Estudio exploratorio para la caracterización de la tasa de secado de la madera de *Eucalyptus nitens*, aplicando modelos de regresión múltiple.

Exploratory study for the characterization of the wood drying rate of *Eucalyptus nitens* timber, applying multiple regression models.

Claudio Montero¹ y Carlos Rozas¹

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue proponer modelos para predecir la tasa de secado en madera de *Eucalyptus nitens*. Para esto, se utilizaron piezas tangenciales con espesor de 36 mm, un ancho 100 mm y un largo 1.000 mm, las cuales se sometieron a secado isotérmico en una cámara convectiva semi-industrial, controlando la masa a intervalos regulares de tiempo. Se utilizaron dos condiciones de secado; Condición 1 (temperatura bulbo seco/húmedo 40/35 ° C) y Condición 2 (55/50 ° C) y una velocidad del aire de 2 (m / s). Los resultados mostraron que las piezas de *Eucalyptus nitens* presentaron secado a tasa decrecientes, donde el contenido de humedad crítico fue el contenido de humedad inicial. El punto de saturación de la fibra experimental varió con la temperatura de secado, con error de hasta el 6,3% con respecto al valor teórico. La tasa de secado fue afectada de forma significativa por el contenido de humedad y la temperatura de bulbo seco. Finalmente los modelos de regresión simple y múltiple (valor-p: <0,001 y r^2 : 0,8623), fueron significativos y de alta capacidad de predicción para determinar la tasa de secado en piezas de *Eucalyptus nitens*.

Palabras clave: Tasa de secado, *Eucalyptus nitens*, punto de saturación de la fibra, modelo matemático, secado.

Abstract

The aim of this research was to propose models to predict the drying rate of *Eucalyptus nitens* wood. For this, tangential pieces with a thickness of 36 mm, a width of 100 mm and a length of 1000 mm were used, which were subjected to isothermal drying in a semi-industrial convective chamber, controlling the mass at regular intervals of time. The tests considered two conditions; Condition 1 (dry / wet bulb temperature 40/35 ° C) and condition 2 (55/50 ° C), with air velocity 2 (m / s). The *Eucalyptus nitens* showed decreasing drying phases, while the critical moisture content corresponded to the initial moisture content. The saturation point of the experimental fibers varied with the drying temperature, with an error of up to 6.3% with respect to the theoretical value. The drying rate was significantly affected by moisture content and dry bulb temperature. The results showed that the simple and multiple regression models (p-value: <0.001 and r^2 : 0.8623) were significant and highly predictive in determining the drying rate in *Eucalyptus nitens* wood pieces.

Keywords: Drying rate, *Eucalyptus nitens*, fiber saturation point, mathematical model, drying.

INTRODUCCIÓN

Las plantaciones de *Eucalyptus* en Chile alcanzaron al 2016 una 828.236 hectáreas, de las cuales un 31% correspondieron a *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) (INFOR, 2016). El creciente interés por su utilización industrial, se debe a su alta tasa de crecimiento, y a su alta adaptación suelos y climas, por lo que cuenta con un gran potencial para la diversificación de la industria maderera del país (ROZAS et al., 2002; NAVARRETE et al., 2008). Sin embargo el *Eucalyptus nitens*, no ha sido debidamente utilizado en productos aserrados de mayor valor agregado, debido a una serie de limitaciones tecnológicas, entre las que se encuentran la elevada magnitud de las tensiones de crecimiento, una alta contracción volumétrica, elevada higroscopicidad y anisotropía, así como una baja permeabilidad (JANKOWSKY; SANTOS, 2005). Estos defectos se manifiestan durante y después del secado en forma de alabeos, colapso, grietas superficiales e internas, rajaduras en los extremos de las piezas aserradas, pronunciados gradientes de humedad y elevadas tensiones de secado (ROZAS; TOMASELLI, 1993;

1. Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío Bío - UBB. Concepción, Chile. * Autor Correspondiente: cmontero11@gmail.com

VERMAAS, 1995). Los defectos anteriormente mencionados, se ven incrementados por la tendencia de utilizar *Eucalyptus* jóvenes y de diámetros pequeños (JANKOWSKY et al., 2003), dificultando la obtención de madera aserrada de calidad, ya que bajo estas condiciones, el proceso de aserrío genera una cantidad considerable de piezas en corte tangencial, la que tiende a presentar una mayor proporción estos defectos de secado (ROZAS et al., 2002; VASCONCELOS, 2002).

