



**Universidad de Concepción**

Dirección de Postgrado

Facultad de Ciencias Forestales - Programa de Doctorado en Ciencias Forestales

**Variación de algunas propiedades físicas y mecánicas de la madera  
de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables**



MARGARETTE EVELYN OMONTE PAREDES  
CONCEPCIÓN - CHILE  
2020

Profesor Guía: Luis Valenzuela Hurtado  
Dpto. Manejo de Bosques y Medio Ambiente, Facultad de Ciencias Forestales  
Universidad de Concepción

# VARIACIÓN DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA DE *Eucalyptus nitens* CON DIMENSIONES ASERRABLES

## Comisión Evaluadora:

Luis Valenzuela Hurtado (Profesor guía)

Ingeniero de Ejecución en Maderas, Ph. D.

---

Manuel Sánchez Olate (Comisión evaluación)

Ingeniero Forestal, Dr.

---

Rosa Alzamora Mallea (Comisión evaluación)

Ingeniero Forestal, Dra.

---

Rubén Ananías Abuter (Comisión evaluación)

Ingeniero de Ejecución en Maderas, Dr.

---



## Director de Postgrado:

Darcy Ríos Leal

Prof. Biología y Química, Dra.

---

## Decano Facultad de Ciencias Forestales:

Manuel Sánchez Olate

Ingeniero Forestal, Dr.

---

## **AGRADECIMIENTOS**

A CONICYT quien financió mis estudios de Doctorado.

A la empresa Forestal Mininco S.A., por proporcionar el material para el desarrollo de este estudio.

A Don Luis Valenzuela Hurtado, por su apoyo fundamental durante este proceso de formación.

A mi familia, y a todas las personas que de alguna u otra forma colaboraron con la realización de este estudio.



## ÍNDICE GENERAL

Resumen general.....	1
Introducción general .....	3
Hipótesis.....	9
Objetivo General.....	9
Objetivos Específicos.....	9
Capítulo I: Variación del contenido de humedad verde y de la densidad básica de la madera en árboles de <i>Eucalyptus nitens</i> con dimensiones aserrables	
Resumen.....	10
Abstract.....	11
Introducción.....	12
Metodología.....	14
Obtención de muestras.....	14
Contenido de humedad verde y densidad básica.....	16
Análisis de datos.....	16
Resultados y discusión.....	18
Contenido de humedad verde.....	18
Densidad básica.....	22
Conclusiones.....	28
Referencias.....	29
Capítulo II: Relación entre la velocidad de la onda acústica y distintas características de la madera, en árboles de <i>Eucalyptus nitens</i> con dimensiones aserrables	
Resumen.....	32
Abstract.....	33
Introducción.....	34
Metodología.....	36
Velocidad de la onda acústica en árboles en pie.....	36
Velocidad de la onda acústica en trozas.....	37
Indicador de la tensión de crecimiento.....	38
Contenido de humedad verde, densidad verde y densidad básica.....	38
Módulo de elasticidad dinámico en trozas.....	39
Módulo de elasticidad de la madera en tensión.....	40
Tensiones de crecimiento longitudinales.....	41
Análisis de datos.....	41
Resultados y discusión.....	42
Velocidad de la onda acústica en árboles en pie.....	42
Velocidad de la onda acústica en trozas.....	44
Conclusiones.....	49
Referencias.....	50

Capítulo III: Relación entre la excentricidad y no circularidad del fuste, con el indicador de la tensión de crecimiento, el módulo de elasticidad de la madera, y las tensiones de crecimiento longitudinales

Resumen.....	54
Abstract.....	55
Introducción.....	56
Metodología.....	59
Excentricidad de la médula y no circularidad del fuste.....	60
Indicador de la tensión de crecimiento.....	61
Módulo de elasticidad de la madera en tensión.....	61
Tensiones de crecimiento longitudinales.....	62
Análisis de datos.....	62
Resultados y discusión.....	64
Relación entre la excentricidad de la médula y no circularidad del fuste, con el indicador de las tensiones de crecimiento longitudinales.....	65
Relación entre la excentricidad de la médula y no circularidad del fuste, con el módulo de elasticidad en tensión.....	66
Relación entre la excentricidad de la médula y no circularidad del fuste, con las tensiones de crecimiento longitudinales.....	67
Conclusiones.....	68
Referencias.....	69
Conclusiones Generales.....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1:</b> Modelos de regresión obtenidos por el método <i>backward</i> , para la variación radial del contenido de humedad verde (CHv), a distintas alturas en el fuste; y sus parámetros estimados de asociación, correlación y de precisión.....	18
<b>Tabla 1.2:</b> Valores medios de contenido de humedad verde (CHv), a distintas posiciones radiales y alturas en el fuste.....	20
<b>Tabla 1.3:</b> Modelos de regresión obtenidos por el método <i>backward</i> , para la variación radial de la densidad básica (DB), a distintas alturas en el fuste; y sus parámetros estimados de asociación, correlación y de precisión.....	23
<b>Tabla 1.4:</b> Valores medios de densidad básica (DB), a distintas posiciones radiales y alturas en el fuste.....	25
<b>Tabla 2.1:</b> Coeficientes de correlación de Pearson entre la velocidad de onda acústica en árboles en pie (VÁRBOL), el contenido de humedad verde (CHv), la densidad verde (Dv), la densidad básica (DB), el indicador de la tensión de crecimiento (GSI), el módulo de elasticidad en tensión (Et), y la tensión de crecimiento longitudinal ( $\sigma_L$ ); como promedios del fuste del árbol.....	43
<b>Tabla 2.2:</b> Coeficientes de correlación de Pearson entre la velocidad de la onda acústica en trozas (VTROZA), el módulo de elasticidad dinámico (MOEd), el contenido de humedad verde (CHv), la densidad verde (Dv), la densidad básica (DB), el indicador de la tensión de crecimiento (GSI), el módulo de elasticidad en tensión (Et), y la tensión de crecimiento longitudinal ( $\sigma_L$ ); a nivel de trozas.....	46
<b>Tabla 3.1:</b> Coeficientes de correlación de Pearson entre la excentricidad de la médula (PE), y la no circularidad del fuste (OOR), con el rango en GSI (Rango), el GSI promedio (Promedio), el GSI máximo (Máximo), y el GSI mínimo (Mínimo)....	65
<b>Tabla 3.2:</b> Coeficientes de correlación de Pearson entre la excentricidad de la médula (PE), y la no circularidad del fuste (OOR), con el rango en Et (Rango), el Et promedio (Promedio), el Et máximo (Máximo), y el Et mínimo (Mínimo).....	66
<b>Tabla 3.3:</b> Coeficientes de correlación de Pearson entre la excentricidad de la médula (PE), y la no circularidad del fuste (OOR), con el rango en $\sigma_L$ (Rango), la $\sigma_L$ promedio (Promedio), la $\sigma_L$ máxima (Máximo), y la $\sigma_L$ mínima (Mínimo).....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Esquema de obtención de muestras en cada árbol individual. A) Obtención de rodela y B) Obtención de probetas radiales dentro de cada rodela.....	15
<b>Figura 1.2:</b> Variación radial del contenido de humedad verde (CHv), a distintas alturas en el fuste, utilizando los modelos entregados en la Tabla 1.1. ( $\bar{r}$ = radio promedio de la rodela).....	19
<b>Figura 1.3:</b> Variación longitudinal en el fuste del contenido de humedad verde (CHv), a distintas posiciones radiales (10, 30, 50, 70 y 90% del radio), y de la sección transversal promedio (rodela).....	21
<b>Figura 1.4:</b> Variación radial de la densidad básica (DB), a distintas alturas en el fuste, utilizando los modelos entregados en la Tabla 1.3.....	24
<b>Figura 1.5:</b> Variación longitudinal en el fuste de la densidad básica (DB), a distintas posiciones radiales (10, 30, 50, 70 y 90% del radio), y de la sección transversal promedio (rodela).....	26
<b>Figura 2.1:</b> Esquema de obtención de trozas y rodela en cada árbol individual.....	37
<b>Figura 2.2:</b> Valores medios de la velocidad de la onda acústica en árboles en pie, obtenidos para las exposiciones cardinales Norte (N), Sur (S), Este (E) y Oeste (O) del fuste. Los valores medios seguidos por letras distintas, difieren significativamente a $P < 0,05$ .....	42
<b>Figura 2.3:</b> Variación de la velocidad de la onda acústica en trozas ( $V_{\text{TROZA}}$ ) promedio, con la posición de la troza en la altura en el fuste. Letras distintas indican diferencias significativas a $P < 0,05$ .....	45
<b>Figura 2.4:</b> Relaciones entre la velocidad de la onda acústica en trozas ( $V_{\text{TROZA}}$ ), y el contenido de humedad verde (CHv), la densidad verde (Dv), el módulo de elasticidad en tensión (Et), y la tensión de crecimiento longitudinal ( $\sigma_L$ ). a) CHv versus $V_{\text{TROZA}}$ , b) Dv versus $V_{\text{TROZA}}$ , c) Et versus $V_{\text{TROZA}}$ , y d) $\sigma_L$ versus $V_{\text{TROZA}}$ .....	47
<b>Figura 3.1:</b> Esquema de obtención de muestras en cada árbol individual. A) Obtención de trozas y B) Obtención de rodela.....	60
<b>Figura 3.2:</b> Relación entre la excentricidad y la no circularidad del fuste.....	65

## Resumen General

En el presente estudio se examinó la variación radial y en la altura del fuste, del contenido de humedad verde (CHv), y de la densidad básica de la madera (DB). Así como también, se investigaron las relaciones entre la velocidad de la onda acústica obtenida en árboles en pie ( $V_{\text{ÁRBOL}}$ ), y la obtenida en trozas ( $V_{\text{TROZA}}$ ), con distintas características de la madera, y las relaciones entre la excentricidad de la médula (PE), y la no circularidad del fuste (OOR), con el indicador de las tensiones de crecimiento (GSI), el módulo de elasticidad de la madera en tensión (Et), y las tensiones de crecimiento longitudinales ( $\sigma_L$ ). Se utilizaron individuos de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables, provenientes de una plantación de 18 años de edad, crecida en la región del Biobío, Chile.

Se seleccionaron 9 árboles aleatoriamente, todos aparentemente rectos. En cada árbol seleccionado se determinó la  $V_{\text{ÁRBOL}}$  en el árbol en pie. De cada árbol se cortaron trozas de 2,4 m de largo, centradas en longitud; a la altura fija de 2 m, y al 33, 66 y 100% de la altura comercial del árbol. En cada troza se midió la  $V_{\text{TROZA}}$ , y se obtuvo el GSI, el Et y las  $\sigma_L$ . De los extremos de cada troza, se cortaron rodajas, para las determinaciones de CHv, Dv, DB, PE y OOR.

Se reportaron cambios significativos en CHv y DB, con la posición radial y axial en el fuste. Se encontraron distintos patrones de variación radial, del CHv y de la DB, a lo largo del fuste del árbol. Los cambios radiales (en CHv y DB) fueron menores en la parte alta del fuste, y los cambios axiales, menores en el leño cercano a la corteza.

No hubo correlaciones significativas entre la velocidad de la onda acústica obtenida en árboles en pie ( $V_{\text{ÁRBOL}}$ ) y las distintas características examinadas en la madera (CHv, Dv, DB, GSI, Et y  $\sigma_L$ ). La velocidad de la onda acústica en trozas ( $V_{\text{TROZA}}$ ), se correlacionó negativa y significativamente con el CHv y con la Dv, y positiva y significativamente con el Et, y con las  $\sigma_L$ .

Los cambios en la excentricidad de la médula (PE) y la no circularidad (OOR), con la posición en la altura en el fuste, no fueron significativos. La excentricidad de la médula se correlacionó



positiva y significativamente con la no circularidad del fuste. No hubo correlaciones significativas entre la PE y la OOR, con los valores de GSI y de  $\sigma_L$ , tales como rangos, promedios, máximos y mínimos. La PE y la OOR, se correlacionaron negativa y significativamente con el Et promedio y con el Et mínimo de las trozas.



## Introducción General

*Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) es la tercera especie forestal más importante en Chile, en términos de superficie plantada con fines industriales. Al año 2017, esta superficie superaba las 270000 hectáreas, y representaba un 11,8% de la superficie total de plantaciones forestales del país (INFOR 2019).

En términos de crecimiento, *E. nitens* es la especie establecida industrialmente que exhibe mayor crecimiento en diámetro, altura y volumen en Chile, con incrementos medios anuales (IMA) en volumen de madera, en el rango de 20 a 45 m<sup>3</sup>/ha/año (Valencia y Cabrera 2009), registrándose incluso valores de hasta 77 m<sup>3</sup>/ha/año, para la especie creciendo en la Costa de la provincia de Arauco (INFOR-CORFO 1989).

Si bien el objetivo principal de estas plantaciones, es la producción de madera para pulpa, investigaciones conducidas tanto en Chile como en el extranjero, han indicado que *E. nitens* es una especie con un alto potencial para generar productos sólidos de alto valor; como madera aserrada, chapas y productos de ingeniería en madera (Derikvand *et al.* 2018, Blackburn *et al.* 2018).

La calidad de la madera para un propósito particular, está determinada por la variabilidad de una o más de las características que afectan su estructura, y por lo tanto, sus propiedades físicas, como la densidad de la madera (Salvo *et al.* 2017). Conocer la variabilidad de las propiedades de interés de la madera, entre sitios, y entre y dentro del árbol, es de vital importancia para obtener una mejor ventaja comercial de una plantación (Downes *et al.* 1997).

Dentro de las variables físicas de interés de la madera, el contenido de humedad verde (CHv) está directamente relacionado con el peso de las trozas y la madera verde. Esta variable influye en los costos de transporte de la madera, y además, es de interés para quienes compran madera en función del peso, y para quienes diseñan equipos de cosecha y transporte (Bown y Lasserre 2015). La densidad básica (DB), por otra parte, es considerada una de las características más importantes de la madera, debido a su estrecha relación con otras propiedades físico-mecánicas

(Navarrete *et al.* 2009). La DB a menudo es utilizada para evaluar el recurso forestal, como un indicador de rendimiento y de la calidad de la madera (Downes *et al.* 1997), y además, es un factor clave en la fabricación de productos de madera sólida de *E. nitens* (Salvo *et al.* 2017).

En el género *Eucalyptus*, la variación del CHv a través del fuste del árbol, ha sido examinada principalmente en la dirección axial. El patrón observado, corresponde a una disminución lineal del CHv con el incremento de la altura en el fuste; en *E. nitens* (Purnell 1988, Lausberg *et al.* 1995) y *Eucalyptus regnans* (Frederick *et al.* 1982). En el caso de la DB, el patrón observado en la dirección axial es inverso al del CHv; esto es, un incremento general con la altura en el fuste; en *E. nitens* (Purnell 1988, Lausberg *et al.* 1995, Raymond y Muneri 2001, Mariani *et al.* 2005, Leandro *et al.* 2008, Navarrete *et al.* 2009, Rebolledo *et al.* 2013), *Eucalyptus globulus* (Igartúa *et al.* 2000, Igartúa *et al.* 2002, Raymond y Muneri 2001, Monteoliva *et al.* 2002) y *E. regnans* (Frederick *et al.* 1982, Raymond *et al.* 1998, Omonte y Valenzuela 2011).

Con respecto a la variación radial de la DB, ésta generalmente es reportada para una única posición en la altura en el fuste, y son escasos los estudios en los cuáles la variación radial es examinada en más de una posición axial (Frederick *et al.* 1982, Igartúa *et al.* 2000, Igartúa *et al.* 2002, Lausberg *et al.* 1995, Omonte y Valenzuela 2011), en estos casos, diferencias en la evolución radial de la DB han sido observadas con la altura en el fuste. Reportes similares para el caso del CHv no han sido publicados.

La amplia variabilidad de la madera como material, produce numerosas dificultades para su procesamiento y su utilización (Wang *et al.* 2000). Conocer en detalle la variación de las propiedades de la madera, es importante para poder maximizar la utilización de los recursos forestales (Schimleck *et al.* 2019).

Los métodos de evaluación no destructivos, se han convertido en una alternativa importante para predecir las características de la madera (Gouvêa *et al.* 2011).

El uso de métodos acústicos como herramientas de evaluación de materiales, ha sido ampliamente aceptado en la industria de productos forestales; para el control de calidad en línea

y la clasificación de productos (Wang 2013). Además, los métodos acústicos son cada vez más utilizados para evaluar árboles en pie, para madera estructural y productos de ingeniería en madera (Blackburn *et al.* 2014).

Los métodos acústicos se basan en la propagación de ondas de esfuerzos (ondas acústicas), que viajan a través de una porción del fuste del árbol, o a lo largo de una troza (Soto *et al.* 2012). La propagación de ondas de esfuerzo en la madera, es un proceso dinámico que se relaciona internamente con las propiedades físicas y mecánicas de la madera (Wang *et al.* 2000). Los métodos más utilizados son el “tiempo de vuelo” para árboles en pie y trozas, y el método de “resonancia” para trozas (Soto *et al.* 2012). Estos métodos tienen distintos principios de medición (Schimleck *et al.* 2019).

La opción de utilizar herramientas acústicas para la determinación del módulo de elasticidad de la madera, en lugar de los ensayos estáticos tradicionales, ha sido examinada por varios autores, tales como Wang *et al.* (2000), Lindström *et al.* (2002), Dickson *et al.* (2003), y Chauhan y Sethy (2016). Todos estos investigadores, han reportado una correlación significativa entre las mediciones acústicas y las estáticas de módulo de elasticidad de la madera.

En especies del género *Eucalyptus* se ha reportado una correlación positiva y significativa, entre la rigidez de la madera y la velocidad de la onda acústica, medida tanto en árboles en pie como en trozas (Dickson *et al.* 2003, Valencia 2008, Blackburn *et al.* 2010, Farrell *et al.* 2012). Para el caso específico de *E. nitens*, se ha indicado que las mediciones acústicas, tienen una aplicación potencial en la evaluación de la calidad de la madera (Farrell *et al.* 2012).

Los métodos acústicos son de bajo costo (Farrell *et al.* 2012), rápidos e intrínsecamente precisos (Lindström *et al.* 2002). No obstante, el potencial de los métodos acústicos para predecir distintas características de la madera, en individuos *E. nitens* manejados para la producción de madera sólida, aún no son bien entendidos.

Uno de los factores claves que limita el uso de las plantaciones del género *Eucalyptus*, como madera aserrada de calidad, son los altos niveles de tensiones de crecimiento en el interior de la

madera (Yang y Waugh 2001, Yang *et al.* 2005). Altos niveles de tensiones de crecimiento, pueden generar significativos problemas económicos (Entwistle *et al.* 2014).

Las tensiones de crecimiento que se encuentran en equilibrio en el árbol en pie (Malan y Gerischer 1987), son liberadas durante la corta y trozado del árbol, y a lo largo de las operaciones de aserrío posteriores, generando un conjunto de deformaciones que provocan distintos defectos en las trozas o productos ya aserrados (Touza 2001).

Las tensiones de crecimiento son originadas durante el proceso de maduración de las células que produce el cambium (Nicholson 1973, Trugilho *et al.* 2002). Durante este proceso, las células que crecen cada año sobre la periferia del fuste, tienden a expandirse lateralmente y a contraerse longitudinalmente, sin embargo, estos cambios dimensionales son impedidos por las células que han sido formadas en años anteriores, generando un conjunto de tensiones (Vignote *et al.* 1996, Yang y Waugh 2001, Yang *et al.* 2005, Biechele *et al.* 2009, Alméras y Clair 2016).

Las tensiones de crecimiento en dirección longitudinal son las más intensas y variables (Trugilho y Oliveira 2008), y las más importantes desde el punto de vista de la calidad de la madera sólida (Yang y Waugh 2001). Aunque las tensiones de crecimiento no pueden ser medidas directamente, estas pueden ser calculadas a partir de mediciones de deformación y del módulo de elasticidad de la madera en tensión, Et (Yang y Waugh 2001, Raymond *et al.* 2004, Yang *et al.* 2005).

La deformación en dirección longitudinal, que es provocada por la liberación de las tensiones de crecimiento longitudinales ( $\sigma_L$ ), es considerada como un estimador directo de los niveles de  $\sigma_L$  (Valencia *et al.* 2011). Distintos métodos han sido desarrollados para poder medir estas deformaciones longitudinales, siendo los más utilizados: el método Nicholson, el método CIRAD-Forêt y el método “strain gauge”; y que básicamente difieren entre sí, en la forma en que las  $\sigma_L$  son liberadas (Yang y Waugh 2001).

El método CIRAD-Fôret permite realizar mediciones repetibles de deformación longitudinal (Raymond *et al.* 2004) y puede ser considerado como un método no destructivo debido a su

reducido daño físico en el fuste (Trugilho y Oliveira 2008). Este método básicamente permite registrar el desplazamiento longitudinal que experimentan dos clavos insertos en la madera a una distancia fija, luego de liberar las  $\sigma_L$ . Este desplazamiento registrado, es conocido como “indicador de la tensión de crecimiento”, GSI, y aunque no corresponde directamente a la deformación longitudinal, se considera proporcional a ésta (Yang *et al.* 2005), y por lo mismo han sido ampliamente utilizados para estimar los niveles de  $\sigma_L$  (Raymond *et al.* 2004, Valdés 2004, Vignote *et al.* 1996, Biechele *et al.* 2009, Medhurst *et al.* 2011, Valencia *et al.* 2011, Díaz *et al.* 2012).

La mayoría de los estudios en *E. nitens* en relación a las  $\sigma_L$ , miden el GSI a través del método CIRAD-Fôret, y lo utilizan como un indicador del nivel de  $\sigma_L$  (Valdés 2004, Biechele *et al.* 2009, Medhurst *et al.* 2011, Valencia *et al.* 2011, Díaz *et al.* 2012).

La presencia local de valores anormalmente elevados de tensión de crecimiento, suelen estar relacionados con la presencia de madera de reacción, en un área concreta del fuste (Touza 2001). La presencia de madera de reacción, ha sido generalmente correlacionada con variaciones de otras propiedades de la madera (Alméras *et al.* 2005).

La variación alrededor del fuste (variación circunferencial) de la deformación longitudinal, del módulo de elasticidad, y del crecimiento radial, y su efecto sobre la regulación de la orientación del fuste, ha sido examinada en individuos severamente inclinados (Alméras *et al.* 2005). Relaciones similares, entre el crecimiento excéntrico, o no circularidad del fuste, con la variación circunferencial del indicador de las tensiones de crecimiento, del módulo de elasticidad de la madera, y de las tensiones de crecimiento longitudinales, en individuos sin inclinación aparente, aún no han sido examinadas.

Para incrementar el desarrollo de productos sólidos a partir de *E. nitens*, es necesario realizar estudios tendientes a caracterizar las plantaciones con esta especie, que han sido manejadas silvícolamente para la producción de madera sólida, y que posean dimensiones aserrables.

De acuerdo con lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo principal, caracterizar la variación radial y en la altura del fuste, del CHv y de la DB de la madera. Así como también, relacionar la velocidad de la onda acústica con el CHv, la Dv, la DB, el GSI, el Et, y la  $\sigma_L$ , y la excentricidad y no circularidad del fuste, con el GSI, el Et, y la  $\sigma_L$ .



## **Hipótesis**

En individuos de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables, manejados para la producción de madera sólida:

El contenido de humedad verde y la densidad básica de la madera, varían significativamente con la posición radial y axial en el fuste.

La velocidad de la onda acústica se relaciona con las propiedades físicas y mecánicas de la madera, y la excentricidad y no circularidad en el fuste, se relacionan con cambios en las propiedades mecánicas.

## **Objetivo General**

Caracterizar la variación radial y en la altura del fuste, del CHv y de la DB de la madera. Así como también, relacionar la velocidad de la onda acústica con el CHv, la Dv, la DB, el GSI, el Et, y la  $\sigma_L$ , y la excentricidad y no circularidad del fuste, con el GSI, el Et, y la  $\sigma_L$ .

## **Objetivos Específicos**

- 1.- Comparar el CHv y la DB de la madera, con la exposición cardinal, y con la posición radial y axial en el fuste.
- 2.- Relacionar la velocidad de la onda acústica obtenida en árboles en pie ( $V_{\text{ÁRBOL}}$ ), y la obtenida en trozas ( $V_{\text{TROZA}}$ ), con el CHv, la Dv, la DB, el GSI, el Et, y la  $\sigma_L$ .
- 3.- Relacionar la excentricidad y no circularidad del fuste, con variaciones circunferenciales del GSI, del Et, y de las  $\sigma_L$ .



## **Capítulo I. Variación del contenido de humedad verde y de la densidad básica de la madera en árboles de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables**

### **Chapter I. Variation of green moisture content and basic density of wood in *Eucalyptus nitens* trees with sawable dimensions**

#### **Resumen**

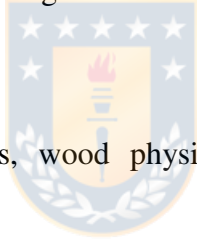
Se examinó la variación del contenido de humedad verde, y de la densidad básica de la madera, en fustes de árboles de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables, provenientes de una plantación de 18 años de edad, crecida en la región del Biobío, Chile. Se seleccionaron 9 árboles aleatoriamente. De cada árbol se obtuvo un conjunto de 8 rodelas, que representaron las siguientes alturas fijas: 0,8 m; 3,2 m; 7,0 m; 9,4 m; 15,0 m; 17,4 m; 23,2 m; y 25,6 m. De cada rodela se obtuvieron muestras al 10, 30, 50, 70 y 90% del radio, en la exposición cardinal Norte y Sur del fuste, para las determinaciones de contenido de humedad verde y densidad básica. La exposición cardinal en el fuste, resultó relevante para el contenido de humedad verde, pero no para la densidad básica. Se reportaron cambios significativos en contenido de humedad verde y densidad básica, con la posición radial y axial en el fuste. Se encontraron distintos patrones de variación radial, del contenido de humedad verde y de la densidad básica, a lo largo del fuste del árbol. Los cambios radiales (en contenido de humedad verde y densidad básica) fueron menores en la parte alta del fuste, y los cambios axiales, menores en el leño cercano a la corteza.

**Palabras claves:** Eucalipto, modelos lineales, propiedades físicas de la madera, variabilidad axial, variabilidad radial.

## Abstract

In the present study, the variation of green moisture content and basic density in *Eucalyptus nitens* trees with sawable dimensions were examined, coming from a plantation of 18-year-old, grown at the Biobío region, Chile. Nine trees were randomly selected. From each tree a set of 8 discs were obtained, which represented the following fixed heights: 0,8 m; 3,2 m; 7,0 m; 9,4 m; 15,0 m; 17,4 m; 23,2 m; and 25,6 m. From each disk samples were obtained at 10, 30, 50, 70 and 90% of the radius, in the North and South cardinal exposures, for the determinations of green moisture content and basic density. The cardinal exposure in the stem was relevant for the green moisture content, but not for the basic density. Significant changes were reported in green moisture content and basic density, with the radial and axial position in the stem. Different patterns of radial variation, of green moisture content and basic density, were found along stem of the tree. The radial changes (in green moisture content and basic density) were minors in the upper part of the stem, and the axial changes were minors near to the bark.

**Keywords:** Eucalypt, linear models, wood physical properties, axial variability, radial variability.



## Introducción

*Eucalyptus nitens* es la tercera especie forestal más importante en Chile, en términos de superficie plantada con fines industriales. Al año 2016, esta superficie superaba las 268000 hectáreas, y representaba un 11,1% de la superficie total de plantaciones forestales del país (INFOR 2017).

Si bien el objetivo principal de estas plantaciones, es la producción de madera para pulpa, investigaciones conducidas tanto en Chile como en el extranjero, han indicado que *E. nitens* es una especie con un alto potencial para generar productos sólidos de alto valor; como madera aserrada, chapas y productos de ingeniería en madera (Derikvand *et al.* 2018, Blackburn *et al.* 2018).

La calidad de la madera para un propósito particular, está determinada por la variabilidad de una o más de las características que afectan su estructura, y por lo tanto, sus propiedades físicas, como la densidad de la madera (Salvo *et al.* 2017). Conocer la variabilidad de las propiedades de interés de la madera, entre sitios, y entre y dentro del árbol, es de vital importancia para obtener una mejor ventaja comercial de una plantación (Downes *et al.* 1997).

El contenido de humedad verde (CHv), está directamente relacionado con el peso de las trozas y la madera verde. Esta variable influye en los costos de transporte de la madera, y además, es de interés para quienes compran madera en función del peso, y para quienes diseñan equipos de cosecha y transporte (Bown y Lasserre 2015). La densidad básica (DB), por otra parte, es considerada una de las características más importantes de la madera, debido a su estrecha relación con otras propiedades físico-mecánicas (Navarrete *et al.* 2009). La DB a menudo es utilizada para evaluar el recurso forestal, como un indicador de rendimiento y de la calidad de la madera (Downes *et al.* 1997), y además, es un factor clave en la fabricación de productos de madera sólida de *E. nitens* (Salvo *et al.* 2017).

En el género *Eucalyptus*, la variación del CHv a través del fuste del árbol, ha sido examinada principalmente en la dirección axial. El patrón observado, corresponde a una disminución lineal

del CHv con el incremento de la altura en el fuste; en *E. nitens* (Purnell 1988, Lausberg *et al.* 1995) y *Eucalyptus regnans* (Frederick *et al.* 1982). En el caso de la DB, el patrón observado en la dirección axial es inverso al del CHv; esto es, un incremento general con la altura en el fuste; en *E. nitens* (Purnell 1988, Lausberg *et al.* 1995, Raymond y Muneri 2001, Mariani *et al.* 2005, Leandro *et al.* 2008, Navarrete *et al.* 2009, Rebolledo *et al.* 2013), *Eucalyptus globulus* (Igartúa *et al.* 2000, Igartúa *et al.* 2002, Raymond y Muneri 2001, Monteoliva *et al.* 2002) y *E. regnans* (Frederick *et al.* 1982, Raymond *et al.* 1998, Omonte y Valenzuela 2011).

Con respecto a la variación radial de la DB, ésta generalmente es reportada para una única posición en la altura en el fuste, y son escasos los estudios en los cuáles la variación radial es examinada en más de una posición axial (Frederick *et al.* 1982, Igartúa *et al.* 2000, Igartúa *et al.* 2002, Lausberg *et al.* 1995, Omonte y Valenzuela 2011), en estos casos, diferencias en la evolución radial de la DB han sido observadas con la altura en el fuste. Reportes similares para el caso del CHv no han sido publicados.

Para incrementar el desarrollo de productos sólidos a partir de esta especie de *Eucalyptus*, es necesario realizar estudios tendientes a caracterizar las plantaciones con esta especie, que han sido manejadas silvícolamente para la producción de madera sólida.

De acuerdo con lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo principal, examinar la variación a través del fuste aserrable, de las propiedades físicas: contenido de humedad verde (CHv) y densidad básica (DB) de la madera; tanto en la dirección radial como en la dirección axial, y con la exposición cardinal en el fuste, en individuos de *E. nitens* de 18 años de edad, manejados para la producción de madera sólida.

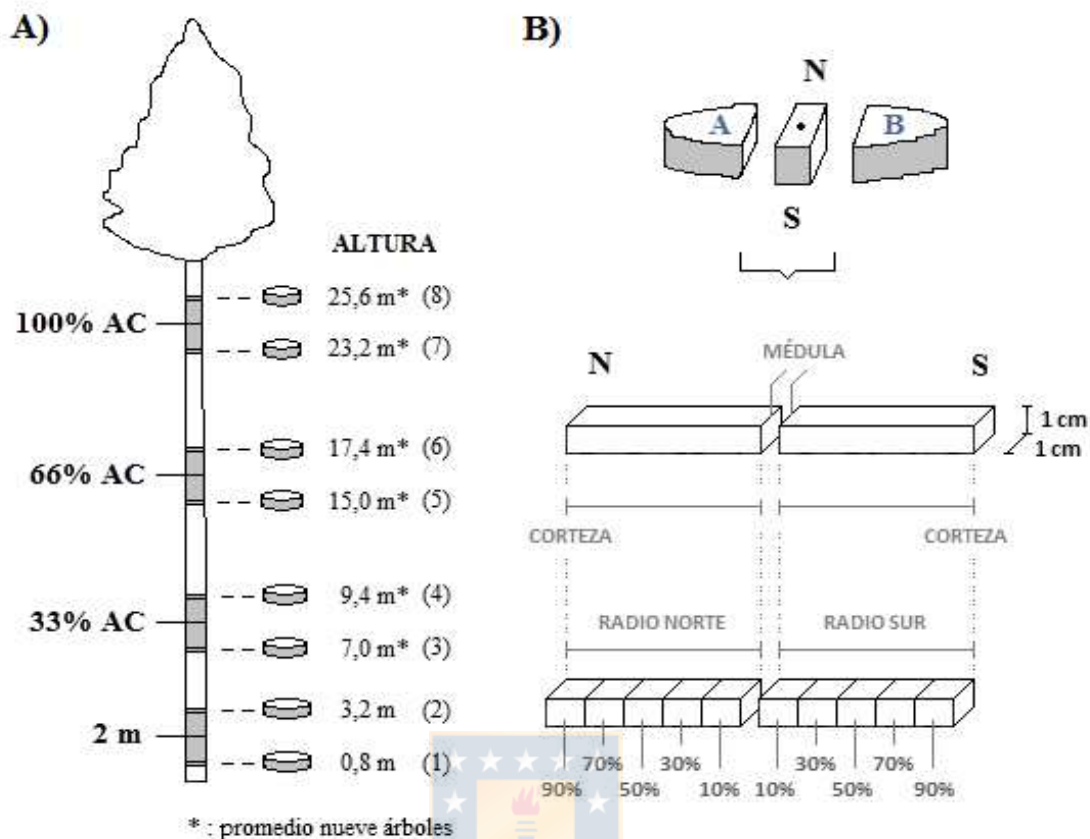
## Metodología

Los individuos utilizados en este estudio, provinieron de una plantación de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) de 18 años de edad, manejada para producir madera sólida, ubicada a 340 m s.n.m. en la Región del Biobío, Chile (37° 51' S y 72° 07' O). El sitio de la plantación presenta una topografía plana y pendientes inferiores a 7%, una precipitación promedio anual que supera los 1000 mm, y temperaturas promedios que oscilan entre los 5°C la mínima y los 21°C la máxima (Díaz *et al.* 2012). La plantación fue intervenida con dos raleos, efectuados a los 7 y 9 años de edad, con densidades residuales de 500 y 300 árboles/ha respectivamente.

### *Obtención de muestras*

Se seleccionaron 9 árboles aleatoriamente, con un diámetro a la altura del pecho (DAP; medido a 1,3 m sobre el nivel del suelo) promedio de 41,4 cm (CV = 14,9%), y una altura total promedio de 42,2 m (CV = 3,7%).

En cada árbol seleccionado se cortaron trozas de 2,4 m de largo, centradas en longitud; a la altura fija de 2 m, y al 33, 66 y 100% de la altura comercial del árbol (AC; con un diámetro límite de utilización = 20 cm). De los extremos de cada troza, se cortaron rodelas de aproximadamente 5 cm de espesor, y se dispuso de un conjunto de 8 rodelas por árbol, para las determinaciones de contenido de humedad verde (CHv) y densidad básica (DB). Como se muestra en la Figura 1.1A, a lo largo del fuste estas rodelas representaron las siguientes alturas fijas: 0,8 m (altura 1); 3,2 m (altura 2); 7,0 m (altura 3); 9,4 m (altura 4); 15,0 m (altura 5); 17,4 m (altura 6); 23,2 m (altura 7); y 25,6 m (altura 8); equivalentes al promedio de los nueve árboles. Las 72 rodelas obtenidas (8 rodelas x 9 árboles), inmediatamente después de cortadas, fueron colocadas en bolsas de polietileno y transportadas al laboratorio, donde fueron almacenadas en frío hasta el momento de ser procesadas.



**Figura 1.1:** Esquema de obtención de muestras en cada árbol individual. A) Obtención de rodela y B) Obtención de probetas radiales dentro de cada rodela.

De cada rodela se obtuvo un listón diametral (corteza-médula-corteza), de 1 x 1 cm en espesor y ancho, en sentido Norte-Sur, el cual fue dividido en cada tramo médula-corteza, en 5 segmentos radiales de igual longitud. Con este procedimiento, se obtuvieron 5 probetas radiales de iguales dimensiones, en cada exposición cardinal (Norte y Sur), que representaron el 10, 30, 50, 70 y 90% del radio, a partir de la médula (Figura 1.1B).

Las dos porciones de rodela (A y B; Figura 1.1B), adyacentes a la zona de extracción del listón diametral Norte-Sur, se utilizaron para determinar el CHv y la DB de la sección transversal (rodela).

### *Contenido de humedad verde y densidad básica*

Para determinar el contenido de humedad verde (CH<sub>v</sub>) y la densidad básica (DB), de cada muestra de madera, se utilizó la siguiente Ecuación 1 y Ecuación 2:

$$CH_v(\%) = [(M_v - M_0)/M_0] \times 100 \quad (1)$$

$$DB(\text{kg/m}^3) = M_0/V_v \quad (2)$$

donde M<sub>v</sub> es la masa verde (kg), M<sub>0</sub> es la masa anhidra (kg), obtenida después de secar la muestra en un horno a 103 ± 2°C, hasta peso constante, y V<sub>v</sub> es el volumen verde de la muestra (m<sup>3</sup>), obtenido por desplazamiento de agua, siguiendo las recomendaciones del método B, de la norma ASTM D-2395 (1998).

### *Análisis de datos*

Los datos de CH<sub>v</sub> obtenidos de médula a corteza, para las exposiciones cardinales Norte y Sur (Figura 1.1B), y para todas las alturas examinadas (Figura 1.1A), se analizaron en conjunto, para obtener un modelo general de regresión, del CH<sub>v</sub> en función de la distancia radial en porcentaje; que fue escogido tanto por el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) como por su simplicidad, y que tuvo la siguiente Ecuación 3:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \times DR + \beta_2 \times DR^{1.5} \quad (3)$$

donde y es la variable dependiente, DR es la distancia radial a partir de la médula, como porcentaje del radio total (%), y β<sub>0</sub>, β<sub>1</sub> y β<sub>2</sub>, son los parámetros de la Ecuación 3.

En este modelo general (Ecuación 3), se incorporó la exposición cardinal como variable dummy (E), y sus respectivas interacciones, para examinar diferencias en la variación radial del CH<sub>v</sub>, entre las exposiciones Norte y Sur, en las ocho posiciones axiales examinadas en el fuste. Para la selección de los modelos, se utilizó el método *backward*, tomando en cuenta la jerarquía en

la eliminación de las variables no significativas. Se consideraron sólo las variables independientes que presentaron un valor  $P < 0,05$ .

Los mismos procedimientos antes descritos para el CHv, se realizaron para la densidad básica; donde el modelo general de regresión, de la DB en función de la distancia radial en porcentaje, también tuvo la estructura de la Ecuación 3.

A través de análisis de varianza, se examinaron diferencias estadísticas en CHv y DB con la posición radial y axial en el fuste. Los contrastes entre medias se realizaron mediante la prueba HSD de Tukey. Se trabajó con un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ .





## Resultados y discusión

### Contenido de humedad verde (CHv)

Los modelos de variación radial del CHv, para las distintas alturas examinadas en el fuste, se entregan en la Tabla 1.1. Todos los modelos fueron estadísticamente significantes al 1%, así como también, los valores estimados de los parámetros.

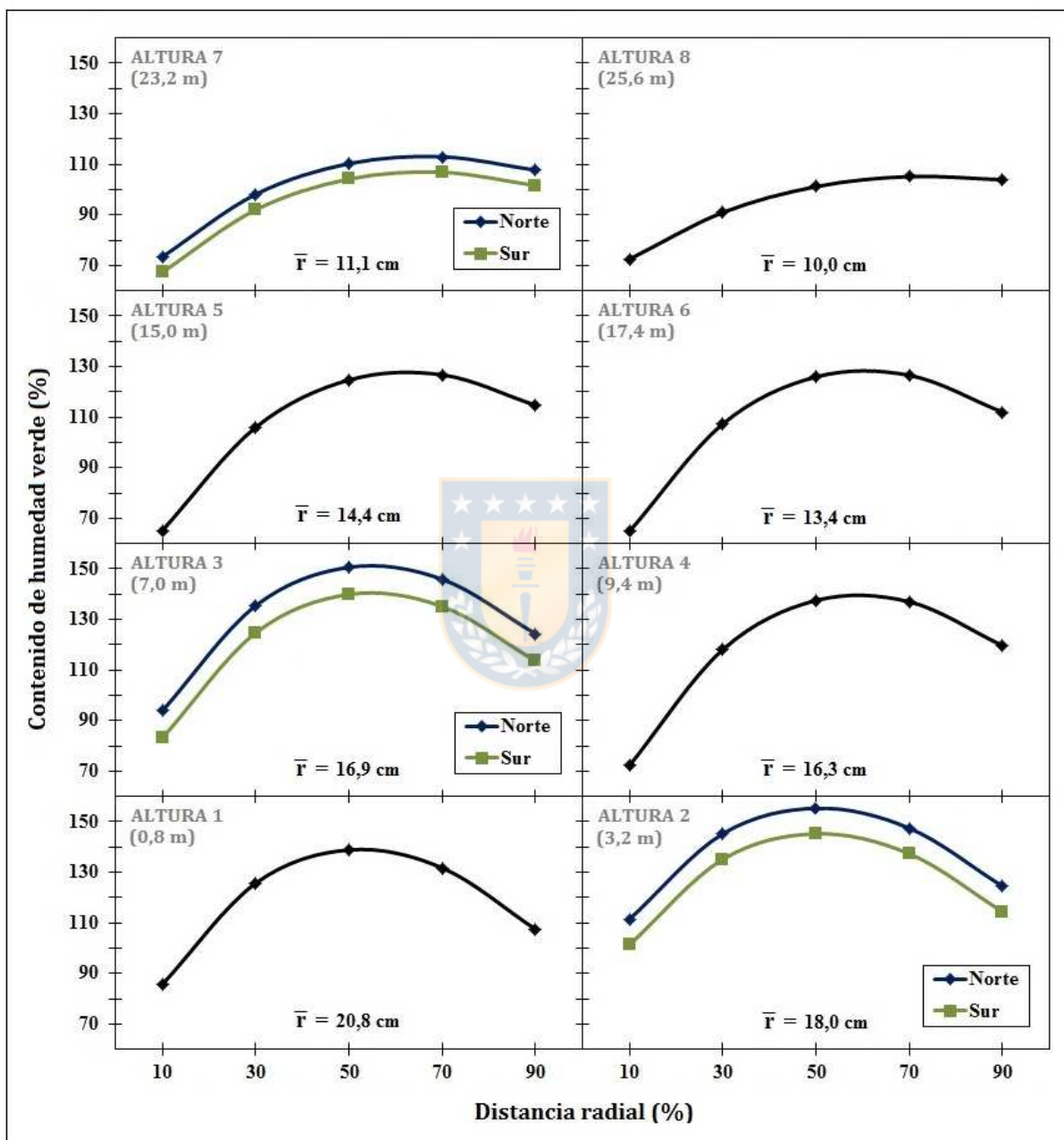
**Tabla 1.1:** Modelos de regresión obtenidos por el método *backward*, para la variación radial del contenido de humedad verde (CHv), a distintas alturas en el fuste; y sus parámetros estimados de asociación, correlación y de precisión.

$CH_v = \beta_0 + \beta_1 \times DR + \beta_2 \times DR^{1,5}$									
Altura	Parámetros				R	R <sup>2</sup>	EEE	F Calculado	n
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$						
1 (0,8 m)	49,252	5,142	-0,474		0,679	0,461	21,25	36,3	88
4 (9,4 m)	33,145	5,385	-0,466		0,852	0,725	14,70	112,2	88
5 (15,0 m)	31,333	4,622	-0,390		0,807	0,651	16,68	81,0	90
6 (17,4 m)	29,003	4,917	-0,421		0,871	0,759	12,75	135,1	89
8 (25,6 m)	58,220	1,889	-0,146		0,700	0,490	12,66	41,8	90
$CH_v = \beta_0 + \beta_1 \times DR + \beta_2 \times DR^{1,5} + \beta_3 \times E$ ; Norte (E= 1); Sur (E= 0)									
Altura	Parámetros				R	R <sup>2</sup>	EEE	F Calculado	n
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$					
2 (3,2 m)	69,921	4,468	-0,419	10,10	0,746	0,557	15,32	31,0	78
3 (7,0 m)	46,188	5,169	-0,466	10,74	0,839	0,704	13,80	67,3	89
7 (23,2 m)	47,368	2,699	-0,221	6,12	0,729	0,532	14,21	32,6	90

Nota: CHv: contenido de humedad verde (%), DR: distancia radial a partir de la médula, como porcentaje del radio total (%),  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  parámetros del modelo, R: coeficiente de correlación, R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación, EEE: error estándar de estimación, F Calculado: valor de F, n: tamaño de la muestra.

Como se muestra en la Tabla 1.1, los modelos para las alturas 1, 4, 5, 6 y 8, no incluyen la exposición cardinal como variable dummy (E), ni sus respectivas interacciones, ya que éstas fueron excluidas en la selección, al ser no significativas. En estas alturas, el modelo de variación radial del CHv, en las exposiciones Norte y Sur, fue el mismo. En el caso de los modelos obtenidos para las alturas 2, 3 y 7, estos incluyen la variable dummy E como regresor, no así sus interacciones que resultaron no significativas. Lo anterior, indica que en estas alturas, existe un diferencial medio en CHv entre las exposiciones Norte y Sur, que es constante a lo largo del radio y a favor de la exposición Norte.

En la Figura 1.2, se presenta la variación radial del CHv, a distintas alturas en el fuste, utilizando los modelos entregados en la Tabla 1.1. Para las alturas 2, 3 y 7, se observa el diferencial en CHv encontrado entre las exposiciones.



**Figura 1.2:** Variación radial del contenido de humedad verde (CHv), a distintas alturas en el fuste, utilizando los modelos entregados en la Tabla 1.1. ( $\bar{r}$  = radio promedio de la rodela).

Los resultados de los análisis de varianza, indicaron que la posición radial resultó una fuente significativa de variación para el CHv,  $P < 0,01$ , en todas las alturas examinadas en el fuste. Los valores medios de CHv, obtenidos para las distintas posiciones radiales, y alturas en el fuste, se entregan en la Tabla 1.2, junto con los resultados de los contrastes posteriores.

**Tabla 1.2:** Valores medios de contenido de humedad verde (CHv), a distintas posiciones radiales y alturas en el fuste.

Contenido de humedad verde (%)																
Altura		Posición radial														
		10%			30%			50%			70%			90%		
1	(0,8 m)	83,9	C	bc	130,1	A	ab	137,0	A	ab	129,2	AB	abc	109,4	B	ab
2	(3,2 m)	106,0	B	a	141,6	A	a	148,7	A	a	143,5	A	a	119,6	B	a
3	(7,0 m)	89,4	D	b	126,5	BC	ab	149,2	A	a	139,2	AB	ab	118,9	C	a
4	(9,4 m)	74,4	C	bcd	112,5	B	bc	141,4	A	ab	137,9	A	abc	118,3	B	a
5	(15,0 m)	67,1	C	d	100,6	B	cd	129,2	A	b	126,6	A	bc	113,9	AB	ab
6	(17,4 m)	64,9	D	d	106,0	C	cd	129,9	A	b	122,3	AB	cd	113,4	BC	ab
7	(23,2 m)	70,7	C	cd	94,5	B	cd	107,9	A	c	110,1	A	de	104,8	AB	b
8	(25,6 m)	73,0	C	cd	89,6	B	d	102,3	A	c	105,3	A	e	103,7	A	b

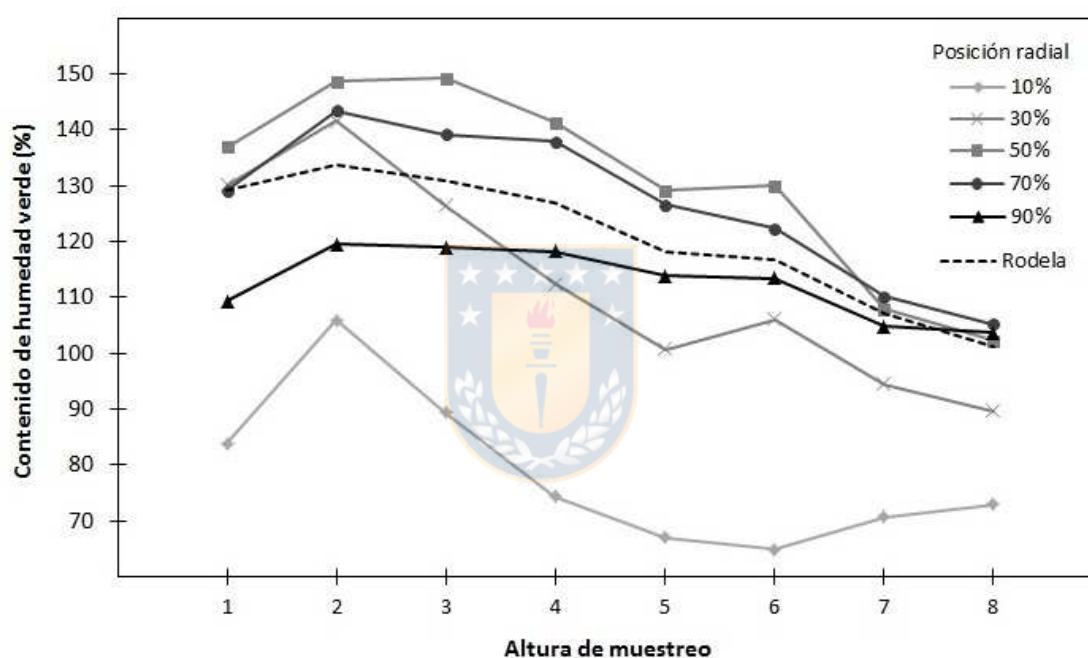
Nota: Las letras mayúsculas se leen horizontalmente, y las letras minúsculas verticalmente. Valores medios seguidos por letras mayúsculas (minúsculas) distintas, dentro de una misma fila (columna), difieren significativamente ( $P < 0,05$ ).

Se identificaron tres patrones de variación radial distintos para el CHv a lo largo del fuste. Como se muestra en la Tabla 1.2, el primero se observó en la zona basal, alturas 1 y 2, donde el CHv aumentó significativamente desde la médula hasta el 30% del radio, entre el 30 y 70% se mantuvo constante, y luego disminuyó hacia la corteza (Figura 1.2; Alturas 1 y 2). El segundo, se observó en la zona intermedia del fuste, en las alturas 3, 4, 5 y 6, donde el CHv aumentó de forma sostenida y significativa desde la médula hasta el 50% del radio, entre el 50 y 70% se mantuvo constante, y luego disminuyó hacia la corteza (Figura 1.2; Alturas 3, 4, 5, y 6). Y finalmente, el tercer patrón se observó en las alturas 7 y 8, donde en general, el CHv aumentó de médula a corteza (Figura 1.2; Alturas 7 y 8).

Para la variación radial del CHv, se ha encontrado que las zonas de albura y duramen no difieren significativamente en CHv, en individuos de *E. nitens* de 15 años de edad (Lausberg *et al.* 1995). Y también se ha señalado, que las angiospermas en general, solo presentan pequeñas diferencias

en CHv entre dichas zonas (Panshin y De Zeeuw 1980, Haygreen y Bowyer 1996). En el presente trabajo, si bien la albura y el duramen no fueron identificadas, el número de segmentos radiales estudiados, permitió detectar que la variación radial del CHv, fue estadísticamente significativa, en todas las alturas examinadas en el fuste.

En la Figura 1.3, se presenta la variación longitudinal en el fuste del CHv, al 10, 30, 50, 70 y 90% del radio, así como también, la variación longitudinal del CHv, de la sección transversal promedio (rodela).



**Figura 1.3:** Variación longitudinal en el fuste del contenido de humedad verde (CHv), a distintas posiciones radiales (10, 30, 50, 70 y 90% del radio), y de la sección transversal promedio (rodela).

Los resultados de los análisis de varianza, indicaron que la altura en el fuste, resultó una fuente significativa de variación para el CHv,  $P < 0,01$ , en todas las posiciones radiales estudiadas. Los resultados de los contrastes posteriores son presentados en la Tabla 1.2.

La tendencia general mostrada por el CHv en la dirección longitudinal, fue la de incrementar inicialmente, desde la altura 1 hasta la altura 2 (desde los 0,8 m hasta los 3,2 m), para entonces

disminuir con la altura en el fuste (Figura 1.3). Si bien este incremento inicial en CHv, sólo fue significativo cerca de la médula (10% del radio), la disminución del CHv, desde la altura 2 hasta la altura 8 (desde los 3,2 m hasta los 25,6 m), fue significativa en todas las posiciones radiales examinadas (Tabla 1.2).

Con respecto al CHv de la sección transversal (rodela), los valores medios en la altura, siguieron la misma tendencia general (Figura 1.3); el CHv aumentó levemente desde la altura 1 (129,2%) hasta la altura 2 (133,8%), y entonces disminuyó sostenidamente hasta la altura 8 (101,2%). Este patrón observado, concuerda con el que ha sido reportado en individuos de la misma especie (Purnell 1988, Lausberg *et al.* 1995), y en individuos de *E. regnans* (Frederick *et al.* 1982).

En el presente estudio, el CHv disminuyó en promedio 32,6 puntos porcentuales, entre los 3,2 m y los 25,6 m de altura. Esta disminución, es similar a la reportada por Purnell (1988), en *E. nitens* de 11 años, donde el contenido de humedad disminuyó 30 puntos porcentuales en promedio, entre los 2,4 m y los 12 m de altura.

Es importante señalar, que en todas las alturas examinadas en el fuste, los valores más bajos de CHv se encontraron en el leño cercano a la médula (10% del radio), y en general, los más altos al 50% del radio (Tabla 1.2, Figura 1.3). Con respecto a los cambios radiales en CHv, estos fueron menores en la parte alta del fuste, y los cambios axiales, menores en el leño cercano a la corteza (90% del radio; Tabla 1.2; Figura 1.2 y Figura 1.3).

### *Densidad básica (DB)*

Los modelos de variación radial de la DB, para las distintas alturas examinadas en el fuste, se entregan en la Tabla 1.3. Todos los modelos fueron estadísticamente significantes al 1%, así como también, la casi totalidad de los valores estimados de los parámetros. La excepción, fueron los valores estimados de los parámetros  $\beta_1$  ( $P = 0,23$ ) y  $\beta_2$  ( $P = 0,03$ ), en la posición de muestreo 1.

Como se observa en la Tabla 1.3, todos los modelos obtenidos tuvieron la misma estructura; no incorporan la exposición cardinal como variable dummy (E), ni sus respectivas interacciones, ya que éstas fueron excluidas en la selección, al ser no significativas. Lo anterior, indica que en todas las alturas, el modelo de variación radial de la DB, en las exposiciones Norte y Sur, fue el mismo.

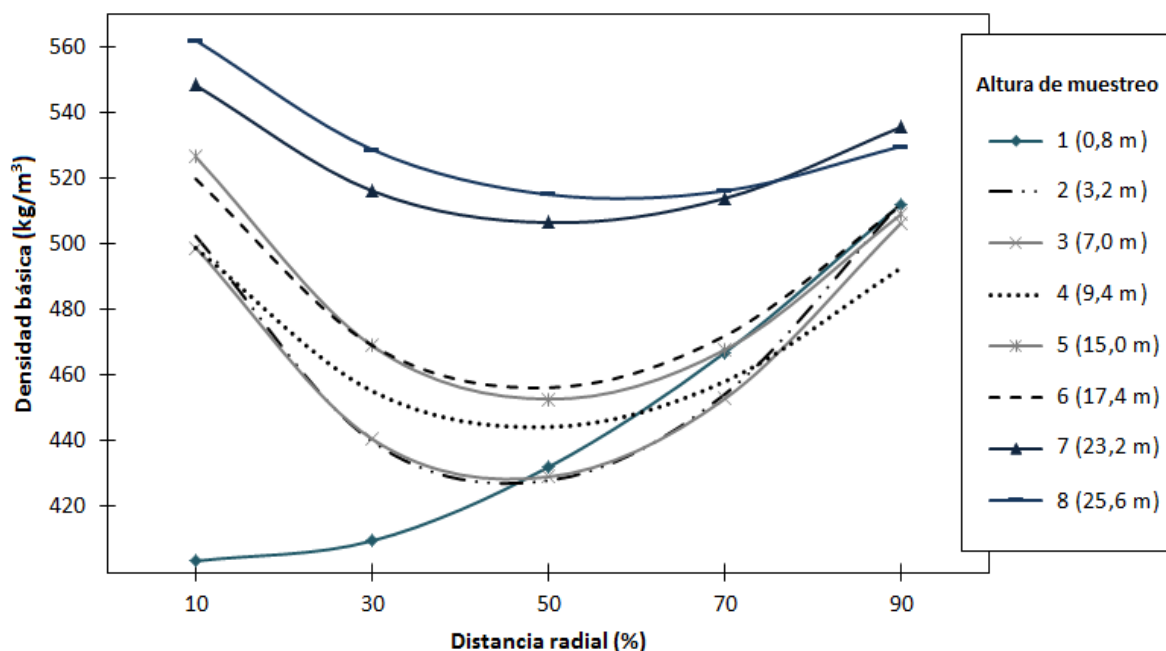
**Tabla 1.3:** Modelos de regresión obtenidos por el método *backward*, para la variación radial de la densidad básica (DB), a distintas alturas en el fuste; y sus parámetros estimados de asociación, correlación y de precisión.

$DB = \beta_0 + \beta_1 \times DR + \beta_2 \times DR^{1,5}$								
Altura	Parámetros			R	R <sup>2</sup>	EEE	F Calculado	n
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$					
1 (0,8 m)	410,47	-1,612	0,289	0,668	0,446	44,78	34,17	88
2 (3,2 m)	564,69	-9,047	0,893	0,647	0,419	40,70	27,06	78
3 (7,0 m)	556,61	-8,380	0,824	0,652	0,425	36,97	31,72	89
4 (9,4 m)	540,62	-6,008	0,577	0,509	0,259	37,36	14,90	88
5 (15,0 m)	580,68	-7,717	0,730	0,657	0,432	32,55	33,12	90
6 (17,4 m)	568,41	-6,967	0,668	0,692	0,478	26,65	39,42	89
7 (23,2 m)	578,24	-4,246	0,398	0,318	0,101	46,88	4,90	90
8 (25,6 m)	590,69	-3,956	0,346	0,372	0,139	43,08	7,00	90

Nota: DB: densidad básica (kg/m<sup>3</sup>), DR: distancia radial a partir de la médula, como porcentaje del radio total (%),  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$ : parámetros del modelo, R, R<sup>2</sup>, EEE, F Calculado, n, Ídem Tabla 1.1.

Si bien en este estudio se utilizó el modelo de variación radial para testear diferencias entre exposiciones cardinales, se observan diferencias no significativas en DB con la exposición en el fuste, concordante con los resultados de trabajos previos en *E. nitens* (Raymond y Muneri 2001), *E. globulus* (Igartúa *et al.* 2000, Igartúa *et al.* 2002, Raymond y Muneri 2001) y *E. regnans* (Raymond *et al.* 1998).

En la Figura 1.4, se presenta la variación radial de la DB, para las distintas alturas examinadas, utilizando los modelos entregados en la Tabla 1.3.



**Figura 1.4:** Variación radial de la densidad básica (DB), a distintas alturas en el fuste, utilizando los modelos entregados en la Tabla 1.3.

Los resultados de los análisis de varianza, indicaron que la posición radial resultó una fuente significativa de variación para la DB,  $P \leq 0,01$ , en las alturas 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 8, y no significativa, en la altura 7 ( $P = 0,06$ ). Los valores medios de DB, obtenidos para las distintas posiciones radiales, y alturas en el fuste, se entregan en la Tabla 1.4, junto con los resultados de los contrastes posteriores.

**Tabla 1.4:** Valores medios de densidad básica (DB), a distintas posiciones radiales y alturas en el fuste.

Densidad básica (kg/m <sup>3</sup> )																
Altura		Posición radial														
		10%			30%			50%			70%			90%		
1	(0,8 m)	405,0	C	c	405,1	C	c	435,9	B	b	466,7	B	c	511,4	A	a
2	(3,2 m)	505,3	A	b	432,5	B	bc	434,3	B	b	453,9	B	c	511,6	A	a
3	(7,0 m)	497,6	A	b	444,6	B	bc	425,2	B	b	453,8	B	c	506,5	A	a
4	(9,4 m)	491,7	A	b	471,9	AB	b	437,7	B	b	447,4	B	c	499,3	A	a
5	(15,0 m)	527,5	A	ab	466,8	B	b	453,6	B	b	469,3	B	bc	508,1	A	a
6	(17,4 m)	522,5	A	ab	463,7	B	b	456,3	B	b	478,3	B	ab c	508,4	A	a
7	(23,2 m)	548,1	A	a	516,5	A	a	507,7	A	a	511,9	A	ab	536,4	A	a
8	(25,6 m)	560,4	A	a	533,2	AB	a	512,6	B	a	514,6	B	a	531,0	AB	a

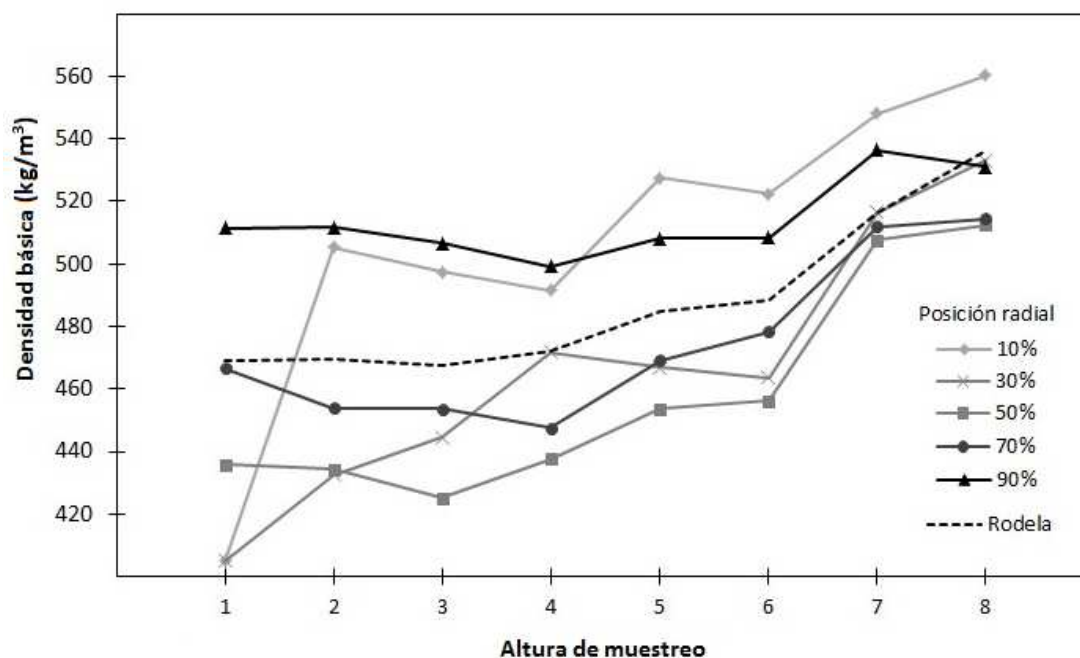
Nota: Las letras mayúsculas se leen horizontalmente, y las letras minúsculas verticalmente. Valores medios seguidos por letras mayúsculas (minúsculas) distintas, dentro de una misma fila (columna), difieren significativamente ( $P < 0,05$ ).

En general, se identificaron tres patrones de variación radial distintos para la DB a lo largo del fuste. Como se muestra en la Tabla 1.4, el primero se observó en la zona basal, altura 1, donde la DB se mantuvo constante, entre la médula y el 30% del radio, y luego aumentó de forma sostenida y significativa hacia la corteza. El segundo, se observó en la zona intermedia del fuste, en las alturas 2, 3, 4, 5 y 6, donde la DB disminuyó desde la médula hasta el 30% del radio, entre el 30 y 70% se mantuvo constante, y luego aumentó significativamente hacia la corteza. Y finalmente, el tercer patrón se observó en las alturas 7 y 8, donde la DB disminuyó desde la médula hasta el 50% del radio (disminución que solo fue significativa en la altura 8), y entonces se mantuvo constante hasta la corteza. En la Figura 1.4, estos 3 patrones pueden ser identificados.

Diferencias en la variación radial de la DB, con la altura en el fuste, también han sido observadas en individuos de *E. regnans* (Frederick *et al.* 1982, Omonte y Valenzuela 2011) y *E. globulus* (Igartúa *et al.* 2000, Igartúa *et al.* 2002). Este comportamiento, refleja la interacción existente entre la altura de muestreo, y la posición en el radio (Igartúa *et al.* 2002).

En la Figura 1.5, se presenta la variación longitudinal de la DB, al 10, 30, 50, 70 y 90% del radio, así como también, la variación longitudinal de la DB, de la sección transversal (rodela).





**Figura 1.5:** Variación longitudinal en el fuste de la densidad básica (DB), a distintas posiciones radiales (10, 30, 50, 70 y 90% del radio), y de la sección transversal promedio (rodela).

Los resultados de los análisis de varianza, indicaron que la altura en el fuste, resultó una fuente significativa de variación para la DB,  $P < 0,01$ , al 10, 30, 50 y 70% del radio, sin embargo, ésta no resultó significativa cerca de la corteza (90% del radio). La diferencia entre el valor de DB promedio máximo y mínimo, encontrados en la altura del fuste, al 10, 30, 50, 70 y 90% del radio (Tabla 1.4), fue de 155,4; 128,1; 87,4; 67,2; y 37,1  $\text{kg/m}^3$  respectivamente. Esta diferencia, claramente disminuyó de médula a corteza.

No obstante lo anterior, la tendencia general mostrada por la DB en la dirección longitudinal, en todas las posiciones radiales, fue la de incrementar desde la base al ápice del fuste (Tabla 1.4, Figura 1.4 y Figura 1.5).

Con respecto a la DB de la sección transversal (rodela), los valores medios en la altura, siguieron la misma tendencia general (Figura 1.5). En este caso, la DB se mantuvo constante las 3 primeras alturas de muestreo, con una DB promedio de 468,8  $\text{kg/m}^3$ , para entonces aumentar con la altura, hasta la altura 8 (536,4  $\text{kg/m}^3$ ).

El patrón longitudinal más comúnmente reportado para el género *Eucalyptus*, corresponde a un incremento de la DB, con la altura en el fuste; en *E. nitens* (Mariani *et al.* 2005, Leandro *et al.* 2008, Rebolledo *et al.* 2013), *E. regnans* (Raymond *et al.* 1998), y *E. globulus* (Igartúa *et al.* 2000, Igartúa *et al.* 2002), a veces, acompañado por una disminución inicial de la densidad en la base del árbol; en *E. nitens* (Purnell 1988, Lausberg *et al.* 1995, Raymond y Muneri 2001, Navarrete *et al.* 2009), *E. regnans* (Frederick *et al.* 1982, Omonte y Valenzuela 2011), y *E. globulus* (Raymond y Muneri 2001, Monteoliva *et al.* 2002). En el presente estudio, esta caída inicial en densidad no fue detectada, probablemente, debido a la baja intensidad de muestreo en la zona basal del fuste.

Al igual que en el caso del CHv, los cambios radiales en DB, fueron menores en la parte alta del fuste, y los cambios axiales, menores en el leño cercano a la corteza (Figura 1.4 y Figura 1.5). La menor variación radial de la DB en la parte alta del fuste, ha sido mencionada como un indicio de la presencia mayoritaria de tejido con características de madera juvenil (Igartúa *et al.* 2002).

En el presente estudio, tanto el CHv como la DB, variaron significativamente a través del fuste del árbol, sin embargo, la parte alta del fuste, se caracterizó por presentar altos valores de DB, bajos valores de CHv, y una menor variabilidad radial. Características favorables para el procesamiento de la madera.

## **Conclusiones**

La exposición cardinal en el fuste solo resultó de relevancia para el contenido de humedad verde de la madera (CHv). Sin embargo, el CHv y la densidad básica (DB), cambiaron significativamente con la posición radial y axial en el fuste.

Se observaron distintos patrones de variación radial, del CHv y de la DB, a lo largo del fuste del árbol. Y en general, los cambios radiales (en CHv y DB) fueron menores en la parte alta del fuste, y los cambios axiales, menores en el leño cercano a la corteza.



## Referencias

- ASTM International. 1998.** Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood-Based Materials. ASTM-D2395. 1998. Annual Book of ASTM Standards. Section 4, Construction v. 0410 Wood. Easton. 666p.
- Blackburn, D.; Vega, M.; Yong, R.; Britton, D.; Nolan, G. 2018.** Factors influencing the production of structural plywood in Tasmania, Australia from *Eucalyptus nitens* rotary peeled veneer. *Southern Forests* (2018): 1-10.
- Bown, H.E.; Lasserre, J.P. 2015.** An air-drying model for piled logs of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* in Chile. *New Zealand Journal of Forestry Science* 45(1): 1-9.
- Derikvand, M.; Kotlarewski, N.; Lee, M.; Jiao, H.; Chan, A.; Nolan, G. 2018.** Visual stress grading of fibre-managed plantation Eucalypt timber for structural building applications. *Construction and Building Materials* 167: 688-699.
- Díaz, S.; Espinoza, M.; Valenzuela, L.; Cancino, J.; Lasserre, J.P. 2012.** Efecto del raleo en el crecimiento y algunas propiedades de la madera de *Eucalyptus nitens* en una plantación de 15 años. *Maderas. Ciencia y tecnología* 14(3): 373-388.
- Downes, G.M.; Hudson, I.L.; Raymond, C.A.; Dean, G.H.; Michell, A.J.; Schimleck, L.R.; Evans, R.; Muneri, A. 1997.** Sampling plantation eucalypts for wood and fibre properties. CSIRO Publishing, Melbourne. Australia. 132p.
- Frederick, D.J.; Madgwick, H.A.I; Oliver, G.R. 1982.** Wood basic density and moisture content of young *Eucalyptus regnans* grown in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science* 12(3): 494-500.
- Haygreen, J.G.; Bowyer, J.L. 1996.** Forest Products and Wood Science-an Introduction. Third edition. Iowa State University Press, Ames.

**Igartúa, D.V.; Rivera, S.M.; Monterubbianesi, M.G.; Monteoliva, S.E.; Farina, S.; Carranza, S.L.; Villegas, M.S. 2000.** Calidad del leño en *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus*. I. Variación de la densidad básica y la longitud de fibra en una estación del sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Actas Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel, Misiones, Argentina.

**Igartúa, D.V.; Monteoliva, S.E.; Monterubbianesi, M.G.; Villegas, M.S. 2002.** Calidad del leño en *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus*: II. Variaciones en la densidad básica y la longitud de fibras en Lobería, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* 105(1): 29-39.

**INFOR. 2017.** El sector forestal chileno 2017. Instituto Forestal. Chile. 48p.

**Lausberg, M.J.F.; Gilchrist, K.F.; Skipwith, J.H. 1995.** Wood properties of *Eucalyptus nitens* grown in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science* 25(2): 147-163.

**Leandro, L.; Ananías, R.; Cloutier, A.; Díaz-Vaz, J.E.; Bermedo, M.; Sanhueza, R.; Lasserre, J.P. 2008.** Estudio preliminar de las grietas internas en anillos de madera inicial y su relación con características de la estructura anatómica y densidad en *Eucalyptus nitens*. *Interciencia* 33(11): 829-834.

**Mariani, S.; Poblete, H.; Torres, M.; Fernández, A.; Morales, E. 2005.** Caracterización física y química del *Eucalyptus nitens* con la altura. II Coloquio internacional sobre celulosa de eucalipto, 24-26 mayo 2005. Concepción Chile. ATCP-Chile. 7p.

**Monteoliva, S.; Nuñez, C.; Igartúa, D. 2002.** Densidad básica, longitud de fibras y composición química de la madera de una plantación de *Eucalyptus globulus* en la provincia de Buenos Aires, Argentina. Actas II Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel, Campinas, Brasil.

- Navarrete, E.R.; Figueroa, X.; Novoa, P.A.; Espinosa, M.A. 2009.** Efecto del manejo silvícola y clase de copa sobre la densidad básica de *Eucalyptus nitens*. *Floresta* 39(2): 345-354.
- Omonte, M.; Valenzuela, L. 2011.** Variación radial y longitudinal de la densidad básica en árboles de *Eucalyptus regnans* de 16 años. *Maderas-Cienc Tecnol* 13(2): 211-224.
- Panshin, A.J.; De Zeeuw, C. 1980.** *Textbook of wood technology*. Fourth edition. McGraw-Hill, New York. 722 p.
- Purnell, R.C. 1988.** Variation in wood properties of *Eucalyptus nitens* in a provenance trial on the eastern Transvaal highveld in South Africa. *South African Forestry Journal* 144: 10-22.
- Raymond, C.A.; Banham, P.; Macdonald, A.C. 1998.** Within tree variation and genetic control of basic density, fibre length and coarseness in *Eucalyptus regnans* in Tasmania. *Appita* 51(4): 299-305.
- Raymond, C.A.; Muneri, A. 2001.** Nondestructive sampling of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* for wood properties. I. Basic density. *Wood Science and Technology* 35: 27-39.
- Rebolledo, P.; Salvo, L.; Contreras, H.; Cloutier, A.; Ananías, R.A. 2013.** Variation of internal checks related to anatomical structure and density in *Eucalyptus nitens* wood. *Wood and Fiber Science* 45(3): 279-286.
- Salvo, L.; Leandro, L.; Contreras, H.; Cloutier, A.; Elustondo, D.; Ananías, R.A. 2017.** Radial variation of density and anatomical features in trees of *Eucalyptus nitens*. *Wood and Fiber Science* 49(3): 1-11.

## **Capítulo II. Relación entre la velocidad de la onda acústica y distintas características de la madera, en árboles de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables**

### **Chapter II. Relationship between acoustic wave velocity and different characteristics of wood in *Eucalyptus nitens* trees with sawable dimensions**

#### **Resumen**

En el presente estudio se investigaron las relaciones entre la velocidad de la onda acústica obtenida en árboles en pie ( $V_{\text{ÁRBOL}}$ ), y la obtenida en trozas ( $V_{\text{TROZA}}$ ), con distintas características de la madera, en árboles de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables, provenientes de una plantación de 18 años de edad, crecida en la región del Biobío, Chile. Se seleccionaron 9 árboles aleatoriamente. En cada árbol seleccionado se determinó la  $V_{\text{ÁRBOL}}$  en las exposiciones cardinales Norte, Sur, Este y Oeste del fuste. La  $V_{\text{TROZA}}$  se midió en trozas de 2,4 m de largo, centradas en longitud; a la altura fija de 2 m, y al 33, 66 y 100% de la altura comercial del árbol. Para cada troza se obtuvo el contenido de humedad verde (CHv), la densidad verde (Dv), la densidad básica (DB), el módulo de elasticidad dinámico (MOEd), el indicador de la tensión de crecimiento (GSI), el módulo de elasticidad en tensión (Et) y las tensiones de crecimiento longitudinales ( $\sigma_L$ ). La  $V_{\text{ÁRBOL}}$  promedio en la exposición Sur del fuste, fue significativamente mayor a la encontrada en la exposición Norte. No hubo correlaciones significativas entre la  $V_{\text{ÁRBOL}}$  y las distintas características examinadas en la madera. La  $V_{\text{TROZA}}$  cambió significativamente con la posición de la troza en el fuste. La  $V_{\text{TROZA}}$  se correlacionó negativa y significativamente con el CHv y con la Dv, y positiva y significativamente con el Et, y con las  $\sigma_L$ .

**Palabras claves:** Propiedades acústicas, método de resonancia, método tiempo de vuelo.

## Abstract

In the present study, the relationships between standing-tree acoustic wave velocity ( $V_{\text{ÁRBOL}}$ ) and log acoustic wave velocity ( $V_{\text{TROZA}}$ ), with different wood characteristics in *Eucalyptus nitens* trees with sawable dimensions were examined, coming from a plantation of 18-year-old, grown at the Biobío region, Chile. Nine trees were randomly selected.  $V_{\text{ÁRBOL}}$  was measured in each selected tree at North, South, East, and West stem expositions.  $V_{\text{TROZA}}$  was measured in 2.4 m log, centered in length; at 2 m height, and at 33, 66 and 100% of the tree merchantable height. In each log, green moisture content (CHv), green density (Dv), basic density (DB), dynamic modulus of elasticity (MOEd), growth stress indicator (GSI), modulus of elasticity in tension (Et), and longitudinal growth stress ( $\sigma_L$ ) were obtained. Mean  $V_{\text{ÁRBOL}}$  found in the South exposure was significantly higher than that found in the North exposure. There were no significant correlations between  $V_{\text{ÁRBOL}}$  and different characteristics examined in wood.  $V_{\text{TROZA}}$  changed significantly with the log position in the tree.  $V_{\text{TROZA}}$  was significantly negatively correlated with CHv and Dv, and significantly positively related with Et and  $\sigma_L$ .

**Keywords:** Acoustic properties, time of flight method, resonance method.



## Introducción

La amplia variabilidad de la madera como material, produce numerosas dificultades para su procesamiento y su utilización (Wang *et al.* 2000). Conocer en detalle la variación de las propiedades de la madera, es importante para poder maximizar la utilización de los recursos forestales (Schimleck *et al.* 2019).

Los métodos de evaluación no destructivos, se han convertido en una alternativa importante para predecir las características de la madera (Gouvêa *et al.* 2011).

El uso de métodos acústicos como herramientas de evaluación de materiales, ha sido ampliamente aceptado en la industria de productos forestales; para el control de calidad en línea y la clasificación de productos (Wang 2013). Además, los métodos acústicos son cada vez más utilizados para evaluar árboles en pie, para madera estructural y productos de ingeniería en madera (Blackburn *et al.* 2014).

Los métodos acústicos se basan en la propagación de ondas de esfuerzos (ondas acústicas), que viajan a través de una porción del fuste del árbol, o a lo largo de una troza (Soto *et al.* 2012). La propagación de ondas de esfuerzo en la madera, es un proceso dinámico que se relaciona internamente con las propiedades físicas y mecánicas de la madera (Wang *et al.* 2000). Los métodos más utilizados son el “tiempo de vuelo” para árboles en pie y trozas, y el método de “resonancia” para trozas (Soto *et al.* 2012). Estos métodos tienen distintos principios de medición (Schimleck *et al.* 2019).

La opción de utilizar herramientas acústicas para la determinación del módulo de elasticidad de la madera, en lugar de los ensayos estáticos tradicionales, ha sido examinada por varios autores, tales como Wang *et al.* (2000), Lindström *et al.* (2002), Dickson *et al.* (2003) y Chauhan y Sethy (2016). Todos estos investigadores, han reportado una correlación significativa entre las mediciones acústicas y las estáticas de módulo de elasticidad de la madera.

En especies del género *Eucalyptus* se ha reportado una correlación positiva y significativa, entre la rigidez de la madera y la velocidad de la onda acústica, medida tanto en árboles en pie como en trozas (Dickson *et al.* 2003, Valencia 2008, Blackburn *et al.* 2010, Farrell *et al.* 2012). Para el caso específico de *E. nitens*, se ha indicado que las mediciones acústicas, tienen una aplicación potencial en la evaluación de la calidad de la madera (Farrell *et al.* 2012).

Los métodos acústicos son de bajo costo (Farrell *et al.* 2012), rápidos e intrínsecamente precisos (Lindström *et al.* 2002). No obstante, el potencial de los métodos acústicos para predecir distintas características de la madera, en individuos *E. nitens* manejados para la producción de madera sólida, aún no son bien entendidos.

Para incrementar el desarrollo de productos sólidos a partir de esta especie de *Eucalyptus*, es necesario realizar estudios tendientes a caracterizar las plantaciones con esta especie, que han sido manejadas silvícolamente para la producción de madera sólida, y que posean dimensiones aserrables. Para esto, es necesario examinar distintas propiedades físicas y mecánicas de interés de la madera, su variación a través del fuste aserrable, y además buscar herramientas potenciales, como las acústicas, para predecir distintas propiedades tanto físicas como mecánicas de relevancia para el uso estructural de la madera.

De acuerdo con lo anterior, en el presente estudio se investigan las relaciones entre la velocidad de la onda acústica obtenida en árboles en pie ( $V_{\text{ÁRBOL}}$ ), y la obtenida en trozas ( $V_{\text{TROZA}}$ ), con distintas características de la madera, en individuos de *E. nitens* de 18 años de edad, manejados para la producción de madera sólida.

## Metodología

Se utilizaron individuos provenientes de una plantación de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) de 18 años de edad, manejada para producir madera sólida, ubicada a 340 m s.n.m. en la Región del Biobío, Chile (37° 51' S y 72° 07' O). El sitio de la plantación presenta una topografía plana y pendientes inferiores a 7%, una precipitación promedio anual que supera los 1000 mm, distribuidos en un 80% entre abril y octubre, y temperaturas promedios que oscilan entre los 5°C la mínima y los 21°C la máxima (Díaz *et al.* 2012). La plantación fue intervenida con dos raleos, efectuados a los 7 y 9 años de edad, con densidades residuales de 500 y 300 árboles/ha respectivamente.

Se seleccionaron 9 árboles aleatoriamente, sin evidencia de daño o enfermedad, y sin inclinación con respecto a la posición vertical normal. Los individuos tuvieron un diámetro a la altura de pecho (DAP; medido a 1,3 m sobre el nivel del suelo) promedio de 41,4 cm (CV = 14,9%), y una altura total promedio de 42,2 m (CV = 3,7%).

### *Velocidad de la onda acústica en árboles en pie*

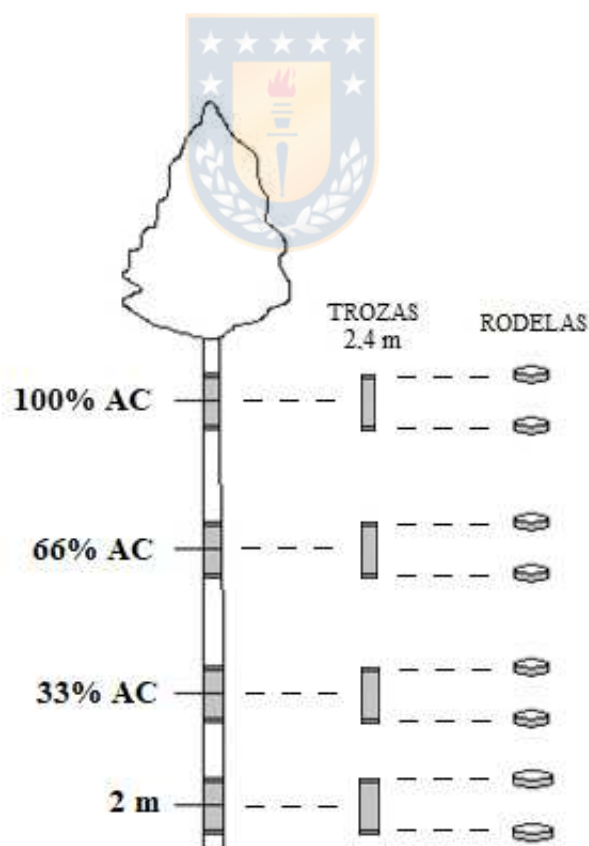
Para la medición de la velocidad de la onda acústica en árboles en pie (V<sub>ÁRBOL</sub>), se utilizó el instrumento portátil *FAKOPP Microsecond Timer*. Este instrumento mide el tiempo de vuelo (tv) de una onda acústica entre dos puntos de distancia conocida (d), y mediante la relación  $d/tv$ , se obtiene la velocidad de la onda acústica.

El tv se midió en las exposiciones cardinales Norte, Sur, Este y Oeste del fuste. En cada exposición cardinal, los sensores acústicos se posicionaron en el fuste a 1 m de distancia entre sí, con el sensor inferior ubicado a la altura de 1 m sobre el nivel del suelo. Las mediciones se realizaron sin remover la corteza, corroborando que los sensores llegaran a la madera, y penetraran lo suficiente como para asegurar una correcta lectura. Cada medición de tv correspondió al promedio de tres lecturas. Las velocidades acústicas obtenidas en las exposiciones Norte, Sur, Este y Oeste del fuste, se promediaron para obtener el valor por árbol.

Este método utilizado para medir la velocidad de la onda acústica, se denomina “*Tiempo de vuelo*”, y ha sido utilizado por varios autores (Lasserre *et al.* 2005, Lasserre *et al.* 2007, Soto *et al.* 2012).

#### *Velocidad de la onda acústica en trozas*

En cada árbol seleccionado se cortaron trozas de 2,4 m de largo, centradas en longitud; a la altura fija de 2 m, y al 33, 66 y 100% de la altura comercial del árbol (AC; con un diámetro límite de utilización = 20 cm), como se muestra en la Figura 2.1. Los individuos seleccionados tuvieron una AC promedio de 24,4 m. En cada troza de 2,4 m se midió la velocidad de la onda acústica ( $V_{\text{TROZA}}$ ), utilizando el instrumento *HITMAN HM200*. Este instrumento mide directamente la velocidad de la onda acústica por el método de “resonancia” (Soto *et al.* 2012). Se realizaron tres mediciones en cada troza (en el extremo de mayor diámetro), y se utilizó el valor promedio.

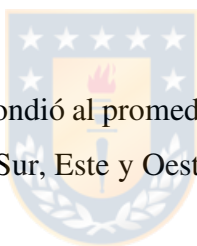


**Figura 2.1:** Esquema de obtención de trozas y rodajas en cada árbol individual.

### *Indicador de la tensión de crecimiento*

En cada troza de 2,4 m de largo (Figura 2.1), se midió el indicador de la tensión de crecimiento (GSI), en las exposiciones cardinales Norte, Sur, Este y Oeste del fuste.

Se utilizó el método CIRAD-Forêt, basado en el método de un orificio único “the single hole method” (Fournier *et al.* 1994). El instrumento utilizado está compuesto por dos clavos que se insertan en la madera (sin corteza), separados entre sí a una distancia de 45 mm a lo largo de la fibra, y además, una estructura metálica que contiene un comparador digital, y que es apoyada sobre los clavos una vez insertos en la madera. Para liberar las tensiones de crecimiento longitudinales en la periferia del fuste, se realiza un orificio con una broca de 20 mm de diámetro en el punto medio entre los dos clavos, y como consecuencia estos clavos se separan. Este desplazamiento de los clavos es registrado por el comparador digital, y corresponde al GSI medido en micrómetros.



El valor de GSI de cada troza, correspondió al promedio aritmético de las mediciones realizadas en las exposiciones cardinales Norte, Sur, Este y Oeste del fuste.

### *Contenido de humedad verde, densidad verde y densidad básica de la madera*

De los extremos de cada troza de 2,4 m de longitud, se cortaron rodela de aproximadamente 5 cm de espesor, como se muestra en la Figura 2.1, y se dispuso de un conjunto de 8 rodela por árbol para las determinaciones de contenido de humedad verde, densidad verde y densidad básica. A lo largo del fuste, estas rodela representaron las siguientes alturas fijas: 0,8 m (altura 1); 3,2 m (altura 2); 7,0 m (altura 3); 9,4 m (altura 4); 15,0 m (altura 5); 17,4 m (altura 6); 23,2 m (altura 7); y 25,6 m (altura 8); equivalentes al promedio de los nueve árboles.

Para determinar el contenido de humedad verde (CHv), la densidad verde (Dv) y la densidad básica (DB) de cada rodela, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$CHv (\%) = [(M_v - M_0) / M_0] * 100 \quad (1)$$

$$D_v \text{ (kg/m}^3\text{)} = M_v/V_v \quad (2)$$

$$D_B \text{ (kg/m}^3\text{)} = M_0/V_v \quad (3)$$

donde  $M_v$  es la masa verde (kg),  $M_0$  es la masa anhidra (kg), obtenida después de secar la muestra en un horno a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , hasta peso constante, y  $V_v$  es el volumen verde de la muestra ( $\text{m}^3$ ), obtenido por desplazamiento de agua, siguiendo las recomendaciones del método B, de la norma Americana ASTM D-2395 (1998).

El CHv promedio del fuste, se determinó ponderando el CHv promedio de cada dos alturas de muestreo consecutivas, por el volumen de la troza entre las dos alturas. El volumen de cada troza (sin corteza), ubicada entre dos alturas consecutivas, fue estimado utilizando el diámetro de las rodela, y la distancia entre ellas, tratando cada sección del fuste como un cono truncado, hasta la altura 8 (25,6 m aprox.).

Los mismos procedimientos antes descritos para obtener el CHv promedio del fuste, se realizaron para obtener la  $D_v$  y la  $D_B$  promedios del fuste. Esta metodología de ponderación utilizada, es similar a la que ha sido reportada en otras investigaciones (Raymond *et al.* 1998, Raymond y Muneri 2001, Omonte y Valenzuela 2011).

Los valores de CHv,  $D_v$  y  $D_B$  promedios de las trozas, se obtuvieron como el promedio aritmético de las mediciones realizadas en las rodela (tomadas a partir de los extremos de cada troza).

#### *Módulo de elasticidad dinámico en trozas*

El módulo de elasticidad dinámico (MOEd) de cada troza, se calculó en función de la velocidad de la onda acústica en trozas ( $V_{\text{TROZA}}$ ), y la densidad verde de la madera ( $D_v$ ), mediante la siguiente expresión:

$$\text{MOEd (MPa)} = (V_{\text{TROZA}})^2 * D_V \quad (4)$$

### *Módulo de elasticidad de la madera en tensión*

Se extrajeron vigas de madera de 2 x 2 x 30 cm, en alto, ancho y largo respectivamente, lo más cercano posible al punto de medición del GSI (cuatro vigas por cada troza de 2,4 m de longitud). En total se obtuvieron 144 vigas en estado verde, que fueron sometidas a flexión estática bajo una carga centrada en la cara tangencial, a una razón l/h de 14 (donde l y h es la luz y el alto de la viga, respectivamente), utilizando una máquina universal de ensayos marca Metrotec, con una capacidad máxima de carga de 20 ton.

Debido a que los valores de módulo de elasticidad obtenidos en los ensayos de flexión, corresponden a valores aparentes (MOEs aparentes, Bodig y Jayne 1982), estos debieron ser corregidos por los efectos del cizalle paralelo a la fibra. Para realizar estas correcciones, se condujeron ensayos anexos en flexión, para seis vigas de 2 x 2 x 55 cm, en alto, ancho y largo respectivamente, las que fueron ensayadas a distintas relaciones l/h (8, 14, 18, 22 y 24), siguiendo la metodología propuesta por Timoshenko (1955) y utilizada por Biblis (1965, 2001) y Adamopoulos *et al.* (2007), con el objetivo de obtener el módulo de elasticidad real, E, y el módulo de rigidez, G, en flexión.

De este ensayo se obtuvo una relación E/G de 40. Con este valor se corrigieron los MOEs aparentes de las 144 vigas, siguiendo las deducciones de Bodig y Jayne (1982), y se obtuvieron sus módulos de elasticidad reales en flexión,  $E_s$ , sin efectos del cizalle, los cuales son equivalentes a los módulos de elasticidad en tensión  $E_t$ , paralelo a la fibra. En promedio los MOEs aparentes de las vigas incrementaron en un 20%.

El  $E_t$  de cada troza, se obtuvo como el promedio aritmético de las determinaciones realizadas en las exposiciones cardinales Norte, Sur, Este y Oeste del fuste.

### *Tensiones de crecimiento longitudinales*

Las tensiones de crecimiento longitudinales ( $\sigma_L$ ) fueron calculadas como el producto entre el Et y la deformación de crecimiento longitudinal ( $\epsilon_L$ ). Esta última, que fue obtenida a través de la relación,  $\epsilon_L = 12,3^{-6} \times \text{GSI}$ , que utiliza un factor de conversión aproximado para angiospermas estándar (Fournier *et al.* 1994).

La  $\sigma_L$  de cada troza, se obtuvo como el promedio aritmético de los valores de  $\sigma_L$  calculados para las exposiciones cardinales Norte, Sur, Este y Oeste del fuste.

Los valores promedio del fuste de GSI, Et y  $\sigma_L$ , se obtuvieron como el promedio aritmético de todas las mediciones realizadas a lo largo del fuste.

### *Análisis de datos*

El efecto de la exposición cardinal en el fuste, sobre la velocidad de la onda acústica obtenida en el árbol en pie ( $V_{\text{ÁRBOL}}$ ), así como también, el efecto de la posición de la troza en el fuste, sobre la velocidad de la onda acústica en trozas ( $V_{\text{TROZA}}$ ), fueron determinados mediante análisis de varianza, incorporando el efecto del árbol como aleatorio. Los contrastes entre medias se realizaron mediante la prueba HSD de Tukey.

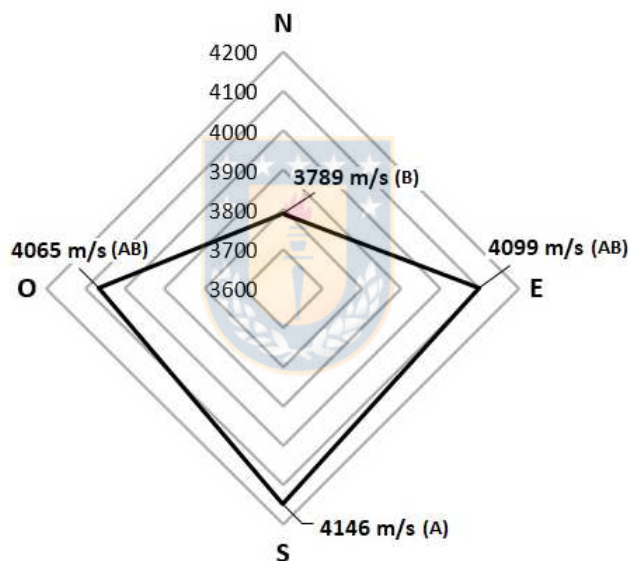
Se determinaron las correlaciones de Pearson, entre las variables  $V_{\text{ÁRBOL}}$ , CHV, DV, DB, GSI, Et, y  $\sigma_L$ , a nivel de árbol, y entre las variables  $V_{\text{TROZA}}$ , CHV, DV, DB, MOEd, GSI, Et, y  $\sigma_L$ , a nivel de troza. Se trabajó con un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ .



## Resultados y discusión

### *Velocidad de la onda acústica en árboles en pie*

Los resultados del análisis de varianza, indicaron diferencias significativas en la velocidad de la onda acústica en el árbol en pie ( $V_{\text{ÁRBOL}}$ ) con la exposición cardinal en el fuste ( $P < 0,05$ ). Los contrastes posteriores, indicaron que la  $V_{\text{ÁRBOL}}$  en la exposición sur del fuste (4146 m/s), fue significativamente mayor a la reportada en la exposición Norte (3789 m/s). Los valores medios de  $V_{\text{ÁRBOL}}$ , obtenidos para las distintas exposiciones cardinales examinadas en el fuste, se muestran en la Figura 2.2.



**Figura 2.2:** Valores medios de la velocidad de la onda acústica en árboles en pie, obtenidos para las exposiciones cardinales Norte (N), Sur (S), Este (E) y Oeste (O) del fuste. Los valores medios seguidos por letras distintas, difieren significativamente a  $P < 0,05$ .

Los valores medios de  $V_{\text{ÁRBOL}}$  encontrados en este estudio (Figura 2.2), son superiores a los reportados por Valencia (2008) en un ensayo de raleo de *E. nitens* de 22 años, que obtuvo valores medios en el rango de 2950 m/s a 4220 m/s. En el mismo estudio, Valencia (2008) reporta diferencias significativas en la velocidad acústica medida en árboles en pie, con la exposición cardinal en el fuste.

En individuos de *E. nitens* de 15 años de edad, Díaz *et al.* (2012) encontraron diferencias significativas en el módulo de elasticidad dinámico (obtenido en función de la velocidad de la onda acústica y la densidad verde de la madera), entre el lado sotavento (sentido contrario a los vientos dominantes) y barlovento (sentido de los vientos dominantes) de los árboles. El módulo de elasticidad dinámico en la cara Sur (barlovento), siempre fue superior al reportado en la cara Norte. Estos autores además, señalan la formación de madera de reacción como posible causa de estas diferencias.

En el presente estudio, la  $V_{\text{ÁRBOL}}$  encontrada en el lado barlovento (exposición Sur) de los árboles, también resultó superior a la encontrada en el lado sotavento (exposición Norte), en concordancia con los resultados obtenidos por Díaz *et al.* (2012).

En la Tabla 2.1 se presentan los coeficientes de correlación de Pearson entre la velocidad de onda acústica en árboles en pie ( $V_{\text{ÁRBOL}}$ ), el contenido de humedad verde (CHv), la densidad verde (Dv), la densidad básica (DB), el indicador de la tensión de crecimiento (GSI), el módulo de elasticidad en tensión (Et), y la tensión de crecimiento longitudinal ( $\sigma_L$ ); como promedios del fuste del árbol.

**Tabla 2.1:** Coeficientes de correlación de Pearson entre la velocidad de onda acústica en árboles en pie ( $V_{\text{ÁRBOL}}$ ), el contenido de humedad verde (CHv), la densidad verde (Dv), la densidad básica (DB), el indicador de la tensión de crecimiento (GSI), el módulo de elasticidad en tensión (Et), y la tensión de crecimiento longitudinal ( $\sigma_L$ ); como promedios del fuste del árbol.

	$V_{\text{ÁRBOL}}$	CHv	Dv	DB	GSI	Et
<b>CHv</b>	-0,576					
<b>Dv</b>	0,004	-0,602				
<b>DB</b>	0,444	-0,965**	0,788*			
<b>GSI</b>	0,135	-0,034	-0,564	-0,172		
<b>Et</b>	0,421	-0,828**	0,434	0,763*	0,200	
<b><math>\sigma_L</math></b>	0,297	-0,434	-0,226	0,243	0,882**	0,636

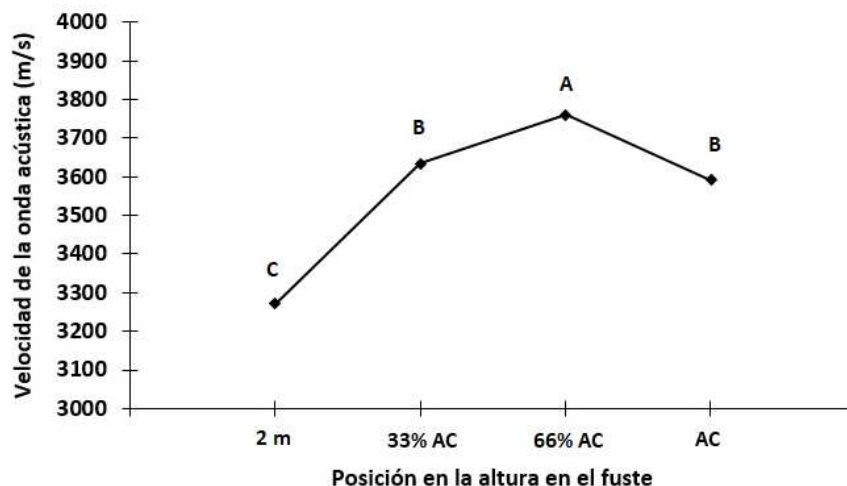
\* =  $P < 0,05$ , \*\* =  $P < 0,01$ ; (n = 9, tamaño de la muestra)

Como se observa en la Tabla 2.1, no hubo correlaciones significativas entre la  $V_{\text{ÁRBOL}}$ , y las distintas características examinadas en la madera. Una de las posibles causas de estos resultados, podría deberse a que la velocidad de la onda acústica obtenida en los árboles en pie, solo representa la porción basal del fuste, mientras que el resto de las variables representan un valor promedio del fuste.

No obstante lo anterior, como se muestra en la Tabla 2.1, el  $CH_v$  se correlacionó negativa y significativamente ( $P < 0,01$ ) con la  $DB$  ( $r = -0,965$ ), y con el  $Et$  ( $r = -0,828$ ). Por otra parte, la  $DB$  se correlacionó positiva y significativamente ( $P < 0,05$ ) con la  $Dv$  ( $r = 0,788$ ), y con el  $Et$  ( $r = 0,763$ ), y además, el  $GSI$  se correlacionó positiva y significativamente ( $P < 0,01$ ) con la  $\sigma_L$  ( $r = 0,882$ ).

#### *Velocidad de la onda acústica en trozas*

Los resultados del análisis de varianza, indicaron diferencias significativas en la velocidad de la onda acústica en trozas ( $V_{\text{TROZA}}$ ), con la posición de la troza en el fuste ( $P < 0,01$ ). Los resultados de los contrastes posteriores (Figura 2.3), indicaron que las trozas muestreadas alrededor de la altura fija de 2 m, tuvieron una  $V_{\text{TROZA}}$  promedio (3271 m/s) significativamente menor ( $P < 0,05$ ), a la de las trozas muestreadas al 33% de AC (3635 m/s), 66% de la AC (3760 m/s), y 100% de la AC (3591 m/s).



**Figura 2.3:** Variación de la velocidad de la onda acústica en trozas ( $V_{\text{TROZA}}$ ) promedio, con la posición de la troza en la altura en el fuste. Letras distintas indican diferencias significativas a  $P < 0,05$ .

Este aumento general en la  $V_{\text{TROZA}}$  promedio con la altura en el fuste (Figura 2.3), es consistente con el que ha sido reportado en individuos de *E. nitens* de 22 años (Valencia 2008), y de 8, 13 y 15 años (Farrell *et al.* 2012). Valencia (2008) encontró que la velocidad de la onda acústica en trozas basales de 2,7 m de longitud, fue significativamente menor a la obtenida en las segundas trozas de igual longitud, de los mismos árboles. Resultados similares a los de Valencia (2008) fueron obtenidos por Farrell *et al.* (2012), pero en trozas de 5,4 m de largo.

En la Tabla 2.2 se presentan los coeficientes de correlación de Pearson entre la velocidad de la onda acústica en trozas ( $V_{\text{TROZA}}$ ), el módulo de elasticidad dinámico (MOEd), el contenido de humedad verde (CHv), la densidad verde (Dv), la densidad básica (DB), el indicador de la tensión de crecimiento (GSI), el módulo de elasticidad en tensión (Et), y la tensión de crecimiento longitudinal ( $\sigma_L$ ); todas estas variables a nivel de trozas.

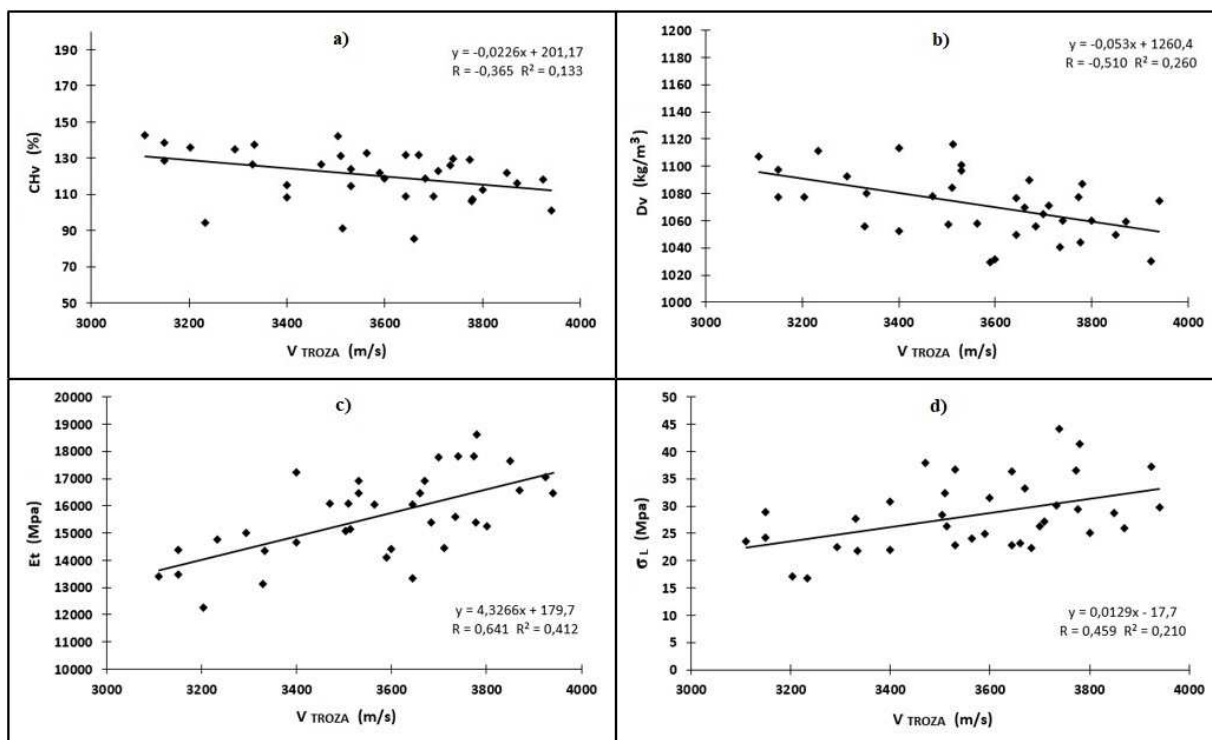
**Tabla 2.2:** Coeficientes de correlación de Pearson entre la velocidad de la onda acústica en trozas ( $V_{TROZA}$ ), el módulo de elasticidad dinámico (MOEd), el contenido de humedad verde (CHv), la densidad verde (Dv), la densidad básica (DB), el indicador de la tensión de crecimiento (GSI), el módulo de elasticidad en tensión (Et), y la tensión de crecimiento longitudinal ( $\sigma_L$ ); a nivel de trozas.

	$V_{TROZA}$	MOEd	CHv	Dv	DB	GSI	Et
CHv	-0,365*	-0,408*					
Dv	-0,510**	-0,363*	-0,085				
DB	0,147	0,234	-0,941**	0,409*			
GSI	0,232	0,211	0,289	-0,210	-0,345*		
Et	0,641**	0,692**	-0,241	0,008	0,203	0,275	
$\sigma_L$	0,459**	0,466**	0,133	-0,154	-0,189	0,905**	0,650**

\* =  $P < 0,05$ , \*\* =  $P < 0,01$ ; (n = 36, tamaño de la muestra)

Como se muestra en la Tabla 2.2, la  $V_{TROZA}$  se correlacionó negativa y significativamente con el CHv ( $r = -0,365$ ;  $P < 0,05$ ) y con la Dv ( $r = -0,510$ ;  $P < 0,01$ ). Por otro lado, la  $V_{TROZA}$  se correlacionó positiva y significativamente con el Et ( $r = 0,641$ ;  $P < 0,01$ ), y con la  $\sigma_L$  ( $r = 0,459$ ;  $P < 0,01$ ).

Las correlaciones reportadas entre el MOEd, y las variables CHv, Et y  $\sigma_L$ , fueron similares a las reportadas entre la  $V_{TROZA}$ , y las mismas variables (Tabla 2.2). Estos resultados, indican que la  $V_{TROZA}$  por sí sola, en lugar del MOEd (calculado en función de la  $V_{TROZA}$  y la Dv; Ecuación 4), puede ser utilizada para predecir los valores de CHv, Et y  $\sigma_L$  de las trozas. Las relaciones entre la  $V_{TROZA}$ , y las variables CHv, Dv, Et, y  $\sigma_L$ , se muestran en la Figura 2.4.



**Figura 2.4:** Relaciones entre la velocidad de la onda acústica en trozas ( $V_{TROZA}$ ), y el contenido de humedad verde (CHv), la densidad verde (Dv), el módulo de elasticidad en tensión (Et), y la tensión de crecimiento longitudinal ( $\sigma_L$ ). a) CHv versus  $V_{TROZA}$ , b) Dv versus  $V_{TROZA}$ , c) Et versus  $V_{TROZA}$ , y d)  $\sigma_L$  versus  $V_{TROZA}$ .

Como se observa en la Tabla 2.2 y la Figura 2.4, la velocidad de la onda acústica obtenida en trozas, resultó estar significativamente correlacionada con distintos parámetros de calidad de la madera. Estos resultados, indican que la  $V_{TROZA}$  podría ser utilizada para clasificar trozas con un mayor módulo de elasticidad (Et), un menor contenido de humedad verde (CHv), y una menor densidad verde (Dv). No obstante lo anterior, también la  $V_{TROZA}$  podría indicar problemas asociados a un mayor nivel de  $\sigma_L$  (Tabla 2.2; Figura 2.4).

Farrell *et al.* (2012) encontraron que la velocidad de la onda acústica, obtenida tanto en árboles en pie como en trozas, se correlacionaron positiva y significativamente con la densidad básica, el módulo de elasticidad, el módulo de ruptura, y otras propiedades mecánicas de la madera, en individuos de *E. nitens*. En el presente estudio, sin embargo, no se reportaron correlaciones significativas entre la velocidad acústica medida en árboles en pie, y las distintas características

examinadas en la madera (Tabla 2.1). Posiblemente, el pequeño tamaño de muestra utilizado en este estudio, para examinar este tipo de correlaciones (9 árboles), no permitió detectar relaciones similares.

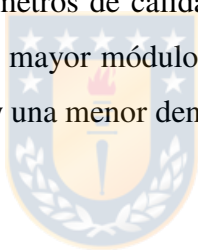
En el presente estudio, las velocidades acústicas obtenidas por el método tiempo de vuelo ( $V_{\text{ÁRBOL}}$ ), fueron mayores a las obtenidas por el método de resonancia ( $V_{\text{TROZA}}$ ), estas tuvieron una media global de 4025 m/s y 3564 m/s respectivamente. Estas diferencias se atribuyen principalmente a que el método tiempo de vuelo mide la velocidad acústica en la madera cercana a la periferia, mientras que el método de resonancia, evalúa toda la sección transversal (Grabianowski *et al.* 2006).



## Conclusiones

En individuos de *E. nitens* de 18 años de edad, manejados para la producción de madera sólida; la velocidad de la onda acústica en árboles en pie ( $V_{\text{ÁRBOL}}$ ), encontrada en el lado barlovento (exposición Sur) de los árboles, fue significativamente mayor a la encontrada en el lado sotavento (exposición Norte). No hubo correlaciones significativas entre la  $V_{\text{ÁRBOL}}$  y las distintas características examinadas en la madera (contenido de humedad verde (CHv), densidad verde (Dv), densidad básica (DB), indicador de la tensión de crecimiento (GSI), módulo de elasticidad en tensión (Et), y tensión de crecimiento longitudinal ( $\sigma_L$ )). Sin embargo, estos resultados podrían cambiar al aumentar el tamaño de la muestra.

La velocidad de la onda acústica en trozas ( $V_{\text{TROZA}}$ ), cambió significativamente con la posición de la troza en el fuste, aumentando en dirección base – ápice. La  $V_{\text{TROZA}}$  se correlacionó significativamente con distintos parámetros de calidad de la madera; esta variable podría ser utilizada para clasificar trozas con un mayor módulo de elasticidad en tensión (Et), un menor contenido de humedad verde (CHv), y una menor densidad verde (Dv).





## Referencias

- Adamopoulos, S.; Passialis, C.; Voulgaridis, E. 2007.** Strength properties of juvenile and mature wood in black locust (*Robinia pseudoacacia* L.). *Wood and Fiber Science* 39 (2): 241-249.
- ASTM International. 1998.** Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood-Based Materials. ASTM-D2395. 1998. Annual Book of ASTM Standards. Section 4, Construction v. 0410 Wood. Easton. 666p.
- Biblis, E.J. 1965.** Analysis of wood-fiberglass composite beams within and beyond the elastic region. *Forest Products Journal* 15 (2): 81-88.
- Biblis, E.J. 2001.** Tension parallel to grain, pure flexural stiffness, and modulus of rigidity of clear wood of seven eastern red oaks. *Forest Products Journal* 51 (4): 87-89.
- Blackburn, D.P.; Hamilton, M.G.; Harwood, C.E.; Innes, T.C.; Potts, B.M.; Williams, D. 2010.** Stiffness and checking of *Eucalyptus nitens* sawn boards: Genetic variation and potential for genetic improvement. *Tree Genetics & Genomes* 6 (5): 757-765.
- Blackburn, D.; Hamilton, M.; Williams, D.; Harwood, C.; Potts, B. 2014.** Acoustic wave velocity as a selection trait in *Eucalyptus nitens*. *Forests* 5 (4): 744-762.
- Bodig, J.; Jayne, A. 1982.** *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold Company Inc. 712 p.
- Chauhan, S.; Sethy, A. 2016.** Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity. *Maderas-Cienc Tecnol* 18(2): 373-382.

- Díaz, S.; Espinoza, M.; Valenzuela, L.; Cancino, J.; Lasserre, J.P. 2012.** Efecto del raleo en el crecimiento y algunas propiedades de la madera de *Eucalyptus nitens* en una plantación de 15 años. *Maderas- Cienc Tecnol* 14(3): 373-388.
- Dickson, R.L.; Raymond, C.A.; Joe, W.; Wilkinson, C.A. 2003.** Segregation of *Eucalyptus dunnii* logs using acoustics. *Forest Ecology and Management* 179: 243-251.
- Farrell, R.; Innes, T.C.; Harwood, C.E. 2012.** Sorting *Eucalyptus nitens* plantation logs using acoustic wave velocity. *Australian Forestry* 75(1): 22-30.
- Fournier, M.; Chanson, B.; Thibaut, B.; Guitard, D. 1994.** Mesures des déformations résiduelles de croissance à la surface des arbres, en relation avec leur morphologie. Observations sur différentes espèces. *Annals of Forest Science* 51: 249-266.
- Gouvêa, A.F.G.; Trugilho, P.F.; Gomide, J.L.; Silva, J.R.M.; Andrade, C.R.; Alves, I.C.N. 2011.** Determinação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. *Revista Árvore* 35(2): 349-358.
- Grabianowski, M.; Manley, B.; Walker, J. 2006.** Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber. *Wood Science and Technology* 40: 205-216.
- 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. 2007.** Assessing corewood acoustic velocity and modulus of elasticity with two impact based instruments in 11-year-old trees from a clonal-spacing experiment of *Pinus radiata* D. Don. *Forest Ecology and Management* 239: 217-221.

- Lindström, H.; Harris, P.; Nakada, R. 2002.** Methods for measuring stiffness of Young trees. *Holz als Roh-und Werkstoff* 60(3): 165-174.
- Omonte, M.; Valenzuela, L. 2011.** Variación radial y longitudinal de la densidad básica en árboles de *Eucalyptus regnans* de 16 años. *Maderas-Cienc Tecnol* 13(2): 211-224.
- Raymond, C.A.; Banham, P.; Macdonald, A.C. 1998.** Within tree variation and genetic control of basic density, fibre length and coarseness in *Eucalyptus regnans* in Tasmania. *Appita* 51(4): 299-305.
- Raymond, C.A.; Muneri, A. 2001.** Nondestructive sampling of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* for wood properties. I. Basic density. *Wood Science and Technology* 35: 27-39.
- Schimleck, L.; Dahlen, J.; Apiolaza, L.A.; Downes, G.; Emms, G.; Evans, R.; Moore, J.; Pâques, L.; Van den Bulcke, Wang, X. 2019.** Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation. *Forests* 10: 728.
- Soto, L.; Valenzuela, L.; Lasserre, J.P. 2012.** Efecto 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. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 14(2): 209-224.
- Timoshenko, S. 1955.** *Strenght of materials*. 3rd. Ed. Part I. Elementary theory and problems. Van Nostrand, New York.
- Valencia, J. 2008.** Application of non-destructive evaluation techniques to the prediction of solid-wood suitability of plantation grown *Eucalyptus nitens* logs. Thesis Submitted in fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science. University of Tasmania, Australia.

**Wang, X.; Ross, R.J.; McClellan, M.; Barbour, R.J.; Erickson, J.R.; Forsman, J.W.; McGinnis, G.D. 2000.** Strength and stiffness assessment of standing trees using a non-destructive stress wave technique. Research Paper Forest Products Laboratory, USDA Forest Service (FPL-RP-585). 9 p.

**Wang, X. 2013.** Acoustic measurements on trees and logs: a review and analysis. *Wood Science and Technology* 47: 965-975.



### **Capítulo III. Relación entre la excentricidad y no circularidad del fuste, con el indicador de la tensión de crecimiento, el módulo de elasticidad de la madera, y las tensiones de crecimiento longitudinales**

### **Chapter III. Relationship between pith eccentricity and out-of-roundness, with growth stress indicator, modulus of elasticity, and longitudinal growth stress**

#### **Resumen**

En el presente estudio se investigaron las relaciones entre la excentricidad de la médula (PE), y la no circularidad del fuste (OOR), con el indicador de las tensiones de crecimiento (GSI), el módulo de elasticidad de la madera en tensión (Et), y las tensiones de crecimiento longitudinales ( $\sigma_L$ ), en árboles de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables, provenientes de una plantación de 18 años de edad, crecida en la región del Biobío, Chile. Se seleccionaron 9 árboles aleatoriamente, todos aparentemente rectos. En cada árbol seleccionado se cortaron trozas de 2,4 m de largo, centradas en longitud; a la altura fija de 2 m, y al 33, 66 y 100% de la altura comercial del árbol. La excentricidad de la médula (PE), y la no circularidad del fuste (OOR), se determinaron en rodajas cortadas de los extremos de cada troza. Para cada troza se obtuvo el GSI, el Et, y las  $\sigma_L$ , en las exposiciones cardinales Norte, Sur, Este y Oeste del fuste. No se observaron cambios significativos en la PE y la OOR con la posición en la altura en el fuste. Sin embargo, la PE tendió a disminuir en dirección base-ápice. La PE se correlacionó positiva y significativamente con la OOR. No hubo correlaciones significativas entre la PE y la OOR, con los valores de GSI y de  $\sigma_L$ , tales como rangos, promedios, máximos y mínimos. La PE y la OOR, se correlacionaron negativa y significativamente con el Et promedio y con el Et mínimo de las trozas.

**Palabras claves:** Ovalidad, excentricidad.

## Abstract

In the present study, the relationships between pith eccentricity (PE) and out-of-roundness (OOR), with growth stress indicator (GSI), modulus of elasticity (Et), and longitudinal growth stress ( $\sigma_L$ ) in *Eucalyptus nitens* trees with sawable dimensions were investigated, coming from a plantation of 18-year-old, grown at the Biobío region, Chile. Nine apparently straight trees were randomly selected. Four 2,4 m logs were cut from each selected tree; at 2 m height, and at 33, 66 and 100% of the tree merchantable height. Pith eccentricity and out-of-roundness of each log were measured on disks cut from both ends of each log. For each log the growth stress indicator, modulus of elasticity, and longitudinal growth stress were obtained at North, South, East and West stem expositions. No significant changes were observed in PE and OOR with the axial position in the stem. However, the PE tended to decrease towards the treetop. There was a significant positive correlation between PE and OOR. There were no significant correlations between PE and OOR, with the GSI and  $\sigma_L$  values (such as range, average, maximum and minimum). Both PE and OOR were significantly negatively correlated with average and minimum Et.

**Keywords:** Ovality, eccentricity.



## Introducción

Uno de los factores claves que limita el uso de las plantaciones del género *Eucalyptus*, como madera aserrada de calidad, son los altos niveles de tensiones de crecimiento en la madera (Yang y Waugh 2001, Yang *et al.* 2005). Altos niveles de tensiones de crecimiento, pueden generar significativos problemas económicos (Entwistle *et al.* 2014).

Las tensiones de crecimiento que se encuentran en equilibrio en el árbol en pie (Malan y Gerischer 1987), son liberadas durante la corta y trozado del árbol, y a lo largo de las operaciones de aserrío posteriores, generando un conjunto de deformaciones que provocan distintos defectos en las trozas o productos ya aserrados (Touza 2001).

Las tensiones de crecimiento son originadas durante el proceso de maduración de las células que produce el cambium (Nicholson 1973, Trugilho *et al.* 2002). Durante este proceso, las células que crecen cada año sobre la periferia del fuste, tienden a expandirse lateralmente y a contraerse longitudinalmente, sin embargo, estos cambios dimensionales son impedidos por las células que han sido formadas en años anteriores, generando un conjunto de tensiones (Vignote *et al.* 1996, Yang y Waugh 2001, Yang *et al.* 2005, Biechele *et al.* 2009, Alméras y Clair 2016).

Las tensiones de crecimiento en dirección longitudinal son las más intensas y variables (Trugilho y Oliveira 2008), y las más importantes desde el punto de vista de la calidad de la madera sólida (Yang y Waugh 2001). Aunque las tensiones de crecimiento no pueden ser medidas directamente, estas pueden ser calculadas a partir de mediciones de deformación y del módulo de elasticidad de la madera en tensión,  $E_t$  (Yang y Waugh 2001, Raymond *et al.* 2004, Yang *et al.* 2005).

La deformación en dirección longitudinal, que es provocada por la liberación de las tensiones de crecimiento longitudinales ( $\sigma_L$ ), es considerada como un estimador directo de los niveles de  $\sigma_L$  (Valencia *et al.* 2011). Distintos métodos han sido desarrollados para poder medir estas deformaciones longitudinales, siendo los más utilizados: el método Nicholson, el método

CIRAD-Forêt y el método “strain gauge”; y que básicamente difieren entre sí, en la forma en que las  $\sigma_L$  son liberadas (Yang y Waugh 2001).

El método CIRAD-Fôret permite realizar mediciones repetibles de deformación longitudinal (Raymond *et al.* 2004) y puede ser considerado como un método no destructivo debido a su reducido daño físico en el fuste (Trugilho y Oliveira 2008). Este método básicamente permite registrar el desplazamiento longitudinal que experimentan dos clavos insertos en la madera a una distancia fija, luego de liberar las  $\sigma_L$ . Este desplazamiento registrado, es conocido como “indicador de la tensión de crecimiento”, GSI, y aunque no corresponde directamente a la deformación longitudinal, se considera proporcional a ésta (Yang *et al.* 2005), y por lo mismo han sido ampliamente utilizados para estimar los niveles de  $\sigma_L$  (Raymond *et al.* 2004, Valdés 2004, Vignote *et al.* 1996, Biechele *et al.* 2009, Medhurst *et al.* 2011, Valencia *et al.* 2011, Díaz *et al.* 2012).

La mayoría de los estudios en *E. nitens* en relación a las  $\sigma_L$ , miden el GSI a través del método CIRAD-Fôret, y lo utilizan como un indicador del nivel de  $\sigma_L$  (Valdés 2004, Biechele *et al.* 2009, Medhurst *et al.* 2011, Valencia *et al.* 2011, Díaz *et al.* 2012).

La presencia local de valores anormalmente elevados de tensión de crecimiento, suelen estar relacionados con la presencia de madera de reacción, en un área concreta del fuste (Touza 2001). La presencia de madera de reacción, ha sido generalmente correlacionada con variaciones de otras propiedades de la madera (Alméras *et al.* 2005).

La variación alrededor del fuste (variación circunferencial) de la deformación longitudinal, del módulo de elasticidad, y del crecimiento radial, y su efecto sobre la regulación de la orientación del fuste, ha sido examinada en individuos severamente inclinados (Alméras *et al.* 2005). Relaciones similares, entre el crecimiento excéntrico, o no circularidad del fuste, con la variación circunferencial del indicador de las tensiones de crecimiento, del módulo de elasticidad de la madera, y de las tensiones de crecimiento longitudinales, en individuos sin inclinación aparente, aún no han sido examinadas.



En el presente estudio se investigaron las relaciones entre la excentricidad de la médula (PE), y la no circularidad del fuste (OOR), con el indicador de las tensiones de crecimiento (GSI), el módulo de elasticidad de la madera en tensión ( $E_t$ ), y las tensiones de crecimiento longitudinales ( $\sigma_L$ ), en árboles aparentemente rectos de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables.

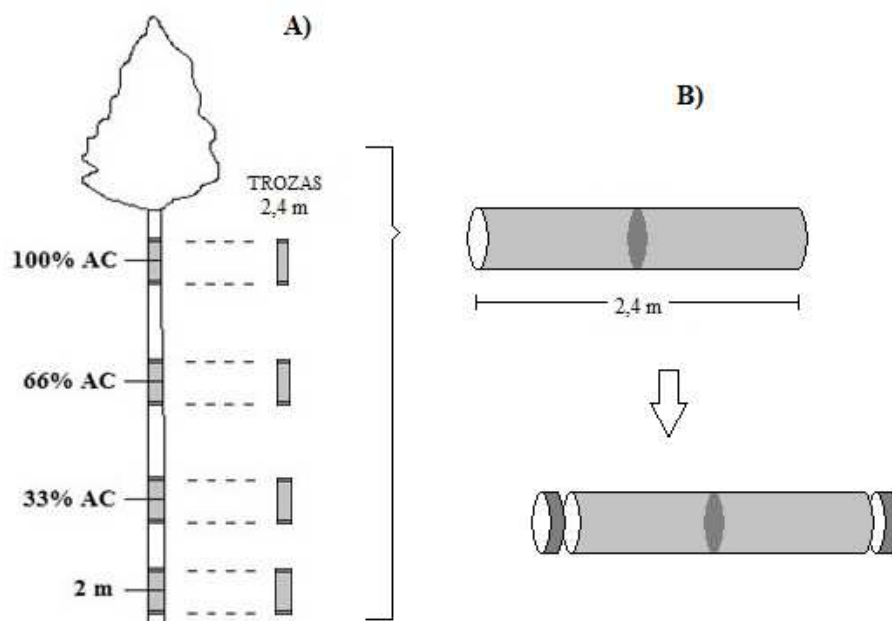


## Metodología

Los individuos utilizados en este estudio, provinieron de una plantación de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) de 18 años de edad, manejada para producir madera sólida, ubicada a 340 m s.n.m. en la Región del Biobío, Chile (37° 51' S y 72° 07' O). El sitio de la plantación presenta una topografía plana y pendientes inferiores a 7%, una precipitación promedio anual que supera los 1000 mm, distribuidos en un 80% entre abril y octubre, y temperaturas promedios que oscilan entre los 5°C la mínima y los 21°C la máxima (Díaz *et al.* 2012). La plantación fue intervenida con dos raleos, efectuados a los 7 y 9 años de edad, con densidades residuales de 500 y 300 árboles/ha respectivamente.

Se seleccionaron 9 árboles aleatoriamente, sin evidencia de daño o enfermedad, y sin inclinación con respecto a la posición vertical normal. Los individuos tuvieron un diámetro a la altura de pecho (DAP; medido a 1,3 m sobre el nivel del suelo) promedio de 41,4 cm (CV = 14,9%), y una altura total promedio de 42,2 m (CV = 3,7%).

En cada árbol seleccionado se cortaron trozas de 2,4 m de largo, centradas en longitud; a la altura fija de 2 m, y al 33, 66 y 100% de la altura comercial del árbol (AC; con un diámetro límite de utilización = 20 cm; Figura 3.1A). Los individuos seleccionados tuvieron una AC promedio de 24,4 m.



**Figura 3.1:** Esquema de obtención de muestras en cada árbol individual. A) Obtención de trozas y B) Obtención de rodajas.



#### *Excentricidad de la médula y no circularidad del fuste*

De los extremos de cada troza de 2,4 m de longitud, se cortaron rodajas de aproximadamente 5 cm de espesor, para disponer de 2 rodajas por troza, para las determinaciones de excentricidad y no circularidad del fuste (Figura 3.1B).

En cada rodaja se determinaron los radios Norte, Sur, Este y Oeste. La excentricidad de la médula (PE) para cada rodaja, se determinó utilizando la siguiente ecuación (1):

$$PE(\%) = \frac{r_{\text{máx}} - r_{\text{medio}}}{2 * r_{\text{medio}}} * 100 \quad (1)$$

donde  $r_{\text{máx}}$  es el radio máximo de la rodaja (cm) y  $r_{\text{medio}}$  es el radio promedio de la rodaja (cm). Esta ecuación empleada para obtener la excentricidad, es similar a la utilizada por Medhurst *et al.* (2011) en individuos de *E. nitens*.

Con respecto a la no circularidad (OOR), está se determinó para cada rodela, utilizando la ecuación (2):

$$OOR = \frac{D_{m\acute{a}x} - D_{m\acute{i}n}}{D_{m\acute{a}x}} \quad (2)$$

donde  $D_{m\acute{a}x}$  es el diámetro máximo de la rodela (cm), y  $D_{m\acute{i}n}$  es el diámetro mínimo de la rodela (cm). Esta fórmula (Ecuación 2), es muy similar a la utilizada por Fallah *et al.* (2012).

Los valores de PE y OOR, obtenidos de las rodelas cortadas de los extremos de cada troza, se promediaron para obtener los valores por troza.

#### *Indicador de la tensión de crecimiento*

En cada troza de 2,4 m de largo, se midió el indicador de la tensión de crecimiento (GSI), en las exposiciones cardinales Norte, Sur, Este y Oeste del fuste.

Se utilizó el método CIRAD-Forêt, basado en el método de un orificio único “the single hole method” (Fournier *et al.* 1994). El instrumento utilizado está compuesto por dos clavos que se insertan en la madera (sin corteza), separados entre sí a una distancia de 45 mm a lo largo de la fibra, y además, una estructura metálica que contiene un comparador digital, y que es apoyada sobre los clavos una vez insertos en la madera. Para liberar las tensiones de crecimiento longitudinales en la periferia del fuste, se realiza un orificio con una broca de 20 mm de diámetro en el punto medio entre los dos clavos, y como consecuencia estos clavos se separan. Este desplazamiento de los clavos es registrado por el comparador digital, y corresponde al GSI medido en micrómetros.

#### *Módulo de elasticidad de la madera en tensión*

Se extrajeron vigas de madera de 2 x 2 x 30 cm, en alto, ancho y largo respectivamente, lo más cercano posible al punto de medición del GSI (cuatro vigas por cada troza de 2,4 m de longitud). En total se obtuvieron 144 vigas en estado verde, que fueron sometidas a flexión estática bajo

una carga centrada en la cara tangencial, a una razón  $l/h$  de 14 (donde  $l$  y  $h$  es la luz y el alto de la viga, respectivamente), utilizando una máquina universal de ensayos marca Metrotec, con una capacidad máxima de carga de 20 ton.

Debido a que los valores de módulo de elasticidad obtenidos en los ensayos de flexión, corresponden a valores aparentes (MOEs aparentes, Bodig y Jayne 1982), estos debieron ser corregidos por los efectos del cizalle paralelo a la fibra. Para realizar estas correcciones, se condujeron ensayos anexos en flexión, para seis vigas de  $2 \times 2 \times 55$  cm, en alto, ancho y largo respectivamente, las que fueron ensayadas a distintas relaciones  $l/h$  (8, 14, 18, 22 y 24), siguiendo la metodología propuesta por Timoshenko (1955) y utilizada por Biblis (1965, 2001) y Adamopoulos *et al.* (2007), con el objetivo de obtener el módulo de elasticidad real,  $E$ , y el módulo de rigidez,  $G$ , en flexión.

De este ensayo se obtuvo una relación  $E/G$  de 40. Con este valor se corrigieron los MOEs aparentes de las 144 vigas, siguiendo las deducciones de Bodig y Jayne (1982), y se obtuvieron sus módulos de elasticidad reales en flexión,  $E_s$ , sin efectos del cizalle, los cuales son equivalentes a los módulos de elasticidad en tensión  $E_t$ , paralelo a la fibra. En promedio los MOEs aparentes de las vigas incrementaron en un 20%.

#### *Tensiones de crecimiento longitudinales*

Las tensiones de crecimiento longitudinales ( $\sigma_L$ ) fueron calculadas como el producto entre el  $E_t$  y la deformación de crecimiento longitudinal ( $\epsilon_L$ ). Esta última, que fue obtenida a través de la relación,  $\epsilon_L = 12,3^{-6} \times GSI$ , que utiliza un factor de conversión aproximado para angiospermas estándar (Fournier *et al.* 1994).

#### *Análisis de datos*

El efecto de la posición en la altura del fuste, sobre la excentricidad de la médula, y la no circularidad del fuste, fueron determinados mediante análisis de varianza.

Para cada individuo, la variación alrededor de la circunferencia del fuste (variación circunferencial) del GSI, Et y  $\sigma_L$ ; a la altura fija de 2 m, y al 33, 66 y 100% de la AC, fue calculada a través del rango estadístico (diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo).

Se determinaron las correlaciones de Pearson, entre la excentricidad de la médula y no circularidad del fuste, con las variaciones circunferenciales (Rango) del GSI, Et y  $\sigma_L$ , y además con los valores medios, máximos y mínimos de cada una de estas variables.



## Resultados y discusión

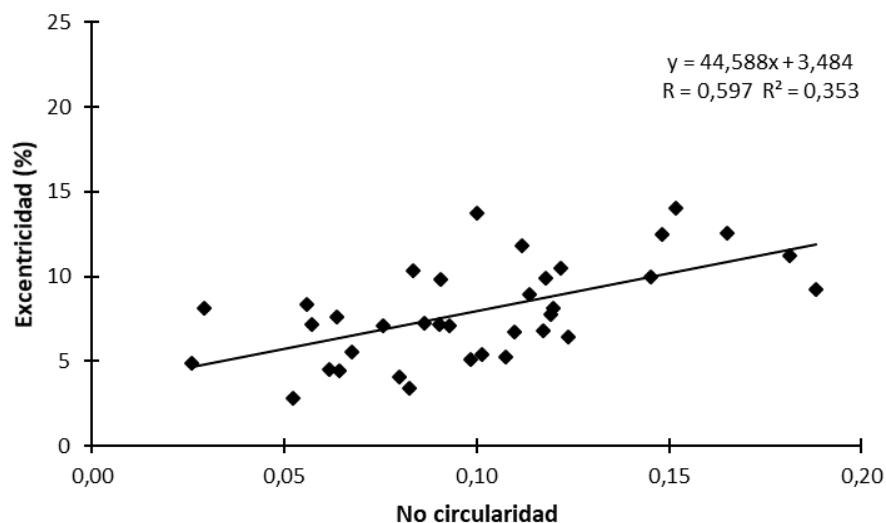
Los resultados del análisis de varianza, indicaron diferencias no significativas ( $P = 0,213$ ) en la excentricidad de la médula (PE) con la posición en la altura en el fuste. No obstante, la PE tendió de disminuir en la altura, con valores medios de 9,66; 7,82; 7,25; y 7,05%, a la altura fija de 2 m, y al 33, 66 y 100% de la AC, respectivamente.

Para el caso de la no circularidad del fuste (OOR), los resultados del análisis de varianza, también indicaron diferencias no significativas ( $P = 0,111$ ) con la posición en la altura en el fuste. Sin embargo, la no circularidad no mostró una tendencia clara en la altura; con valores medios de OOR de 0,13; 0,10; 0,08; y 0,10, a la altura fija de 2 m, y al 33, 66 y 100% de la AC, respectivamente.

Para la excentricidad de la médula, se obtuvo una media global de 7,95%. Este valor fue inferior al valor promedio de 10% reportado por Medhurst *et al.* (2011), para individuos de la misma especie, de 22 años de edad.

Singleton *et al.* (2003) encontró que la parte basal del árbol, tiende a presentar mayor excentricidad y no circularidad, que la parte alta del fuste. Las tendencias observadas en el presente estudio, para PE y OOR, concuerdan con las de Singleton *et al.* (2003).

En la Figura 3.2, se muestra la relación entre la excentricidad de la médula, y la no circularidad del fuste. La correlación entre estas variables fue positiva y significativa ( $P < 0,001$ ). Estos resultados, indican que trozas más circulares (con bajo índice de no circularidad; OOR), estarían asociadas a una menor excentricidad de la médula. En concordancia con lo señalado por Singleton *et al.* (2003).



**Figura 3.2:** Relación entre la excentricidad y la no circularidad del fuste.

*Relación entre la excentricidad de la médula y no circularidad del fuste, con el indicador de las tensiones de crecimiento longitudinales*

No hubo correlaciones significativas entre la excentricidad de la médula (PE) y la no circularidad del fuste (OOR), con la variación del GSI alrededor de la circunferencia del fuste (Rango), ni tampoco con los valores de GSI promedios, máximos y mínimos (Tabla 3.1).

**Tabla 3.1:** Coeficientes de correlación de Pearson entre la excentricidad de la médula (PE), y la no circularidad del fuste (OOR), con el rango en GSI (Rango), el GSI promedio (Promedio), el GSI máximo (Máximo), y el GSI mínimo (Mínimo).

	PE (%)	OOR	Rango	Promedio	Máximo
<b>OOR</b>	0,597**				
<b>Rango</b>	0,028	-0,021			
<b>Promedio</b>	0,023	-0,053	0,522**		
<b>Máximo</b>	0,066	-0,012	0,808**	0,905**	
<b>Mínimo</b>	0,071	0,010	-0,076	0,778**	0,525**

\*\* =  $P < 0,01$ ; (n = 36, tamaño de la muestra)



Como se observa en la Tabla 3.1, hubo una correlación positiva y significativa ( $P < 0,01$ ) entre el rango y el valor máximo de GSI. Sin embargo, no hubo una correlación significativa entre el rango y el valor mínimo de GSI. Estos resultados, indican que una mayor variación circunferencial en GSI (mayor rango), estaría dada por un aumento en los valores máximos de GSI, y no por un aumento en los valores mínimos de GSI, los que se mantienen constantes.

*Relación entre la excentricidad de la médula y no circularidad del fuste, con el módulo de elasticidad en tensión*

Como se muestra en la Tabla 3.2, la excentricidad de la médula se correlacionó negativa y significativamente ( $P < 0,05$ ) con el Et promedio y con el Et mínimo. Resultados similares se obtuvieron para la no circularidad del fuste, que también se correlacionó negativa y significativamente ( $P < 0,01$ ) con el Et promedio y con el Et mínimo.

**Tabla 3.2:** Coeficientes de correlación de Pearson entre la excentricidad de la médula (PE), y la no circularidad del fuste (OOR), con el rango en Et (Rango), el Et promedio (Promedio), el Et máximo (Máximo), y el Et mínimo (Mínimo).

	PE (%)	OOR	Rango	Promedio	Máximo
<b>Rango</b>	0,047	0,262			
<b>Promedio</b>	-0,354*	-0,426**	0,035		
<b>Máximo</b>	-0,289	-0,270	0,477**	0,869**	
<b>Mínimo</b>	-0,346*	-0,515**	-0,375*	0,886**	0,636**

\* =  $P < 0,05$ , \*\* =  $P < 0,01$ ; (n = 36, tamaño de la muestra)

Estos resultados indican que las trozas más circulares (con bajo índice de no circularidad; OOR), y que presentaron menor excentricidad de la médula, tuvieron mayor módulo de elasticidad promedio, y un mayor valor mínimo de Et.

*Relación entre la excentricidad de la médula y no circularidad del fuste, con las tensiones de crecimiento longitudinales*

No hubo correlaciones significativas entre la PE y la OOR, con la variación de la  $\sigma_L$  alrededor de la circunferencia del fuste (Rango), ni tampoco con los valores de la  $\sigma_L$  promedios, máximos y mínimos (Tabla 3.3).

**Tabla 3.3:** Coeficientes de correlación de Pearson entre la excentricidad de la médula (PE), y la no circularidad del fuste (OOR), con el rango en  $\sigma_L$  (Rango), la  $\sigma_L$  promedio (Promedio), la  $\sigma_L$  máxima (Máximo), y la  $\sigma_L$  mínima (Mínimo).

	PE (%)	OOR	Rango	Promedio	Máximo
<b>Rango</b>	-0,052	-0,056			
<b>Promedio</b>	-0,115	-0,211	0,444**		
<b>Máximo</b>	-0,082	-0,147	0,742**	0,912**	
<b>Mínimo</b>	-0,064	-0,156	-0,008	0,866**	0,664**

\*\* =  $P < 0,01$ ; (n = 36, tamaño de la muestra)

Como se observa en la Tabla 3.3, al igual que en el caso del GSI, hubo una correlación positiva y significativa ( $P < 0,01$ ) entre el rango y el valor máximo de  $\sigma_L$ . Sin embargo, no hubo una correlación significativa entre el rango y el valor mínimo de  $\sigma_L$ . Estos resultados indican que una mayor variación circunferencial en las  $\sigma_L$  (mayor rango), estaría dada por un aumento en los valores máximos de  $\sigma_L$ , y no por un aumento en los valores mínimos de  $\sigma_L$ , los que se mantendrían constantes.

En el presente estudio se utilizaron individuos aparentemente rectos. En estos individuos, no hubo una correlación significativa entre las variaciones circunferenciales, en GSI y  $\sigma_L$ , medidas a través del rango estadístico, y los valores de PE y OOR (Tabla 3.1 y Tabla 3.3). No obstante lo anterior, la PE y la OOR, se correlacionaron negativa y significativamente con el Et promedio y con el Et mínimo.

## Conclusiones

En individuos de *E. nitens* de 18 años de edad, aparentemente rectos, manejados para la producción de madera sólida; los cambios en la excentricidad de la médula (PE) y la no circularidad (OOR), con la posición en la altura en el fuste, no fueron significativos. Sin embargo, la excentricidad de la médula tendió a disminuir en dirección base-ápice.

La excentricidad de la médula se correlacionó positiva y significativamente con la no circularidad del fuste. No hubo correlaciones significativas entre la excentricidad de la médula y la no circularidad del fuste, con los valores (promedios, rangos, máximos y mínimos) del indicador de la tensión de crecimiento (GSI) y de las tensiones de crecimiento longitudinales ( $\sigma_L$ ). La excentricidad de la médula y la no circularidad del fuste, se correlacionaron negativa y significativamente con los valores promedios y mínimos de módulo de elasticidad en tensión (Et).



## Referencias

- Adamopoulos, S.; Passialis, C.; Voulgaridis, E. 2007.** Strength properties of juvenile and mature wood in black locust (*Robinia pseudoacacia* L.). *Wood and Fiber Science* 39 (2): 241-249.
- Alméras, T.; Clair, B. 2016.** Critical review on the mechanisms of maturation stress generation in trees. *Journal of the Royal Society Interface* 13(122): 20160550.
- Alméras, T.; Thibaut, A.; Gril, J. 2005.** Effect of circumferential heterogeneity of wood maturation strain, modulus of elasticity and radial growth on the regulation of stem orientation in trees. *Trees* 19: 457-467.
- Biblis, E.J. 1965.** Analysis of wood-fiberglass composite beams within and beyond the elastic region. *Forest Products Journal* 15 (2): 81-88.
- Biblis, E.J. 2001.** Tension parallel to grain, pure flexural stiffness, and modulus of rigidity of clear wood of seven eastern red oaks. *Forest Products Journal* 51 (4): 87-89.
- Biechele, T.; Nutto, L.; Becker, G. 2009.** Growth strain in *Eucalyptus nitens* at different stages of development. *Silva Fennica* 43(4): 669-679.
- Bodig, J.; Jayne, A. 1982.** *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold Company Inc. 712 p.
- Díaz, S.; Espinoza, M.; Valenzuela, L.; Cancino, J.; Lasserre, J.P. 2012.** Efecto del raleo en el crecimiento y algunas propiedades de la madera de *Eucalyptus nitens* en una plantación de 15 años. *Maderas. Ciencia y tecnología* 14(3): 373-388.

- Entwistle, K.; Chauhan, S.; Sharma, M.; Walker, J. 2014.** The effect of saw kerf width on the value of the axial growth stress measured by slitting a log along its axis. *Wood Material Science & Engineering* 11(1): 1-12.
- Fallah, A.; Riahifar, N.; Barari, K.; Parsakhoo, A. 2012.** Investigating the out-of-roundness and pith-off-centre in stems of three broadleaved species in Hyrcanian forests. *Journal of Forest Science* 58(11): 513-518.
- Fournier, M.; Chanson, B.; Thibaut, B.; Guitard, D. 1994.** Mesures des déformations résiduelles de croissance à la surface des arbres, en relation avec leur morphologie. Observations sur différentes espèces. *Annals of Forest Science* 51: 249-266.
- Malan, F.S.; Gerischer, G.F.R. 1987.** Wood property differences in South African grown *Eucalyptus grandis* trees of different growth stress levels. *Holzforschung* 41(6): 331-335.
- Medhurst, J.; Ottenschlaeger, M.; Wood, M.; Harwood, C.; Beadle, C; Valencia, J.C. 2011.** Stem eccentricity, crown dry mass distribution, and longitudinal growth strain of plantation-grown *Eucalyptus nitens* after thinning. *Canadian Journal of Forest Research* 41: 2209-2218.
- Nicholson, J.E. 1973.** Growth stress differences in eucalypts. *Forest Science* 19: 169-174.
- Raymond, C.A.; Kube, P.D.; Pinkard, L.; Savage, L.; Bradley, A.D. 2004.** Evaluation of non-destructive methods of measuring growth stress in *Eucalyptus globulus*: relationships between strain, wood properties and stress. *Forest Ecology and Management* 190: 187-200.
- Singleton, R.; DeBell, D.S.; Marshall, D.D.; Gartner, B.L. 2003.** Eccentricity and fluting in young-growth Western Hemlock in Oregon. *Western Journal of Applied Forestry* 18(4): 221-228.

- Timoshenko, S. 1955.** *Strength of materials*. 3rd. Ed. Part I. Elementary theory and problems. Van Nostrand, New York.
- Touza, M.C. 2001.** Tensiones de crecimiento en *Eucalyptus globulus* de Galicia (España). Influencia de la silvicultura y estrategias de aserrado. *Maderas. Ciencia y tecnología* 3(1-2): 68-89.
- Trugilho, P.F.; Lima, J.T.; Rosado, S.C.S.; Mendes, L.M.; Mori, F.A.; Souza, M.A.M. 2002.** Avaliação da tensão de crescimento em clones de *Eucalyptus*. *Floresta e Ambiente* 9(1): 38-44.
- Trugilho, P.F.; Oliveira, J.T. 2008.** Relationships and estimates of longitudinal growth stress in *Eucalyptus dunnii* at different ages. *Revista Árbore* 32(4): 723-729.
- Valdés, R. 2004.** Determinación de tensiones de crecimiento de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden mediante un método no destructivo. Memoria de título para optar al grado de ingeniero en industrias de la madera, Universidad de Talca, Chile. 48p.
- Valencia, J.; Hardwood, C.; Washusen, R.; Morrow, A.; Wood, M.; Volker, P. 2011.** Longitudinal growth strain as a log and wood quality predictor for plantation-grown *Eucalyptus nitens* sawlogs. *Wood Science and Technology* 45: 15-34.
- Vignote, S.; Molinero, I.; Gerard, J.; Diez, M.R. 1996.** Estudio de las tensiones de crecimiento de *Eucalyptus globulus* Labill en Galicia y su relación con las características de estación y morfológicas del propio árbol. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales* 5(1): 153-165.
- Yang, J.L.; Waugh, G. 2001.** Growth stress, its measurement and effects. *Australian Forestry* 64(2): 127-135.

**Yang, J.L.; Baillères, H.; Okuyama, T.; Muneri, A.; Downes, G. 2005.** Measurement methods for longitudinal surface strain in trees: a review. *Australian Forestry* 68(1): 34-43.



## Conclusiones Generales

En individuos de *E. nitens* de 18 años de edad, manejados para la producción de madera sólida; el contenido de humedad verde (CHv) y la densidad básica (DB) de la madera, cambiaron significativamente con la posición radial y axial en el fuste.

Se observaron distintos patrones de variación radial, del CHv y de la DB, a lo largo del fuste del árbol, y en general, los cambios radiales (en CHv y DB) fueron menores en la parte alta del fuste, y los cambios axiales, menores en el leño cercano a la corteza.

La parte alta del fuste se caracterizó por presentar altos valores de DB, bajos valores de CHv, y una menor variabilidad radial. Características favorables para el procesamiento de la madera.

La velocidad de la onda acústica en árboles en pie ( $V_{\text{ÁRBOL}}$ ), encontrada en el lado barlovento (exposición Sur) de los árboles, fue significativamente mayor a la encontrada en el lado sotavento (exposición Norte). Diferencias que posiblemente fueron generadas por la formación de madera de reacción.

No hubo correlaciones significativas entre la  $V_{\text{ÁRBOL}}$  y las distintas características examinadas en la madera (contenido de humedad verde (CHv), densidad verde (Dv), densidad básica (DB), indicador de la tensión de crecimiento (GSI), módulo de elasticidad en tensión (Et), y tensión de crecimiento longitudinal ( $\sigma_L$ )). Sin embargo, estos resultados podrían cambiar al utilizar un mayor tamaño de muestra.

La velocidad de la onda acústica en trozas ( $V_{\text{TROZA}}$ ), cambió significativamente con la posición de la troza en el fuste, aumentando en dirección base-ápice. La  $V_{\text{TROZA}}$  se correlacionó significativamente con distintos parámetros de calidad de la madera; esta variable podría ser utilizada para clasificar trozas con un mayor módulo de elasticidad en tensión (Et), un menor contenido de humedad verde (CHv), y una menor densidad verde (Dv).



La excentricidad de la médula (PE) se correlacionó significativamente con la no circularidad del fuste (OOR); indicando que trozas más circulares (con bajo índice de no circularidad) estarían asociadas a una menor excentricidad de la médula.

Los árboles utilizados en este estudio, individuos aparentemente rectos, no mostraron correlaciones significativas entre la excentricidad de la médula y la no circularidad del fuste, con los valores (promedios, rangos, máximos y mínimos) del indicador de la tensión de la tensión de crecimiento (GSI) y de las tensiones de crecimiento longitudinales ( $\sigma_L$ ). Sin embargo, tanto la excentricidad de la médula como la no circularidad del fuste, se correlacionaron significativamente con los valores (promedios y mínimos) de módulo de elasticidad de la madera. Trozas con menor excentricidad de la médula, y más circulares, tuvieron un mayor módulo de elasticidad en tensión.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, se recomienda para trabajos futuros, considerar la variación de la velocidad de la onda acústica en el árbol en pie, con la exposición cardinal en el fuste, recomendando como estrategia de muestreo un mínimo de dos mediciones por árbol, en exposiciones cardinales opuestas. Se recomienda además, estudiar las posibles relaciones entre la velocidad de la onda acústica en el árbol en pie, y distintas características de la madera, pero utilizando un tamaño de muestra mayor al utilizado en este estudio.

Como trabajo futuro, se recomienda además, investigar si las relaciones entre la excentricidad de la médula, y la no circularidad del fuste, con distintas características de la madera, cambian dependiendo del grado de inclinación de los árboles estudiados.