

# RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE LA ONDA ACÚSTICA Y DISTINTAS CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA, EN ARBOLES DE *Eucalyptus nitens* CON DIMENSIONES ASERRABLES

## RELATIONSHIP BETWEEN ACOUSTIC WAVE VELOCITY AND DIFFERENT CHARACTERISTICS OF WOOD IN *Eucalyptus nitens* TREES WITH SAWING DIMENSIONS

Margarette Omonte<sup>1,\*</sup>, Luis Valenzuela-Hurtado<sup>1</sup>

### 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 ( $\sigma_L$ ). No hubo correlaciones significativas entre la  $V_{\text{ÁRBOL}}$  y las distintas características examinadas en la madera (CHv, Dv, DB, GSI, Et y  $\sigma_L$ ). La velocidad de la onda acústica en trozas ( $V_{\text{TROZA}}$ ), 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; ésta 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).

**Palabras claves:** Contenido de humedad, densidad básica, método de resonancia, método tiempo de vuelo, módulo elasticidad, propiedades acústicas.

### ABSTRACT

In this study, the relationships of acoustic wave velocity measured on the standing trees ( $V_{\text{ÁRBOL}}$ ) and logs ( $V_{\text{TROZA}}$ ) to different wood characteristics of *Eucalyptus nitens* trees of 18-year-old, grown at the Biobío region Chile, with sawing dimensions were investigated. Nine trees were randomly selected. In each selected tree the  $V_{\text{ÁRBOL}}$  at North, South, East, and West of cardinal exposition of the stem was measured.  $V_{\text{TROZA}}$  in the middle of logs taken at a fixed height of 2 m and 33 %, 66 %, and 100 % of the tree merchantable height was measured. 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. There were no significant correlations among  $V_{\text{ÁRBOL}}$  and different characteristics examined in wood (CHv, Dv, DB, GSI, Et y  $\sigma_L$ ). Acoustic wave velocity of log ( $V_{\text{TROZA}}$ ) changed significantly with the log position in the tree, increasing with tree height.  $V_{\text{TROZA}}$  was significantly correlated to different parameters of wood quality and this variable could be used to segregate logs with a higher modulus of elasticity in tension (Et), lower green moisture content (CHv), and lower green density (Dv).

**Keywords:** Moisture content, basic density, resonance method, time-of-flight principle, modulus of elasticity, acoustic properties.

<sup>1</sup>Laboratorio Silvotecnológico de la Madera, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

\*Autor para correspondencia: margaretomonte@udec.cl

Recibido: 22.01.2020 Aceptado: 30.07.2020

## 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, 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) 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

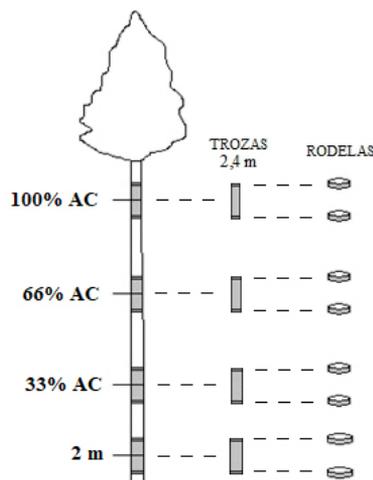
Para la medición de la velocidad de la onda acústica en árboles en pie ( $V_{\text{ÁRBOL}}$ ), se utilizó el instrumento portátil *FAKOPP Microsecond Timer*. Este instrumento mide el tiempo de vuelo (tv) de una onda acústica entre dos puntos de distancia conocida (d), y mediante la relación  $d/tv$ , 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 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 1:** Esquema de obtención de trozas y rodajas en cada árbol individual (AC; altura comercial del árbol, con un diámetro límite de utilización = 20 cm).

### Indicador de la tensión de crecimiento

En cada troza de 2,4 m de largo (Figura 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 rodelas de aproximadamente 5 cm de espesor, como se muestra en la Figura 1, y se dispuso de un conjunto de 8 rodelas por árbol para las determinaciones de contenido de humedad verde, densidad verde y densidad básica. 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. Para determinar el contenido de humedad verde (CHv), la densidad verde (Dv) y la densidad básica (DB) de cada rodela, se utilizó la siguiente Ecuación 1, Ecuación 2 y Ecuación 3.

$$CHv(\%) = \left[ \frac{M_v - M_0}{M_0} \right] \times 100 \quad (1)$$

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

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

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  $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , 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 (ASTM D2395-93-1997).

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 rodelas, 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 Dv y la DB 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, Dv y DB promedios de las trozas, se obtuvieron como el promedio aritmético de las mediciones realizadas en las rodelas (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 (Dv), mediante la siguiente Ecuación 4:

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

## Módulo de elasticidad de la madera en tensión

Se extrajeron piezas de madera de 2 cm x 2 cm x 30 cm, en alto, ancho y largo respectivamente, lo más cercano posible al punto de medición del GSI (cuatro piezas por cada troza de 2,4 m de longitud). En total se obtuvieron 144 piezas 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 pieza, respectivamente), utilizando una máquina universal de ensayos marca Metrotec, con una capacidad máxima de carga de 20000 kg.

Dado 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 efectuaron ensayos anexos en flexión, para seis piezas de 2 cm x 2 cm 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), Biblis (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 piezas, 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

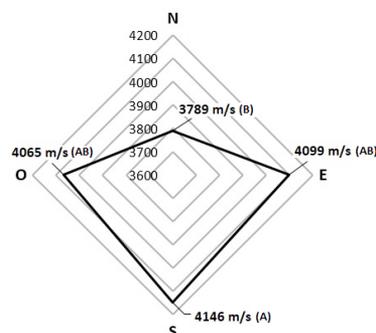
Las tensiones de crecimiento longitudinales ( $\sigma_L$ ) fueron calculadas como el producto entre el  $E_t$  y la deformación de crecimiento longitudinal ( $\epsilon_L$ ). Esta última, que fue obtenida a través de la relación,  $\epsilon_L = 12,3^{-6} \times \text{GSI}$ , que utiliza un factor de conversión 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,  $E_t$  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,  $E_t$ , y  $\sigma_L$ , a nivel de árbol, y entre las variables  $V_{\text{TROZA}}$ , CHv, Dv, DB, MOEd, GSI,  $E_t$ , 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



**Figura 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 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.

Los valores medios de  $V_{\text{ÁRBOL}}$  encontrados en este estudio (Figura 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 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 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.

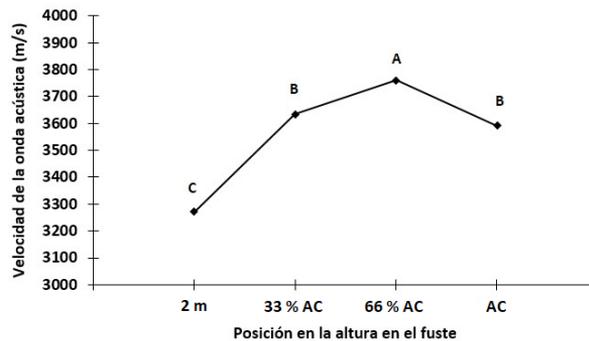
	$V_{\text{ÁRBOL}}$	CHv	Dv	DB	GSI	Et
CHv	-0,576					
Dv	0,004	-0,602				
DB	0,444	-0,965**	0,788*			
GSI	0,135	-0,034	-0,564	-0,172		
Et	0,421	-0,828**	0,434	0,763*	0,200	
$\sigma_L$	0,297	-0,434	-0,226	0,243	0,882**	0,636

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

Como se observa en la Tabla 1, no hubo correlaciones significativas entre la  $V_{\text{ÁRBOL}}$  y las distintas características examinadas en la madera. Una posible causa de estos resultados, es que la velocidad acústica en el árbol en pie representa solo la porción basal del fuste del árbol (específicamente el leño cercano a la corteza), mientras que el resto de las variables representan un valor promedio del fuste. Sin embargo, al correlacionar la  $V_{\text{ÁRBOL}}$  con las variables (CHv, Dv, DB, GSI, Et y  $\sigma_L$ ) obtenidas solo para la troza basal, tampoco hubo correlaciones significativas (resultados no mostrados).

No obstante lo anterior, como se muestra en la Tabla 1, el CHv 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



**Figura 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  $P < 0,05$ .

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 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).

Este aumento general en la  $V_{\text{TROZA}}$  promedio con la altura en el fuste (Figura 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. Cabe señalar, que el módulo de elasticidad en tensión (Et) mostró un comportamiento similar a la  $V_{\text{TROZA}}$  con la altura en el fuste. Los valores de Et a la altura fija de 2 m, y al 33 %, 66 % y 100 % de la altura comercial fueron de 14366 MPa, 16820 MPa, 16011 MPa y 15204 MPa respectivamente.

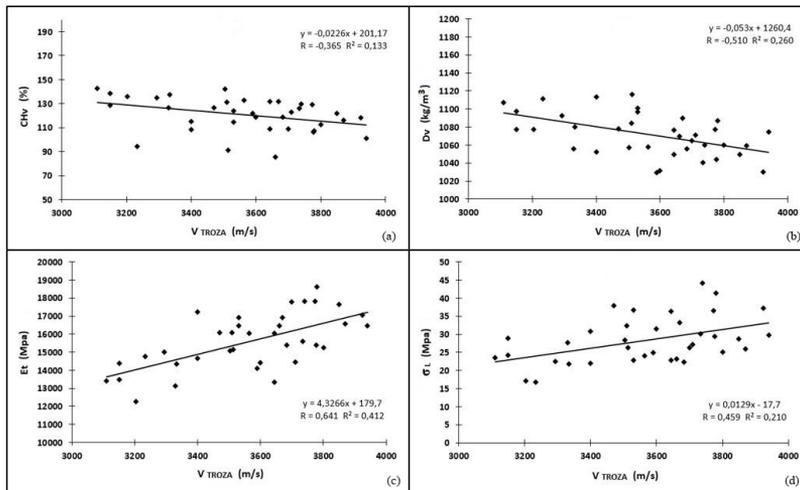
En la Tabla 2 se presentan los coeficientes de correlación de Pearson entre la velocidad de la onda acústica en trozas ( $V_{\text{TROZA}}$ ), el módulo de elasticidad dinámico (MOEd), el contenido de humedad verde (CHv), la densidad verde (Dv), la densidad básica (DB), el indicador de la tensión de 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:** 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 ( $\sigma_L$ ); a nivel de trozas.

	$V_{\text{TROZA}}$	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, la  $V_{\text{TROZA}}$  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  $V_{\text{TROZA}}$  se correlacionó positiva y significativamente con el Et ( $r = 0,641$ ;  $P < 0,01$ ), y con la  $\sigma_L$  ( $r = 0,459$ ;  $P < 0,01$ ).



**Figura 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  $V_{TROZA}$ .

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). 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 4.

Como se observa en la Tabla 2 y la Figura 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, Figura 4).

En individuos de la misma especie, 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, módulo de elasticidad, módulo de ruptura, y otras propiedades mecánicas de la madera. En el presente estudio, en cambio, no se reportaron correlaciones significativas entre la velocidad acústica obtenida en árboles en pie, y las distintas características examinadas en la madera (Tabla 1). Posiblemente el pequeño tamaño de muestra utilizado 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 ( $V_{ÁRBOL}$ ), fueron mayores a las obtenidas por el método de resonancia ( $V_{TROZA}$ ), 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 la sección transversal completa (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 ( $V_{ÁRBOL}$ ), 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  $V_{ÁRBOL}$  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 ( $E_t$ ), 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 ( $E_t$ ), un menor contenido de humedad verde (CHv), y una menor densidad verde (Dv).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores hacen expreso su agradecimiento a la Empresa Forestal Mininco S.A., por facilitar el material para el desarrollo de este estudio.

## REFERENCIAS

**Adamopoulos, S.; Passialis, C.; Voulgaridis, E. 2007.** Strength properties of juvenile and mature wood in black locust (*Robinia pseudoacacia* L.). *Wood Fiber Sci* 39(2): 241-249. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1351>.

**ASTM . 1997.** *Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood-Based Materials*. ASTM D2395-93. 1997. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.

**Biblis, E.J. 1965.** Analysis of wood-fiberglass composite beams within and beyond the elastic region. *For Prod J* 15(2): 81-88. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10015371912/>.

**Biblis, E.J. 2001.** Tension parallel to grain, pure flexural stiffness, and modulus of rigidity of clear wood of seven eastern red oaks. *For Prod J* 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 Genet Genomes* 6(5): 757-765. <https://doi.org/10.1007/s11295-010-0289-7>.

**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. <https://doi.org/10.3390/f5040744>.

**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. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000034>.

**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. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2012005000009>.

**Dickson, R.L.; Raymond, C.A.; Joe, W.; Wilkinson, C.A. 2003.** Segregation of *Eucalyptus dunnii* logs using acoustics. *Forest Ecol Manag* 179(1-3): 243-251. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00519-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00519-4).

**Farrell, R.; Innes, T.C.; Harwood, C.E. 2012.** Sorting *Eucalyptus nitens* plantation logs using acoustic wave velocity. *Australian Forestry* 75(1): 22-30. <https://doi.org/10.1080/00049158.2012.10676382>

**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. *Ann For Sci* 51(3): 249-266. <https://doi.org/10.1051/forest:19940305>.

**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. *Rev Arvore* 35(2): 349-358. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000200019>.

**Grabianowski, M.; Manley, B.; Walker, J. 2006.** Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber. *Wood Sci Technol* 40(3): 205-216. <https://doi.org/10.1007/s00226-005-0038-5>.

**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 Ecol Manag* 205(1-3): 375-383. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.037>.

**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 Ecol Manag* 239(1-3): 217-221. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.12.009>.

**Lindström, H.; Harris, P.; Nakada, R. 2002.** Methods for measuring stiffness of Young trees. *Holz Roh-Werkst* 60(3): 165-174. <https://doi.org/10.1007/s00107-002-0292-2>.

**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. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2011000200009>.

**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. <https://appita.com/publication-resources/appita-magazine-appita-peer-reviewed-journal>.

**Raymond, C.A.; Muneri, A. 2001.** Nondestructive sampling of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* for wood properties. I. Basic density. *Wood Sci Technol* 35(1-2): 27-39. <https://doi.org/10.1007/s002260000078>.

**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. <https://doi.org/10.3390/f10090728>.

**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-Cienc Tecnol* 14(2): 209-224. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2012000200008>.

**Timoshenko, S. 1955.** *Strength of materials*. 3rd. Ed. Part I. Elementary theory and problems. Van Nostrand, New York, USA.

**Valencia, J. 2008.** Application of non-destructive evaluation techniques to the prediction of solid-wood suitability of plantation grown *Eucalyptus nitens* logs. MSc Thesis, University of Tasmania, Australia. <https://eprints.utas.edu.au/22211/>.

**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 FPL-RP-585. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory Madison, WI, USA. 9 p. <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/5975>.

**Wang, X. 2013.** Acoustic measurements on trees and logs: a review and analysis. *Wood Sci Technol* 47(5): 965-975. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0552-9>.