A esto se suma a que el proceso de secado representa el mayor consumo de energía y de tiempo, durante la transformación mecánica de la madera (ZHANG et al., 1996), por lo que es fundamental comprender las variables del proceso que están involucradas. Una de estas variables es la tasa de secado, la cual mide la variación de la humedad en el tiempo en una pieza de madera (KNEULE, 1981). Su importancia se debe, a que permite definir, ajustar y optimizar un programa de secado (DENING et al., 2000; PEZO, 2007). Para Dening et al. (2000), Keey et al. (2000) e Meroney (1969), la tasa de secado es proporcional a la temperatura de secado, e inversa a la humedad relativa, también hay un efecto de la velocidad del aire, las características del flujo y de la geometría del encastillado de las piezas dentro del secador, así como por las propiedades físicas y anatómicas, el espesor y el tipo de corte de la pieza.

Autores como Ananías et al., (2011), Dening et al. (2000), Eriksson et al., (2007), Jankowsky et al. (2003), Kneule (1981), Kollmann y Côté (1968), Meroney (1969), Rozas (2007), Rozas, Tomaselli e Zanoello (2009) y Simpson (1997) distinguen tres fases en la cinética de secado en la madera tomando como base al contenido de humedad. La primera fase, presenta una tasa constante de pérdida de humedad y se encuentra ausente en maderas latifoleadas. Esta fase es controlada por las condiciones psicrométricas, siendo la transferencia de calor del ambiente de secado a la superficie de la pieza el principal mecanismo de evaporación. De acuerdo con Ananías et al. (2011), Jankowsky et al. (2003) e Rozas (2007), el transporte de humedad asociado a esta fase, corresponde al de agua libre o capilar, siendo mínima la humedad transportada por difusión desde el interior de la pieza.

A medida que el secado avanza, la velocidad de evaporación superficial es mayor a la difusión al interior de la pieza, por lo que el agua capilar en la superficie es totalmente evaporada, alcanzando el punto de saturación de las fibras (PSF), lo cual traslada el frente de evaporación al interior de la pieza, este instante es denominado como contenido de humedad crítico (JANKOWSKY; SANTOS, 2005; ROZAS, 2007). Lo anterior produce una transferencia de calor hacia el interior de la pieza, debido a un aumento de la temperatura superficial, lo cual ocasiona un gradiente de temperatura entre su superficie y el interior, siendo todos estos fenómenos los que dan inicio a la segunda fase de secado.

La segunda fase de secado presenta una pérdida decreciente de humedad y un frente de evaporación en el interior de la pieza (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968). Esta etapa presenta un transporte de humedad en el interior de la pieza a menor velocidad que en la superficie, lo cual se debe a las limitaciones internas de transporte (MERONEY, 1969; MUJUMDAR, 2012), las que se relacionan con las propiedades físicas y anatómicas de la madera, por lo que estas propiedades tienen mayor importancia a partir de esta etapa (ANANÍAS et al., 2011; SIMPSON, 1997).

En la tercera fase de secado, la madera se encuentra totalmente en el rango higroscópico. El frente de evaporación se encuentra al centro de la pieza y el transporte de humedad es exclusivamente difusivo, por lo que las características y propiedades de la madera determinan la velocidad del secado (ANANÍAS et al., 2011; ERIKSSON et al., 2007; JANKOWSKY; SANTOS, 2005; ROZAS, 2007; SIMPSON, 1997). En esta fase el efecto del ambiente de secado (temperatura, humedad relativa y velocidad del aire) es menor, por lo que el contenido de humedad y de la temperatura de la madera adquieren mayor importancia en cuanto a determinar la velocidad del secado (ROZAS, 2007). En esta fase la pieza alcanza el contenido de humedad de equilibrio (CHE) en el centro, el gradiente de temperatura disminuye y finalmente el secado se detiene (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; JANKOWSKY; SANTOS, 2005), dando por finalizado el proceso de secado. Un resumen de las distintas fases de secado se indica en la Figura 1.

