

## ESTUDIO DE LA VELOCIDAD DEL SECADO DE RENOVALES DE CANELO *DRIMYS WINTERI*

### WOOD DRYING RATE STUDY OF CANELO *DRIMYS WINTERI* REGROWTH

Patricio Pérez<sup>1</sup>; Rubén A. Ananías<sup>2</sup>; Gonzalo Hernández<sup>3</sup>

#### RESUMEN

En este trabajo se estudia experimentalmente la velocidad del secado artificial a temperaturas convencionales de renovales de canelo *Drimys winteri*.

El diseño experimental incluye los programas de secado y el espesor de la madera. Seis ensayos son realizados usando madera de 25 y 50 mm de espesor, en un horno convectivo de 0.3 m<sup>3</sup>. La madera para los ensayos experimentales proviene de bosques de renovales creciendo en la zona de Lanco (X Región, Chile).

Los resultados muestran que las curvas de secado carecen de la etapa de velocidad de secado constante, la velocidad de secado máxima se encuentra en el rango de 1.72 y 2.99 (%/h) y el contenido de humedad crítico varía entre 120 y 140 %. La velocidad del secado es limitada por la tendencia a los defectos del secado de los renovales de canelo.

**Palabras claves:** Secado. Velocidad del secado. *Drimys winteri*.

#### ABSTRACT

This is an experimental study of the wood drying rate of canelo *Drimys winteri* regrowth at conventional temperatures.

The experimental design includes as variables, the drying schedule and the wood thickness. Six testings were performed using wood of 25 and 50 mm thickness in a 0.3 m<sup>3</sup> capacity laboratory dry kiln. Canelo regrowths from Lanco (X Region, Chile) are used in these experiments.

The results show that the drying rate lack a constant rate period, they have a maximal drying rate between 1.72 and 2.99 (%/h) and the critical moisture content varies between 120 and 140 %. Also the wood drying rate is conditioned by the drying defect tendency of the canelo regrowths.

**Keywords:** Wood drying. Drying rate. *Drimys winteri*.

<sup>1</sup> Magister en Ciencia y Tecnología de la Madera©. Depto. Ingeniería en Maderas. Fac. de Ingeniería. Universidad del Bío-Bío [pperez@ubiobio.cl](mailto:pperez@ubiobio.cl)

<sup>2</sup> Profesor Asociado. Depto. Ingeniería en Maderas. Fac. de Ingeniería. Universidad del Bío-Bío. [ananias@ubiobio.cl](mailto:ananias@ubiobio.cl)

<sup>3</sup> Ingeniero de Proyectos. INFOR. División Industrias. [gbernand@infor.cl](mailto:gbernand@infor.cl)

Autor para correspondencia: [pperez@ubiobio.cl](mailto:pperez@ubiobio.cl)

Recibido: 30.05.2005. Aceptado 12.08.2005.

## INTRODUCCION

El secado de la madera aserrada de los renovales de canelo juega un rol fundamental en el desarrollo de productos con mayor valor agregado. El conocimiento de la evolución temporal de la humedad y de la temperatura de la madera durante el secado, además de las propiedades anatómicas y físicas, son fundamentales para introducir mejoras al proceso de secado de esta madera.

El canelo es una latifoliada caracterizada por la ausencia de vasos y una importante proporción de radios leñosos en su estructura anatómica. Presenta una baja densidad básica ( $450 \text{ kg/m}^3$ ) y tiene una fuerte anisotropía de la contracción transversal, parámetros con una importante heterogeneidad (Ananías 2004). Estas características físicas de los renovales de canelo favorecen la tendencia a las grietas, el colapso y las deformaciones, dificultando el comportamiento de los renovales de canelo frente al secado, disminuyendo la velocidad del secado e incrementando su tiempo de secado (Ananías 2004; Hall y Witte, 1998; Rodríguez 1998; Infor-Corfo, 1998; Diaz-Vaz et al., 1986).

La velocidad del secado de la madera puede ser representada por las variaciones temporales de la humedad de la madera. Teóricamente la velocidad del secado presenta una etapa constante al inicio, hasta el contenido de humedad crítico (CHC), luego es decreciente hasta el contenido de humedad de equilibrio (CHE). La primera etapa de velocidad de secado constante depende solamente de las condiciones del ambiente de secado, esto es, el movimiento interno es de agua líquida hasta la superficie de la madera, donde se evapora. Cuando no llega suficiente líquido a la superficie, ésta ingresa al rango higroscópico y el frente de evaporación se desplaza al interior de la madera favoreciendo una velocidad de secado decreciente (Ananías et al. 2005; Ananías et al. 2001b; Pang, 1996b; Martin et al. 1995; Van Meel, 1958).

En el contexto anterior, este trabajo tiene como objetivo estudiar la velocidad del secado de los renovales de canelo, considerando ensayos experimentales a temperaturas convencionales.

## METODOLOGIA

### Preparación de la madera

Los renovales de canelo utilizados en los ensayos experimentales provienen de bosques de la X Región (Hacienda Rupanco, Lanco), con un DAP promedio de 31.8 cm. La madera en trozas fue convertida en basa en un aserradero de Concepción. Posteriormente en el Pabellón de Tecnología de la Madera (PTM) de la Universidad del Bío-Bío, las basas fueron procesadas a madera aserrada de 25 y 50 mm de espesor, 1 m de largo, luego empalilladas y almacenadas bajo techo hasta su ensayo de secado. Debido al limitado diámetro de las trozas y para maximizar el aprovechamiento en el aserrío la mayor parte de la madera presentó médula o corte mixto.

### Diseño experimental

Los experimentos se diseñaron según el siguiente plan:

**Tabla 1:** Diseño experimental

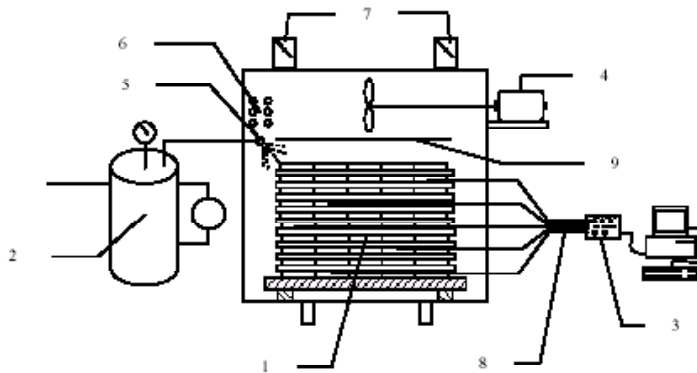
VARIABLE	NIVEL
Espesor	2 (25 mm y 50 mm)
Programa	2 (Programa 1 y Programa 2)

El mejor programa para cada espesor fue repetido una vez.

### Ensayos de secado

De acuerdo al diseño experimental se ejecutaron 6 ensayos de secado a la escala piloto. Tres ensayos en 25 mm de espesor y tres en 50 mm de espesor. Los ensayos se realizaron en un horno piloto de secado convencional de 0.3 m<sup>3</sup> de capacidad (Figura 1).

El secado fue conducido sobre la base del contenido de humedad de la madera evaluando el peso de 8 muestras testigos cada 4 horas. Los datos experimentales de la masa fueron ajustados mediante algoritmos de regresión usando el software Tablecurve 2D. Las condiciones ambientales temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo fueron fijadas de acuerdo a las variaciones del contenido de humedad de las muestras testigos. Un sistema de adquisición de datos fue utilizado para registrar cada media hora las condiciones del ambiente de secado y de la temperatura de la madera.



**Figura 1:** Esquema del horno de secado piloto de 0.3 m<sup>3</sup> de capacidad.

1: Madera. 2: Calderín. 3: Sistema adquisición datos computarizado. 4: Sistema ventilación. 5: Sistema humidificación. 6: Sistema de calefacción. 7: Ventilass. 8: Termocuplas. (Fuente: Alvear et al. 2003)

### Los programas de secado

Los programas de secado utilizados son los siguientes (Ananías, 2004):

**Tabla 2:** Programas de secado de renovales de canelo.

<i>Programa</i>	<i>CH (%)</i>	<i>T (°C)</i>	<i>T<sub>h</sub> (°C)</i>	<i>CHE (%)</i>
1	Verde	50	50	-
	Verde-40	44	40	14
	40-30	48	42	12
	30-25	52	44	10
	25-18	60	50	9
	18	60	60	-
	20-15	66	54	8
	15-8	70	54	6
	8	70	70	-
2	Verde	44	44	-
	Verde-30	44	40	14
	30-25	48	42	12
	25-18	52	44	10
	18	52	52	-
	20-15	60	50	9
	15-8	66	54	8
	8	66	66	-

CH: contenido de humedad. T: temperatura del bulbo seco. T<sub>h</sub>: temperatura bulbo húmedo.  
CHE: contenido de humedad de equilibrio

Entre los programas de secado resaltan los tratamientos en ambiente saturado, para mejorar el comportamiento de los renovales de canelo frente al secado.

En el caso de la madera de 25 mm espesor (ensayos 1, 2 y 3), se aplicó un tratamiento inicial para calentar la madera hasta 50 °C en un ambiente lo más saturado posible para esta temperatura. