Tabla 3, la ρ aumentó con la disminución de la DPI de 2500 a 625 $\text{árb}\cdot\text{ha}^{-1}$, tanto para la primera como para la segunda troza, con diferencias significativas entre los tratamientos más densos (2500 y 1667 $\text{árb}\cdot\text{ha}^{-1}$) y el menos denso (625 $\text{árb}\cdot\text{ha}^{-1}$). Este aumento en la ρ se puede deber a cambios en la micro estructura de la madera, relacionado con el tamaño de las traqueidas (Panshin y De Zeeuw 1980). Al respecto, Sandoval (2011), trabajando con los mismos tratamientos y árboles, determinó un aumento de la porosidad de la madera con la disminución de la DPI. Esto significa que, para un mismo volumen de madera, al disminuir la DPI la cantidad de agua aumenta (Ecuación 2).

Cabe también señalar que en cada tratamiento, la ρ fue menor en la segunda troza con respecto a la primera. Sin embargo, sólo fue estadísticamente diferente para el tratamiento de 625 $\text{árb}\cdot\text{ha}^{-1}$ ($p=0.0472$).

Los resultados de la r presentados en la tabla 3, no dejan de ser interesantes, dado a que varios autores, para determinar el MOE_p , ya sea en trozas o en árboles en pie, asumen un valor de la ρ constante, igual a 1000 Kg/m^3 (Watt *et al.* 2009); o calculan el promedio de los valores obtenidos por árbol y lo usan como una ρ constante para el rodal (Lasserre *et al.* 2005 y 2008, Waghorn *et al.* 2007b); o, simplemente, usan sólo la V ó V^2 para evaluar tratamientos silviculturales (Chauhan y Walker 2006, Grabionowski *et al.* 2006, Toulmin y Raymond 2007). Sin embargo, los valores de ρ obtenidos en este estudio (Tabla 3), indican que dichas decisiones se deberían limitar sólo a los casos en que se tenga plena certeza que ésta no está afectada por los tratamientos silviculturales.

Tabla 3. Resultados de la ρ , medida en las trozas 1 y 2, y de la V , en árboles en pie y trozas.

Densidad verde (ρ y Velocidad acústica (V) obtenida por T_v y Res)										
TRAT.	ρ				V por T_v		V por Res			
	árb. en pie y troza 1		troza 2		árb. en pie		troza 1		troza 2	
DPI	$p = 0.0006$		$p = 0.0037$		$p < 0.0010$		$p = 0.0724$		$p = 0.0432$	
	ρ	Tukey	ρ	Tukey	V	Tukey	V	Tukey	V	Tukey
($\text{árb}\cdot\text{ha}^{-1}$)	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)		($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)		(kms^{-1})		(kms^{-1})		(kms^{-1})	
2500	0.82 \pm 0.06	A	0.78 \pm 0.07	A	3.76 \pm 0.30	A	3.18 \pm 0.15	A	3.36 \pm 0.15	A
1667	0.83 \pm 0.05	A B	0.80 \pm 0.06	A B	3.61 \pm 0.20	A	3.11 \pm 0.18	A	3.30 \pm 0.17	A B
833	0.87 \pm 0.03	B C	0.85 \pm 0.04	B C	3.67 \pm 0.17	A	2.99 \pm 0.23	A	3.14 \pm 0.17	B
625	0.91 \pm 0.04	C	0.87 \pm 0.04	C	4.04 \pm 0.19	B	3.20 \pm 0.14	A	3.28 \pm 0.12	A B

Cada valor mostrado de ρ y V corresponde al promedio por tratamiento, seguido por la *Desviación Estándar*. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Velocidad acústica de árboles en pie y trozas

La velocidad acústica en los árboles en pie no fue influenciada por la DPI, para los tres tratamientos más densos (Tabla 3). Sin embargo, el tratamiento de menor DPI (625 $\text{árb}\cdot\text{ha}^{-1}$), muestra la velocidad más alta y estadísticamente diferente a los otros tres tratamientos.

Para el caso de los trozos (V obtenida por Res), en la troza 1, el tratamiento con DPI 625 $\text{árb}\cdot\text{ha}^{-1}$ también presenta el mayor valor, pero sin diferencias significativas con los demás. En la troza 2 en cambio, la DPI 2500 $\text{árb}\cdot\text{ha}^{-1}$ es el tratamiento de mayor V , y estadísticamente diferente solo del tratamiento de 833 $\text{árb}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Las velocidades obtenidas por T_v fueron mayores que las obtenidas por Res , ya que en las primeras la trayectoria de vuelo entre dos puntos es en la madera adulta periférica, mientras que en la velocidad por Res , se está evaluando la sección transversal promedio ponderada, que incluye

además la madera juvenil y la corteza (Grabianowski *et al.* 2006).

Así mismo, investigaciones anteriores muestran que velocidades medidas por T_v superan entre 9% y 30% a la velocidades medidas por Res (Andrews 2000 y 2003, Chauhan 2004, Chauhan y Walker 2006). Por consiguiente, los resultados presentados en la Tabla 3, son consistentes con los de dichas investigaciones. En efecto, los valores de V determinados por T_v presentados en dicha tabla, son un 18%, 16%, 23% y 26%, mayores que los obtenidos por el método de Res , para las DPI de 2500, 1667, 833 y 625 $\text{árb}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivamente.

MOE_d en árboles en pie y en trozas

El MOE_d de los árboles en pie (por T_v) no fue afectado por el aumento de la DPI en los tres tratamientos más densos (2500, 1667, 833 $\text{árb}\cdot\text{ha}^{-1}$), aunque la diferencia la marcó el tratamiento de menor DPI (625 $\text{árb}\cdot\text{ha}^{-1}$), como se puede apreciar en Tabla 4.

Tabla 4. MOE_d de los árboles en pie y de la primera y segunda troza de los árboles volteados.

MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO SEGÚN MÉTODO DE T_v y Res						
TRAT.	T_v		Res			
	árboles en pie		troza 1		troza 2	
DPI ($\text{árb}\cdot\text{ha}^{-1}$)	$p < 0.0001$		$p = 0.0133$		$p = 0.1164$	
	MOE_d (GPa)	<i>Tukey</i>	MOE_d (GPa)	<i>Tukey</i>	MOE_d (GPa)	<i>Tukey</i>
2500	11.7 \pm 2.4	A	8.3 \pm 1.2	A B	8.7 \pm 1.3	A
1667	10.7 \pm 1.3	A	8.0 \pm 1.1	A	8.5 \pm 1.0	A
833	11.7 \pm 1.1	A	7.8 \pm 1.1	A	8.3 \pm 0.8	A
625	15.1 \pm 1.8	B	9.4 \pm 1.0	B	9.4 \pm 0.8	A

Cada valor de MOE_d mostrado corresponde al promedio por tratamiento, seguido por la *Desviación Estándar*. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

En la troza 1 el MOE_d no se diferenció estadísticamente en los tres tratamientos más densos (2500, 1667, 833 $\text{árb}\cdot\text{ha}^{-1}$), como se muestra en Tabla 4, pero mostró una tendencia a decrecer con la disminución de la DPI. Sin embargo, en el tratamiento de menor DPI esta tendencia se rompe, siendo el MOE_d de este tratamiento, más alto y diferente estadísticamente a los tratamientos de 833 y 1667 $\text{árb}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Con respecto a la troza 2, se encontró que estadísticamente, el MOE_d no difiere entre tratamientos por efecto del aumento o disminución de la DPI (Tabla 4). Sin embargo, el MOE_d de la troza 2 tuvo el mismo comportamiento que en la troza 1.

Otros investigadores han encontrado un aumento del MOE_e y MOE_d con el aumento de la densidad del rodal para diferentes especies. Wang y Ko (1998) reportan un aumento del MOE_e y MOE_d con el aumento de la densidad del rodal en un ensayo de DPI de 41 años de edad, en *Cryptomeria japonica*. Los mismos resultados son reportados por Chuang y Wang (2001) para un ensayo con *Cryptomeria japonica* de 47 años de edad, y Wang *et al.* (2001) para *Tsuga heterophylla* y *Picea sitchensis*, de 38 a 70 años de edad, en un ensayo de cuatro intensidades de raleo. Investigaciones referidas a la especie *Pinus radiata* de 11 y 17 años de edad, realizadas por Lasserre *et al.* (2005) y por Waghorn *et al.* (2007b), respectivamente, reportan también un aumento del MOE_d con el aumento de la DPI del

rodal. Sin embargo, Soto *et al.* (datos sin publicar) encontraron un comportamiento contrario a los descritos anteriormente, en un ensayo de poda y raleo de *Pinus radiata* de 32 años, creciendo en un suelo arcilloso, cercano a la ciudad de Mulchén, Región del Biobío, donde en tratamientos con un solo raleo a los ocho años, con densidades finales de 200, 400, 600 y 800 árb-ha⁻¹, el MOE_d por Tv creció a medida que disminuyó la densidad residual del rodal, de 15,4 a 19,1 GPa.

Aunque de acuerdo al párrafo anterior, el efecto de la DPI en el MOE_d es contradictorio para la especie *Pinus radiata*, en esta investigación, con el incremento de la DPI, las características dasométricas de los árboles aumentaron y/o disminuyeron (Tabla 2) y el MOE_d tanto para árboles en pie como para las trozas, no mostró un comportamiento definido de aumentar o disminuir. Esto se explica por el efecto que tiene la DPI en el comportamiento de las variables *r* y *V* (Tabla 3), que componen la Ecuación 1, para determinar el MOE_d. En este caso, con la disminución de la DPI incrementó la *r*, tanto para la troza 1 como para la troza 2, pero la *V*, obtenida por Tv y Res, no fue afectada claramente por la DPI. Por lo tanto, el producto de *r* con *V*², entregó un MOE_d por Tv casi constante para los tratamientos de 2500, 1667 y 833 árb-ha⁻¹, y un MOE_d por Res, tanto para la troza 1 como para la troza 2, levemente decreciente con la disminución de la DPI en estos mismos tratamientos, pero sin diferencias significativas entre sí. Sin embargo, el tratamiento de 625 árb-ha⁻¹ presentó un MOE_d por Tv y Res, notablemente mayor al resto y similar entre las trozas 1 y 2 de dicho tratamiento.

Con respecto al MOE_d obtenido para las trozas, siempre el MOE_d de la segunda troza fue mayor que el de la primera, como se puede comparar en la Tabla 4. Xu y Walker (2004), trabajando con *Pinus radiata* de 27 años, reportan los mismos resultados. Ellos atribuyen esta diferencia al efecto del ángulo de la microfibrilla (AMF) en la rigidez de la madera. En este ensayo, el AMF fue medido de médula a corteza (sobre 23.000 traqueidas) por Araya (2010), en los mismos árboles usados en esta investigación, a 0, 5 y 10 m de altura. Los resultados mostraron, que para los cuatro tratamientos, siempre el AMF disminuyó desde la base hasta los 10 m de altura en los fustes. Por lo tanto, la suposición de Xu y Walker (2004) tendría asidero.

MOE_d en trozas versus MOE_d de árboles en pie

El MOE_d de la troza 1 y 2 se correlacionó positivamente con el MOE_d de los árboles en pie, como se muestra en la Figura 2, con ambas relaciones significantes al 1% del nivel de confianza.

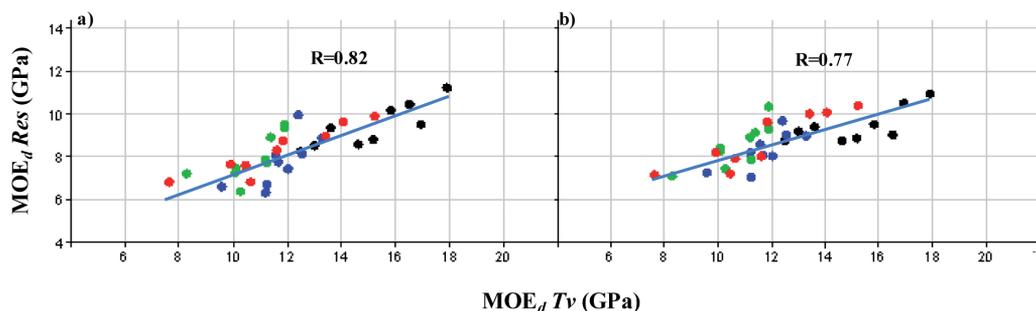


Figura 2. Relación entre el MOE_d por Tv y el MOE_d por Res, para la troza 1 (a) y la troza 2 (b), según DPI (●: 2500; ●: 1667; ●: 833 y ●: 625).

Estos resultados son coincidentes con otras investigaciones que reportan un alto grado de correlación entre el MOE_d por Tv para árboles en pie y el MOE_d por Res para trozas basales de 5 m (Chauhan y Walker 2006, Mora *et al.* 2009). Sin embargo, en la literatura revisada no se encontraron investigaciones que relacionen el MOE_d por Tv para árboles en pie con el MOE_d por Res para la

segunda troza, por lo tanto, este resultado toma importancia cuando, por el manejo silvicultural dado al bosque, el objetivo de la primera troza no es con fines estructurales.

Relación del MOE_a de árboles en pie y de la troza 1 con el Dap

El Dap presentó una relación positiva con el MOE_a de los árboles en pie (Figura 3a), sin embargo sólo explicó un 31 % de su variación. La relación con el MOE_a de la troza 1 también fue positiva (Figura 3b), pero sólo un 9% de esta variación fue explicada por el Dap .

Este aumento del MOE_a a medida que crece el Dap , tanto para árboles en pie como para la troza 1 (Figura 3 a y b), es contrario a los resultados presentados en diversas investigaciones. Varios estudios reportan un aumento del MOE_a con el aumento de la densidad del rodal y, asocian este aumento, a reducciones en el diámetro del fuste (Zhang 1995, Zhang *et al.* 2002, Lasserre *et al.* 2005, Chauhan y Walker 2006). Zhang (1995) observó que dentro de un rodal los árboles más grandes, resultantes de altas tasas de crecimiento, por lo general, producen madera de baja rigidez. Chauhan y Walker (2006) sostienen que para árboles de la misma edad, individuos de crecimiento lento tienden a tener una alta rigidez en la periferia por el efecto de la fuerza del viento y el peso de la copa.

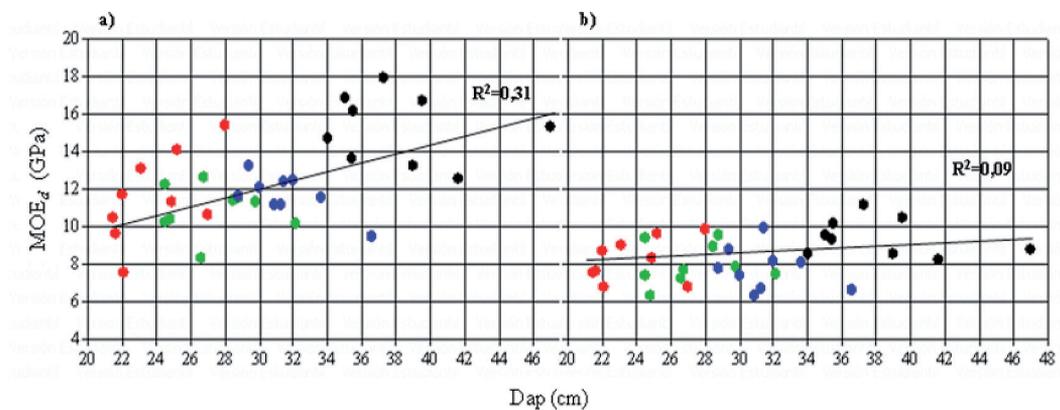


Figura 3. Relación entre el Dap y el MOE_a , según el método de Tv para árboles en pie (a) y el método de Res para la primera troza (b), para todas las DPI (●: 2500; ●: 1667; ●: 833 y ●: 625).

Dickson *et al.* (2004) relacionaron el Dap de *Pinus radiata* de 30 años con el MOE_e de piezas de madera de tamaño estructural, de madera juvenil (MJ) y madera adulta (MA). Estos autores concluyen que el Dap , como una medida del tamaño del árbol, influye en el MOE_e del trozo sólo cuando se relaciona con la MJ y MA, por separado. Sin embargo, estas relaciones siguen siendo negativas, es decir, con el aumento del Dap disminuye el MOE_e , no obstante, ameritan una validación de los resultados del presente estudio a través de la determinación del MOE_e por tipo de madera.

Por otra parte, Lasserre *et al.* (2005), indican como posible explicación de esta relación inversa entre el Dap y el MOE_a , la variación en el porcentaje de madera tardía entre los árboles de diámetros altos y bajos. Chuang y Wang (2001) informan que árboles de mayor diámetro tienen un menor porcentaje de madera tardía y menor densidad, que árboles con un diámetro más bajo. Por consiguiente, dado que las fibras de madera tardía son más rígidas que las de madera temprana (Cramer *et al.* 2005), la baja incidencia de la madera tardía en los árboles más grandes podría explicar la baja rigidez observada dentro de estos árboles.

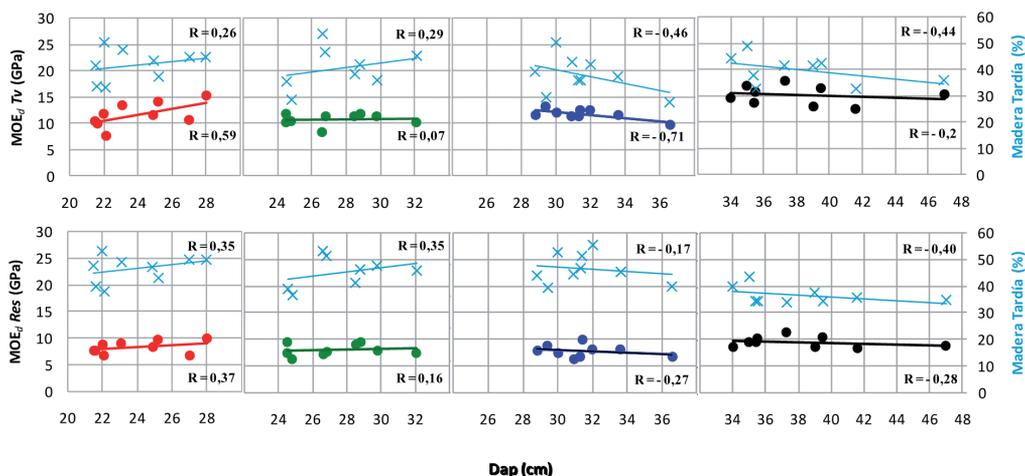


Figura 4. Relación del *Dap* con el MOE_d (por *Tv* para árboles en pie y por *Res* para la troza 1) y el porcentaje de madera tardía, para cada una de las DPI (●:2500;●:1667;●:833 y ●:625).

En la Figura 4 se muestra por separado, para cada DPI, la relación entre el *Dap* y el MOE_d por *Tv* y la relación entre el *Dap* y el MOE_d por *Res*. En ambos casos, en el eje ubicado a la derecha de la figura, se incorporó el porcentaje de madera tardía. Para relacionar con el MOE_d por *Tv*, el porcentaje de madera tardía se promedió para los 5 cm de la periferia del fuste, en el punto cardinal norte. En cambio, para correlacionar con el MOE_d por *Res*, el porcentaje de madera tardía se promedió para todo el radio norte de la sección transversal del fuste. En esta figura se puede observar que en general el MOE_d y el porcentaje de madera tardía de los dos tratamientos de mayor DPI (2500 y 1667 arb·ha⁻¹) presentaron una relación positiva con el *Dap*, es decir, el MOE_d (por *Tv* y *Res*) y el porcentaje de madera tardía, aumentaron a medida que aumentó el *Dap*, aunque con una respuesta muy débil por parte del MOE_d del tratamiento de 1667 arb·ha⁻¹. Sin embargo, para los dos tratamientos de menor DPI (833 y 625 arb·ha⁻¹) esta relación con el MOE_d (por *Tv* y *Res*) y con el porcentaje de madera tardía se hizo inversa, disminuyendo ambas variables a medida que aumentó el *Dap*.

Por lo tanto, en cada tratamiento el porcentaje de madera tardía estaría explicando el comportamiento del MOE_d por *Tv* y por *Res*, a medida que crece el *Dap* (Figura 4). Así, para los tratamientos menos densos, este comportamiento inverso al tamaño de los árboles, se explicaría por lo señalado por Chuang y Wang (2001), quienes sostienen que en rodales de igual edad, árboles de rápido crecimiento, y por ende de mayores *Dap* y anchos anillos de crecimiento, tendrán un menor porcentaje de madera tardía.

En consecuencia, las relaciones a nivel de tratamientos, mostradas en la Figura 4, permiten conceptuar el vínculo entre el *Dap* el MOE_d por *Tv* y por *Res* (Figura 3 a y b), como una “pseudorelación”. Por otra parte, por la restricción de agua disponible (Carrasco *et al.* 1993) y veranos secos presentes en el área estudiada (Fuenzalida 1971), los árboles de los tratamientos con alta DPI pueden haber sido más afectados durante el verano que aquellos de baja DPI, dejando de crecer antes debido a la falta de agua.

Relación entre el MOE_d de árboles en pie y la *Es*

La *Es* observada en este estudio (Tabla 2), en general muestra un descenso a nivel de promedios, a medida que disminuye la DPI. En la Figura 5 se puede observar que la relación entre la *Es* y el MOE_d fue levemente al descenso, cuando se consideraron todos los tratamientos. Sin embargo, a nivel de

DPI, resultaron diversas tendencias asociadas a los tratamientos.

Waghorn *et al.* (2007b), sostienen que la Es puede ser más importante que el diámetro del fuste en la regulación del MOE_d , particularmente a altas densidades de rodal. En la especie *Pinus radiata*, dado a que es una especie exigente en luz, esto significa, que al crecer bajo competencia, prioriza un rápido crecimiento en altura, a expensas del crecimiento en diámetro, para así, asegurar no ser dominados por árboles vecinos.

Así, varios estudios informan sobre el efecto de la Es del fuste en el MOE_d medido en ensayos de espaciamiento, tanto para *Pinus radiata* (Waghorn *et al.* 2007b, Lasserre *et al.* 2008) como para *Pinus taeda* (Roth *et al.* 2007). Todos estos autores reportan relaciones positivas entre la Es y el MOE_d , a medida que aumenta la DPI. Sin embargo, estos reportes se basan en edades entre 11 y 17 años para *Pinus radiata* y de 6 años para *Pinus taeda*.

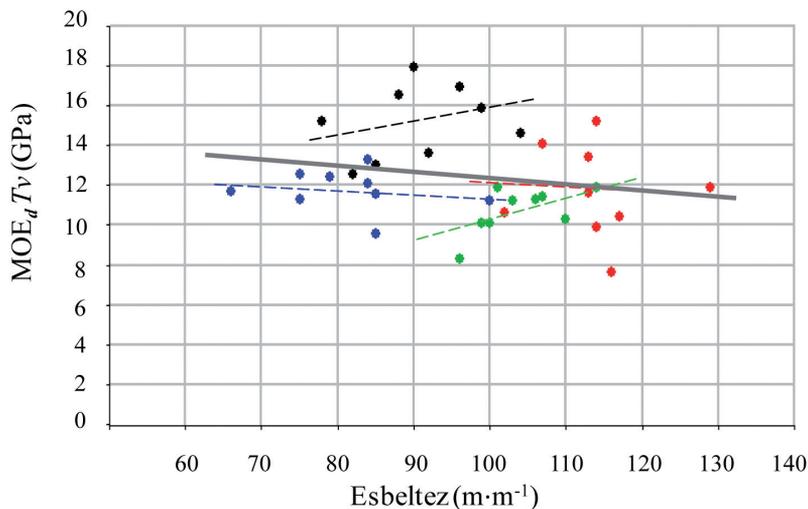


Figura 5. Relación entre la Es (Ht/Dap) y el MOE_d obtenido por Tv , para árboles en pie, para cada DPI (●: 2500; ●: 1667; ●: 833 y ●: 625).

Waghorn *et al.* (2007b) y Lasserre *et al.* (2008) sostienen que la estrecha relación positiva observada entre la Es del fuste y el MOE_d ocurre porque árboles que crecen en rodales muy densos, con una alta Es , requieren alto MOE para mitigar la posibilidad de quebrarse a través de su mismo peso. Bajo este contexto se puede pensar que este efecto ocurre hasta que los árboles alcanzan su estabilidad, o el AMF tiende a estabilizarse, lo que explicaría el efecto poco claro observado en los resultados del presente estudio para *Pinus radiata* de 28 años (Figura 5).

Por otra parte, varios autores puntualizan que, además de la Es del fuste, la altura del comienzo de la copa viva de los árboles también se relaciona positivamente con el MOE_d y varía con la DPI del rodal (Waghorn *et al.* 2007b, Mason 2006, Watt *et al.* 2006 y 2009), aunque en este estudio, dicha variable no se consideró.

CONCLUSIONES

Basado en los resultados obtenidos para este estudio de *Pinus radiata* creciendo en un suelo arenoso, se concluyó lo siguiente:

El *Dap* y la *Es* resultaron afectadas por todas las DPI. Con la reducción de la DPI, el *Dap* aumentó y la *Es* disminuyó. Sin embargo, la *Ht* del tratamiento de menor DPI, resultó diferente de los otros tres tratamientos de mayor DPI.

La ρ aumentó con la disminución de la DPI de 2500 a 625 árb·ha⁻¹, pero, para una misma DPI, la ρ fue menor en la segunda troza, con respecto a la primera.

En general, la *V* no fue influenciada por la DPI, sin embargo, el tratamiento de menor DPI (625 árb·ha⁻¹) mostró la mayor *V*, tanto para árboles en pie como para la primera troza.

El MOE_a por *Tv* y por *Res*, no fue afectado por la DPI en los tres tratamientos más densos (2500, 1667 y 833 árb·ha⁻¹). Sin embargo, en el tratamiento menos denso (625 árb·ha⁻¹) resultó el mayor MOE_a, tanto por *Tv* como por *Res*, aunque similar entre las trozas 1 y 2.

El MOE_a de la troza 1 y 2 se correlacionó positivamente con el MOE_a de los árboles en pie.

La relación entre el *Dap* y el MOE_a por *Tv* y por *Res*, fue positiva para los tratamientos de mayor DPI (2500 y 1667 árb·ha⁻¹) y negativa para los de menor DPI (833 y 625 árb·ha⁻¹). Este comportamiento fue explicado por la misma variación experimentada por el porcentaje de madera tardía en función del *Dap*.

La relación entre la *Es* y el MOE_a por *Tv* fue negativa, aunque a nivel de tratamientos mostró diversas tendencias.

BIBLIOGRAFÍA

Andrews, M. 2000. Where we are withsonics? In: Workshop 2000. Capturing the Benefits of Forestry Research: Putting Ideas to Work. Wood Technology Research Centre, University of Canterbury. pp. 57-61.

Andrews, M. 2002. Wood quality measurement – son et lumiere. *New Zealand Journal Forestry* 47(3): 19-21.

Andrews, M. 2003. Which acoustic speed? In: Beall, F.C. (Editor). Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, August 19-21, 2002. University of California, Richmond. pp. 159-165.

Araya, D. 2010. Efecto del espaciamiento inicial de plantación sobre el ángulo microfibrilar en *Pinus radiata* D. Don de 28 años de edad. Tesis Ing. Forest. Universidad de Concepción, Chile. 34 p.

ASTM. American Society for Testing and Materials. 1998. Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood-Based Materials . ASTM D-2395. Annual Book of ASTM Standards. Section 4, Construction vol 0410 Wood. Easton. 666 p.

Carrasco, P.; Millán, J. 1990. Proyecto Suelos Forestales de la VIII Región. Informe Final. Convenio Universidad de Concepción y Ministerio de Agricultura, Fondos de Investigación Agropecuaria (F.I.A.). Chillán. 127 p.

Carrasco, P.; Millán, J.; Peña, L. 1993. Suelos de la cuenca del río Bío-Bío. Características y problemas de uso. Gestión de recursos hídricos de la cuenca del río Bío-Bío y del área costera adyacente. Serie Análisis Territorial. Ed. Universitaria de Concepción. 107 p.

Chauhan, S. 2004. Selecting and/ or processing Wood according to its processing characteristics. PhD Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. 206 p.

Chauhan, S.; Walker, J. 2006. Variations in acoustic velocity and density with age, and their interrelationships in radiata pine. *Forest Ecology and Management* 229: 388-394.

Chuang, S.; Wang, S. 2001. Evaluation of standing tree quality of Japanese cedar grown with different spacing using stress-wave and ultrasonic-wave method. *Journal of Wood Science* 47: 245-253.

Cramer, S.; Kretschmann, D.; Lakes, R.; Schmidt, T. 2005. Earlywood and latewood elastic properties in loblolly pine. *Holzforschung* 59: 531-538.

Dickson, R.; Mathesona, A.C.; Joe, B.; Ilic, J.; Owen, J.V. 2004. Acoustic Segregation of *Pinus radiata* logs for sawmilling. *New Zealand Journal of Forestry Science* 34(2): 175-189.

Evans, R. 2005. Wood stiffness by x-ray diffractometry. In: Stokke D. and L. Groom. (Editores). Workshop 2003. Characterisation of the cellulosic cell wall, Chapter 11. Grand Lake, Colorado, USA. pp. 1-7.

Fuenzalida, H. 1971. Clima: Geografía económica de Chile. Texto refundido. Corporación de Fomento de la producción. Santiago, Chile. pp. 99-152.

Grabianowski, M.; Manley, B.; Walker, J. 2004. Impact of stoking and exposure on outer wood acoustic properties of *Pinus radiata* in Eyrewell Forest. *New Zealand Journal of Forestry* 49(2): 13-17.

Grabianowski, M.; Manley, B.; Walker, J. 2006. Acoustic measurements on standing trees, logs and Green lumber. *Wood Science and Technology* 40: 205-216.

Halabe, U.B.; Bidigalu, G.M.; GangaRao, H.V.S.; Ross, R. 1997. Nondestructive evaluation of Green Wood using stress wave and transverse vibration techniques. *Materials Evaluation* 55(9): 1013-1018.

Huang, C.; Lindstrom, H.; Nakada, R.; Ralston, J. 2003. Cell wall structure and Wood properties determined by acoustic- a selective review. *Holz als Roh-undWerkstoff* 61: 321-335.

Lasserre, J.P.; Mason, E.; 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 Forestry* 49: 18-23.

Lasserre, J.P.; Mason, E.; Watt, M. 2005. The effects of genotype and spacing on *Pinus radiata* (D. Don) corewood stiffness in an 11-year old experiment. *Forest Ecology and Management* 205: 375-383.

Lasserre, J.P.; Mason, E.; Watt, M. 2008. Influence of the main and interactive effects of site, stand density and clone on *Pinus radiata* D. Don corewood modulus of elasticity. *Forest Ecology and Management* 255: 3455-3459.

Lasserre, J.P.; Mason, E.; Watt, M.; Moore, J. 2009. Influence of initial planting spacing and genotype on micro fibril angle, Wood density, fibre properties and modulus of elasticity in *Pinus radiata* D. Don corewood. *Forest Ecology and Management* 258: 1924-1931.

Lindström, H.; Harris, P.; Nakada, R. 2002. Methods for measuring stiffness of Young trees. *Holz als Roh-und Werkstoff* 60: 165-174.

Mason, E. 2006. Interactions between influences of genotype and grass competition on growth and wood stiffness of juvenile radiata pine in a summer-dry environment. *Canadian Journal of Forest Research* 36(10): 2454-2463.

Mora, C.R.; Schimleck, L.R.; Isik, F.; Mahon Jr., J.M.; Clark III, A.; Daniels, R.F. 2009. Relationships between acoustic variables and different measures of stiffness in standing *Pinus taeda* trees. *Canadian Journal of Forest Research* 39: 1421-1429.

Panshin, A.J.; De Zeeuw, C. 1980. Text book of Wood Technology. 4th edition. McGraw-Hill BookCo. New York. 722 p.

Roth, B.; Li, X.; Huber, D.; Peter, G. 2007. Effects of management intensity, genetic stand planting density on Wood stiffness in a plantation of juvenile loblolly pine in the south eastern USA. *Forest Ecology and Management* 246: 155-162.

Sandoval, L. 2011. Efecto del espaciamento inicial en la densidad de la pared celular y la porosidad de la madera de *Pinus radiata* D. Don. Tesis Ing. Forest. Universidad de Concepción, Chile. 54 p.

Soto, L.; Valenzuela, L.; Lasserre, J.P. Módulo de elasticidad de árboles en pie de *Pinus radiata* creciendo a distintas densidades residuales de raleo. Sin publicar.

SAS Institute Inc. 2000. SAS/STAT User's Guide: Version 8, vol. 1-3. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, p. 3884.

Timber Advisory Notes. 2005. Background Information [en línea]. Disponible en <http://www.agric.wa.gov.au/PC_92548.html?s=0> [consultado en marzo de 2012].

Toulmin, M. J.; Raymond, C.A. 2007. Developing a sampling strategy for measuring acoustic velocity in standing *Pinus radiata* using the Tree Tap time off light tool. *New Zealand Journal of Forestry Science* 37(1): 96-111.

Tschaye, A.; Buchanan, A.H.; Walker, J. 2000. Sorting of logs using acoustics. *Wood Science and Technology* 34(4): 337-344.

Valenzuela, L.; Nakayama, Y. 1991a. The bending work of radiata pine grown in Chile. *Mokuzai Gakkaishi* 37(5): 396-404.

Valenzuela, L.; Nakayama, Y. 1991b. Predicting MOR of radiata pine grown in Chile, efficiency of some nondestructive parameters. *Mokuzai Kogyo* 46(5): 213-219.

Waghorn, M.J.; Mason, E.; Watt, M. 2007a. Influence of initial stand density and genotype on longitudinal variation in modulus of elasticity for 17-year-old *Pinus radiata*. *Forest Ecology and Management* 252: 67-72.

Waghorn, M.J.; Watt, M.; Mason, E. 2007b. Influence of tree morphology, genetics, and initial stand density on outer Wood modulus of elasticity of 17-year-old *Pinus radiata*. *Forest Ecology and Management* 244: 86-92.

Walford, G. 1985. The mechanical Properties of New Zealand-grown Radiata Pine for Export to Australia. FRI Bulletin N° 93. Forest Research Institute, New Zealand Forest Service.

Wang, S.Y.; Ko, C.Y. 1998. Dynamic modulus of elasticity and bending properties of large beams of Taiwan-grown Japanese cedar from different plantation spacing sites. *Journal of Wood Science* 44: 62-68.

Wang, X.; Ross, R.; McClellan, M.; Barbour, R.; Erickson, J.; Forsman, J.; McGinnis, G. 2000. Strength and stiffness assessment of standing trees using a nondestructive stress wave technique. Forest Products Laboratory. Research Paper FPL-RP-585. 9 p.

Wang, X.; Ross, R.; McClellan, M.; Barbour, R.; Erickson, J.; Forsman, J.; McGinnis, G. 2001. Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. *Wood and Fiber Science* 33(4): 522-533.

Wang, X.; Ross, R.; Carter, P. 2007a. Acoustic evaluation of Wood quality in standing trees. Part 1. Acoustic wave behavior. *Wood and Fiber Science* 39(1): 28-38.

Wang, X.; Carter, P.; Ross, R.; Brashaw, B. 2007b. Acoustic assessment of wood quality of raw forest materials- a path to increased profitability. *Forest Products Journal* 57(5): 6-14.

Watt, M.; Moore, J.; Facon, J.F.; Downes, G.; Clinton, P.; Coker, G.; Davis, M.; Simcock, R.; Parfitt, R.; Dando, J.; Mason, E.; Bown, H. 2006. Modelling the influence of stand structural, edaphic and climatic influences on *Pinus radiata* dynamic modulus of elasticity. *Forest Ecology and Management* 229: 136-144.

Watt, M.; Clinton, P.; Parfitt, R.; Ross, C.; Coker, G. 2009. Modelling the influence of site and weed competition on juvenile modulus of elasticity in *Pinus radiata* across broad environmental gradients. *Forest Ecology and Management* 258: 1479-1488.

Xu, P.; Walker, J. 2004. Stiffness gradients in *Pinus radiata* trees. *Wood Science Technology* 8:1-9.

Zhang, S.Y. 1995. Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories. *Wood Science and Technology* 29(6): 451-466.

Zhang, S.Y.; Chauret, G.; Ren, H.Q.; Desjardins, R. 2002. Impact of initial spacing on plantation Black spruce lumber grade yield, bending properties and MSR yield. *Wood and Fiber Science* 34(3): 60-475.