Con respecto al comportamiento del secado en especies del género *Eucalyptus*, Jankowsky y Santos (2005), determinaron de forma experimental la curva y la tasa de secado, en piezas tangenciales de 20 mm de espesor de *Eucalyptus regnans* de 16 años. Estos autores identificaron la segunda y la tercera fase de secado, detectando un elevado gradiente de humedad y presencia de grietas internas y externas, una alta contracción y colapso severo en las piezas analizadas. Lo anterior es atribuido a una baja difusión de humedad, debido a la baja permeabilidad de la especie (JANKOWSKY; SANTOS 2005; JANKOWSKY et al., 2003; SIMPSON 1984; VERMAAS 1995) y a las propiedades de la

Figura 1. Curva característica de secado para materiales porosos. Adaptado de Jankowsky y Santos (2005).
Figure 1. Drying characteristic curve for porous materials. Adapted from Jankowsky y Santos (2005).

madera, siendo esta la principal razón por la que se recomienda utilizar para las distintas especies de *Eucalyptus*, un programa de secado a baja temperatura y aplicando una baja diferencia psicrométrica. Esta investigación tuvo como objetivos; a) caracterizar y predecir con modelos de regresión la tasa de secado en piezas tangenciales de *Eucalyptus nitens*, b) identificar las variables de secado que afectaron la tasa de secado y c) obtener de forma experimental el punto de saturación de la fibra (PSF).

MATERIALES Y MÉTODOS

Procedencia de la madera.

Se utilizaron 8 árboles de *Eucalyptus nitens* de 12 años, extraídos en la provincia del Biobío, según la clasificación de Köppen el clima es Csb, correspondiente a un clima mediterráneo de estaciones marcadas con periodos secos y lluviosos de duración similar, con una precipitación total de 1070 mm/año. El verano se caracteriza por ser una estación predominantemente seca, con clima de transición a fines de marzo y comienzos de abril. Por otro lado, el invierno está marcado por precipitaciones en forma de lluvia, con bajas temperaturas y frecuentes heladas (DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE, 2001).

Proceso de aserrió.

Los árboles una vez volteados, se trozaron a 2,4 m de largo y se trasladaron al Pabellón Tecnológico de la Madera (PTM) de la Universidad del Bío-Bío para realizar el proceso de aserrió. Para esto se utilizó un carro-huinchas vertical, el cual aplicó cortes paralelos a cada troza, obteniendo principalmente piezas de corte tangencial. Posteriormente cada pieza fue redimensionada en el ancho, permitiendo obtener piezas con una dimensión final de 36 mm de espesor, 100 mm de ancho y 1000 mm de largo.

Preparación de las cargas de secado.

El secado se realizó en una cámara semi-industrial de capacidad de 0,78 m³, perteneciente al Laboratorio de Secado de la Universidad del Bío-Bío. Esta fue completada con 120 piezas por carga, incluyendo a las piezas de control. Fueron realizados 2 ensayos para cada condición, con dos piezas de control cada uno (ver Tabla 1). Las condiciones de secado utilizadas fueron seleccionadas por ser similares a las empleadas en los programas de secado industrial de *Eucalyptus*.

Tabela 1. Condições de secagem usadas na madeira serrada de *Eucalyptus nitens* com 36 mm de espesor.
Table 1. Drying conditions used in the sawn timber of *Eucalyptus nitens* 36 mm thick.

Variável do secagem	Unidade	Condição 1	Condição 2
Temperatura do bulbo seco (T_{bs})	°C	40	55
Temperatura do bulbo húmido (T_{bh})	°C	35	50
Velocidade do ar	m/s	2	2
Humidade relativa	%	72	76
Humidade de equilíbrio	%	13	13
Amostras para ensaio	n°	2	2
Réplicas	n°	2	2

Control de humedad en las piezas de control durante el proceso de secado.

La variación de masa en las piezas de control, fue realizada cada 8 horas para la Condición 1 (40/35 °C) y cada 12 horas para el Condición 2 (55/50 °C). El control de las piezas, consistió en extraerla de la cámara de secado y registrar el peso de la pieza de control utilizando una balanza de precisión 0,1 (g), para luego reingresarla a la cámara de secado. Esta operación fue realizada en un tiempo inferior a 1 minuto, con el propósito de minimizar el efecto ambiental sobre la pieza de control y así descartar variaciones en la condición de secado.

Obtención del contenido de humedad y la tasa de secado

La obtención del contenido de humedad de la madera (CH), fue según lo estipulado por la norma NCh 176/1 Of.84 (NCH, 1984), mientras que la tasa de secado (TS) se determinó mediante ecuación empleada por Jankowsky et al. (2003) y Siau (1995) la cual describe la variación de la velocidad de secado, por medio de la diferencia de masa medida a un tiempo (t) con respecto al tiempo anterior (t-1) (ver ecuación 1).

$$TS = \frac{\Delta m_{H_2O}}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde TS es la tasa de secado (g/h), Δm_{H_2O} es la masa de agua evaporada entre cada medición (g), y Δt es el tiempo entre cada medición (h).

Obtención del punto de saturación de la fibra (PSF) teórico y experimental.

El punto de saturación de la fibra (PSF) teórico, se obtuvo con la relación sugerida por Keey et al. (2000), la cual describe la variación del punto de saturación de la fibra (PSF) con la temperatura del ambiente de secado (ecuación 2).

$$PSF_{teórico} = (0,341 - 0,00133 \times T_{bs}) \times 100 \quad (2)$$

Donde $PSF_{teórico}$ es el punto de saturación de la fibra teórico (%) y T_{bs} es la temperatura de bulbo seco del ambiente de secado (°C).

El punto de saturación de la fibra experimental, se obtuvo aplicando una regresión lineal de la curva de secado, utilizando el suavizador *lowess* con grado de suavización 0,5 y mediante 2 pasos. Este suavizador permitió identificar los cambios en la pendiente de la curva de secado, lo cual facilitó la identificación de las distintas fases de secado. El cambio en la pendiente correspondió a la transición de la segunda a la tercera fase de secado, el cual corresponde al instante en donde la pieza se alcanzó el punto de saturación de la fibra experimental (JANKOWSKY et al. 2003). Finalmente mediante la ecuación 3, se estimó el error entre los valores experimentales y los teóricos.

$$Error_{relativo} = \left\| \frac{PSF_{experimental} - PSF_{teórico}}{PSF_{teórico}} \right\| \times 100 \quad (3)$$

Modelos de predicción para la tasa de secado.

Se utilizaron los modelos matemáticos sugeridos por Jankowsky et al. (2003), Mujumdar (2012) y Santini y Haselein (2002), los que basan su predicción en la relación de la tasa de secado con el contenido de humedad mediante un ajuste lineal (ecuación 3), siendo la intersección entre ambas curvas el punto de saturación de la fibra (PSF) experimental. Del mismo modo, la tasa de secado fue modelada desde el contenido de humedad inicial ($CH_{inicial}$), hasta el contenido de humedad de equilibrio (CHE) mediante un ajuste de segundo grado (ecuación 4). También se aplicó un modelo lineal múltiple, que incluyó a todos los parámetros de secado estudiados en esta investigación (ecuación 5).

$$\gamma_i = \beta_0 + \beta_1 \times CH_i + \varepsilon \quad (3)$$

$$\gamma_i = \beta_0 + \beta_1 \times CH_i + \beta_2 \times CH_i^2 + \varepsilon \quad (4)$$

$$\gamma_i = \beta_0 + \beta_1 \times CH_i + \beta_2 \times T_{bs} + \beta_3 \times CH_{inicial} + \beta_4 \times HR + \varepsilon \quad (5)$$

Donde γ_i es la tasa de secado obtenida al instante i -ésimo (g/h), CH_i es el contenido de humedad medido al tiempo i -ésimo (%), T_{bs} es la temperatura bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$), $CH_{inicial}$ es el contenido de humedad inicial (%), HR es la humedad relativa (%), β_0 , β_1 , β_2 , β_3 y β_4 son los parámetros del modelo y ε es el error residual del modelo.

Análisis estadístico de los resultados.

Se realizó un análisis exploratorio de los datos (AED), con el fin de identificar la presencia de puntos atípicos en los valores de la tasa de secado. Para esto cada punto se sometió a una revisión exhaustiva con el propósito de identificar la causa de error, permitiendo mejorar la resolución de la información obtenida. Luego se determinó la estadística descriptiva, lo cual permitió obtener las medidas de tendencia central y de dispersión. A continuación se realizó una comparación de medias mediante el test HSD de Tukey (valor- p : 0,05) y un análisis de varianza (ANOVA), con un nivel de significancia del 5% (valor- p : 0,05). Los modelos matemáticos utilizado para predecir la tasa de secado, fueron obtenidos por el método *stepwise regression* con un nivel de significancia del 5% (valor- p : 0,05), el cual permitió seleccionar solamente a las variables estadísticamente significativas. Finalmente los modelos matemáticos fueron evaluados según su coeficiente de determinación (r^2) y por su valor- p , siendo todos estos cálculos realizados con el software estadístico Minitab 16.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variación de la tasa de secado con la temperatura.

La Figura 2, muestra los resultados de la tasa de secado para la Condición 1 (40/35 $^{\circ}\text{C}$) y la Condición 2 (55/50 $^{\circ}\text{C}$), en las piezas de *Eucalyptus nitens* de 36 mm de espesor. El análisis gráfico indicó que la velocidad de secado resultó ser mayor para la Condición 55/50 $^{\circ}\text{C}$, a pesar de presentar una mayor dispersión de datos con respecto a la Condición 1 (40/35 $^{\circ}\text{C}$). Por otra parte, se observó la ausencia de la primera fase de secado, lo que indicaría que el contenido de humedad inicial resultó ser el contenido de humedad crítico ($CH_{crítico}$), presentando sólo la segunda y la tercera fase de secado. Para Ananías, Mougél e Zoulalian (2009), Hart y Darwin (1971), Jankowsky y Santos (2005), Jankowsky et al. (2003) y Keey et al. (2000), este comportamiento se observa en la mayoría de especies de baja permeabilidad, por lo que el *Eucalyptus nitens* al presentar dicho comportamiento, debe considerarse como tal.

Figura 2. Tasa de secado en madera de *Eucalyptus nitens* de 36 mm de espesor para Condición 1 (40/35 $^{\circ}\text{C}$) y Condición 2 (55/50 $^{\circ}\text{C}$).

Figure 2. Drying rate in *Eucalyptus nitens* wood of 36 mm thickness, for Condition 1 (40/35 $^{\circ}\text{C}$) and Condition 2 (55/50 $^{\circ}\text{C}$).

La Figura 3a muestra al histograma de frecuencia para la tasa de secado y la Figura 3b muestra el intervalo de confianza al 95% agrupados por condición. De ambas Figuras se confirmó el aumento de la tasa de secado de la Condición 2 (55/50 $^{\circ}\text{C}$) con respecto a la Condición 1 (40/35 $^{\circ}\text{C}$). Específicamente se pasó de una tasa de secado que en promedio fue de 2,866 (g/h) para la Condición 1 (40/35 $^{\circ}\text{C}$) a una de 4,814 (g/h) en la Condición 2 (55/50 $^{\circ}\text{C}$). El test HSD de Tukey mostró que estos valores fueron estadísticamente diferentes, siendo la tasa de secado de la Condición 2 (55/50 $^{\circ}\text{C}$) un 68% mayor que la Condición 1 (40/35 $^{\circ}\text{C}$).

Figura 3a.

Figura 3b.

Figura 3. (a) Distribución de frecuencia de la tasa de secado (g / h) agrupada por condición y (b) intervalos de confianza del 95% de la tasa de secado agrupada por condición.

Figure 3. (a) Histogram of the drying rate (g/h) grouped by drying condition, and (b) confidence intervals of the drying rate grouped by drying condition.

El modelo de segundo grado que se utilizó para predecir a la tasa de secado, empleando como predictivo al contenido de humedad (CH), resultó ser altamente significativo (valor-p: <0,001), presentando un coeficiente de determinación (r^2) de 0,8966 para la Condición 1 (40/35°C) y de 0,8891 para la Condición 2 (55/50°C). El resumen de los parámetros y estadísticos obtenidos de los modelos se indican en la Tabla 2.

Tabela 2. Parâmetros do modelo $y_i = \beta_0 + \beta_1 \times CH_i + \beta_2 \times CH_i^2 + \epsilon$ para predecir la tasa de secado, agrupada por condición de secado.

Table 2. Parameters of the model $y_i = \beta_0 + \beta_1 \times CH_i + \beta_2 \times CH_i^2 + \epsilon$ that allows to predict the rate of drying, grouped by drying condition.

y_i	Parâmetros do modelo			r^2	Valor-p
	β_0	β_1	β_2		
40/35 °C	-0,248	0,0613	0,000423	0,8966	<0,001*
55/50 °C	-0,356	0,1432	0,000086	0,8891	<0,001*

y_i : Variável dependente; r^2 : Coeficiente de determinação; $\beta_0, \beta_1, \beta_2$: Parâmetros do modelo; Valor-p = Probabilidade; * Significativo a um nível de significância de 5%, mediante teste F.

Obtención del punto de saturación de las fibras (PSF) experimental.

La Figura 4 muestra la tasa de secado con ajuste lineal y suavizador lowess, el cual permitió detectar el cambio de la pendiente en la curva. Los puntos de intersección obtenidos de forma gráfica, indicaron que el PSF experimental de la Condición 2 (55/50°C) fue de 26,2%, y para la Condición 1 (40/35°C) de 27,0%. Estos resultados están en concordancia con los reportados por Kollmann y Côté (1968), Siau (1995) y Skaar (1972), quienes reportaron una correlación débil del PSF con la temperatura del ambiente de secado. Por otra parte estos resultados son concordantes a lo reportado por autores como Jankowsky y Santos (2005) y Jankowsky et al. (2003) quienes ya aplicaron este método en otras especies de *Eucalyptus*, concluyendo que es posible obtener el PSF experimental mediante el método gráfico.

La Tabla 3 resume los parámetros y estadísticos de cada ajuste lineal, aplicado en la segunda y tercera fase de secado agrupado por condición, así como el PSF experimental y teórico. Los resultados mostraron que el modelo de regresión lineal fue significativo (valor-p: <0,001) en ambas fases de secado, con un coeficiente de determinación (r^2) de 0,7859 y de 0,4252, para la segunda y tercera fase de secado a la Condición 1 (40/35°C). Mientras que la Condición 2 (55/50°C) tuvo valores de r^2 de 0,6687 y 0,6777 respectivamente. El PSF experimental presentó una desviación estándar de 3,5% y un error relativo de 12,5% para la Condición 1 (40/35°C), mientras que la condición 2 (55/50°C) tuvo una desviación estándar de 2,9% y un error relativo de 10,8%. En general se detectó un incremento del error relativo con la temperatura del secado, lo que también fue reportado Keey et al. (2000), Kollmann y Côté (1968), Siau (1995), Skaar (1988). Con respecto a las connotaciones prácticas de la obtención del PSF experimental, radican en que marca el inicio de la tercera fase de secado (JANKOWSKY; SANTOS, 2005; JANKOWSKY et al., 2003), por lo que a partir de este punto, la difusión controla el transporte de humedad. Esto permitiría determinar el instante en donde se finaliza el pre-secado al aire y se daría inicio al secado en cámara, o bien para aumentar la velocidad y diferencia psicrométrica de un programa de secado.

Figura 4. Ajuste linear por el método lowess, para la tasa de secado en *Eucalyptus nitens* de 36 mm de espesor, para la Condición 1 (40/35 °C) (línea roja) y Condición 2 (55/50 °C) (línea azul).

Figure 4. Linear adjustment by lowess method, for drying rate of *Eucalyptus nitens* of 36 mm thick, for Condition 1 (40/35 °C) (red line) and Condition 2 (55/50 °C) (blue line).

Tabela 3. Punto de saturación de las fibras (PSF) experimental y teórico, obtenido por el modelo $y_i = \beta_0 + \beta_1 \times CH_i + \varepsilon$, sus parámetros, coeficiente de determinación (r^2) y valor-p, en cada fase de secado en madera de *Eucalyptus nitens* de 36 mm de espesor.

Table 3. Experimental and theoretical fiber saturation point (PSF), obtained from the model $y_i = \beta_0 + \beta_1 \times CH_i + \varepsilon$, and their parameters, coefficient of determination (r^2) and p-value, grouped by drying phase in 36 mm thick *Eucalyptus nitens* wood.

Condição	PSF _{Exp}	PSF _{Teó}	Erro (%)	Fase de secagem (γ_i)	Parâmetros		r^2	Valor-p
					β_0	β_1		
(1) 40/35 °C	27,0	28,8	6,3	2da fase	-2,086	0,1209	0,7859	<0,001*
				3ra fase	-0,544	0,0832	0,4252	<0,001*
(2) 55/50 °C	26,2	26,8	2,2	2da fase	0,035	0,1404	0,6687	<0,001*
				3ra fase	-0,722	0,1732	0,6777	<0,001*

PSF_{Exp}: Ponto de saturação das fibras experimental. PSF_{Teó}: Ponto de saturação das fibras teórico. β_0 , β_1 : Parâmetros do modelo de regressão. γ_i : Variável dependente. r^2 : Coeficiente de determinação. Valor-p = Probabilidade; * Significativo a um nível de significância de 5%, mediante teste F

Modelo de regresión lineal múltiple para estimar la tasa de secado.

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado, y que buscó determinar el efecto del contenido de humedad inicial ($CH_{inicial}$), el contenido de humedad medido al instante i-ésimo (CH_i), la humedad relativa (HR) y la temperatura de bulbo seco (T_{bs}) sobre la tasa de secado (Tabla 4), evidenció que los factores significativos para predecir a la tasa de secado fueron; el contenido de humedad medido al instante i-ésimo (CH_i) y la temperatura de bulbo seco (T_{bs}) ambos factores presentaron un valor-p de <0,001.

El modelo de regresión lineal múltiple propuesto en esta investigación, resultó ser altamente significativo (valor-p: <0,001), es decir tuvo una probabilidad menor al 0,01% de haber sido influenciado por otra variable no incluida en el modelo. El coeficiente de determinación (r^2) fue de 0,8623, lo cual significó que el modelo tuvo la capacidad de predecir con un adecuado ajuste a la tasa de secado. Estos resultados se encuentran en concordancia con los obtenidos por Santos Jankowsky y Andrade (2003), quienes observaron que al variar las condiciones de la temperatura de secado, los *Eucalyptus* presentaron una variación en su tasa secado (TS). Finalmente el modelo lineal múltiple, que permitió predecir a la tasa de secado en el instante i-ésimo (TS_i) tomando como predictivos al contenido de humedad de la pieza medido al instante i-ésimo (CH_i) y a la temperatura de bulbo seco (T_{bs}) viene dado por la fórmula (6).

$$TS_i = -6,862 + 0,1217 \times CH_i + 0,1339 \times T_{bs} \quad (6)$$

Donde TS_i es la tasa de secado (g/h) obtenida al instante i-ésimo, CH_i es el contenido de humedad (%), medido en el instante i-ésimo, válido para el rango entre 112%–8% y T_{bs} es la temperatura de bulbo seco (°C), válido entre 40 °C y 55 °C.

Tabela 4. Análisis de varianza para la tasa de secado en madera aserrada de *Eucalyptus nitens*.

Table 4. Analysis of variance for the drying rate in *Eucalyptus nitens* sawn wood.

FV	GL	SC	QM	Valor de F	Valor-p
Modelo	3	2967,3	1483,7	898,7	<0,001*
CH _i	1	2851,7	2851,7	1727,4	<0,001*
T _{bs}	1	268,1	268,1	162,4	<0,001*
Residuo	287	473,8	1,7		
Total	289	3441,1			
r ²	0,8623				

FV: Fonte da variação; GL: Graus de liberdade; SC: Soma dos quadrados; QM: Quadrado médio; Valor de F: Resultado do teste F; Valor-p = Probabilidade; * Significativo a um nível de significância de 5%, mediante teste F; r²: Coeficiente de determinação.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos, se concluye que las piezas de *Eucalyptus nitens* sólo mostraron la segunda y tercera fase de secado. La tasa de secado promedio entre la Condición 1 (40/35 °C) y la Condición 2 (55/50 °C), mostró diferencias significativas (valor-p: <0,001).

El PSF experimental presentó un bajo error con respecto a los valores obtenidos de forma teórica para las dos condiciones de secado evaluadas.

La tasa de secado se vio afectada por el contenido de humedad medido al instante i-ésimo (valor-p: <0,001) y por la temperatura de bulbo seco (valor-p: <0,001), mientras que la humedad relativa y el contenido de humedad inicial no fueron significativos.

El modelo de regresión lineal aplicado fue significativo, tanto para la Condición 1 (valor-p: <0,001; r²: 0,8966) como para la Condición 2 (valor-p: <0,001; r²: 0,8891), mientras que el modelo de regresión lineal múltiple, fue altamente significativo y con una alta capacidad de predicción (valor-p: <0,001; r²: 0,8966) para estimar la tasa de secado en las piezas de *Eucalyptus nitens*.

BIBLIOGRAFÍA

ANANÍAS, R.; CHRUSCIEL, L.; ZOULALIAN, A.; SALINAS-LIRA, C.; MOUGEL, E. Overall mass transfer coefficient for wood drying curves predictions. **Mass transfer in multiphase systems and its applications**, Londres, v. 14, p. 301-312, 2011.

ANANÍAS, R.; MOUGEL, E.; ZOULALIAN, A. Introducing an overall mass-transfer coefficient for prediction of drying curves at low-temperature drying rates. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 43, n. 1-2, p. 43-53, 2009.

DENING, J.; WENGERT, E.; SIMPSON, W.; **Drying hardwood lumber**. Madison: USDA Forest Service, 2000. 138 p. (General Technical Report).

DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE. **Climatología Regional**. Santiago de Chile 2001. 45 p. Disponível em: < <http://164.77.222.61/climatologia/>>. Acesso em 10 ago. 2015

ERIKSSON, J.; JOHANSSON, H.; DANVIND, J. A mass transport model for drying wood under isothermal conditions. **Drying Technology**, v. 25, n. 3, p. 433-439, 2007.

HART, C. A.; DARWIN, W. M.; The slow drying rate of white oak. **Wood Science and Technology**, v. 4, n. 1, p. 46-54, 1971.

INFOR - INSTITUTO FORESTAL. **El sector forestal chileno** Santiago: INFORm 2016. 52 p. (Documento Técnico)

JANKOWSKY, I.; SANTOS, G. Drying behavior and permeability of *Eucalyptus grandis* lumber. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 7, n. 1, p. 17-21, 2005.

JANKOWSKY, I.; SANTOS, G.; DE ANDRADE. Secagem da madeira serrada de Eucalipto. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n. 199, p. 1-11, 2003

KEEY, R.; LANGRISH, T.; WALKER, J. **Kiln-Drying of lumber**. Berlin: Springer Verlag, 2000.289 p.

- KOLLMANN, F.; CÔTÉ, W. **Principles of wood science and technology**. Berlín: Springer-Verlag, 1968. v.1, 592 p.
- KNEULE, F. **El secado**. Castellón: Urmo, S. A de ediciones, 1981. 414 p.
- MERONEY, R. N. The state of moisture transport rate calculations in wood drying. **Wood and Fiber**. v. 1, n. 1, p. 64-74, 1969.
- MUJUMDAR, A. S. **Industrial Transfer Processes**. Singapore: Department of mechanical Engineering National of Singapore, 2012. 141 p.
- NAVARRETE, E.; FIGUEROA, X.; NOVOA, P.; ESPINOSA, M. Efecto del manejo silvícola y clase de copa sobre la densidad básica de *Eucalyptus nitens*. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 345-354, 2009.
- NCH - INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. **NCh 176/1. Of 1984**. Madera Parte 1: Determinación de humedad. Santiago, 1984. 7 p.
- PEZO, J. **Secado de maderas**. Nürtingen: Mahild drying technologies, 2007. 661 p.
- ROZAS, C. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de pinus**. 2007. 169 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- ROZAS, C.; TOMASELLI, I. Secagem de madeira serrada de *Eucalyptus viminalis*. **Ciência Florestal**, v. 3, n. 1, p. 147-159, 1993.
- ROZAS, C.; TOMASELLI, I.; ZANOELLO, E. F. **Internal mass transfer coefficient during drying of softwood (*Pinus elliottii* Engelm.) boards**. Wood Science and Technology, v. 43, n. 5, p. 361-373, 2009.
- ROZAS, C.; SANCHEZ, R.; LISPERGUER, J.; FERNANDEZ, A.; VARGAS, G.; STEINHAGEN, P. **Diversificación y aprovechamiento de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* para su utilización en la industria del mueble: Resultados tecnológicos, proyecto Fondef D98I101**. Concepcion: Universidade Del Bio Bio, 2002. 108 p.
- SANTINI, E.; HASELEIN, C. Efeito da temperatura e velocidade do ar sobre a taxa de secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 2, p. 99-106, 2002.
- SANTOS, G.; JANKOWSKY, I.; DE ANDRADE, A. Characteristic drying curve for *Eucalyptus grandis* lumber. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n. 63, p. 214-220, 2003.
- SIAU, J. **Wood: Influence of moisture on physical properties**. Department of wood science and forest products. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1995. 227 p.
- SIMPSON, W. **Effect of air velocity on the drying rate of single Easter white pine boards**. Madison: USDA Forest Service, 1997. 5 p. (Research Note FPL-RN-266)
- SIMPSON, W. Drying wood: A review. Part II. **Drying Technology**. v. 2, n. 3, p. 353-368, 1983.
- SKAAR, C. **Wood-water relations**. Springer-Verlag, Berlin, p. 263, 1988.
- SKAAR, C. **Wood in wood**. New York: Syracuse University Press, 1972. 218 p.
- VASCONCELOS, G. **Optimização da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* [Hill ex Maiden]**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, Piraciaba, 2002.
- VERMAAS, H. F. Drying *Eucalyptus* for quality: material characteristics, pre-drying treatments, drying methods, schedules and optimization of drying quality. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DE MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA. 1995, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ/USP, 1995. p. 119-132.
- ZHANG, L.; AVRAMIDIS, S.; HATZIKIRIAKOS, S. Moisture flow characteristics during radio frequency vacuum drying of thick lumber. **Wood Science and Technology**, v. 31, n. 4, p. 265-277, 1996.

Recebido em: 09/01/2018

Aceito em: 24/07/2018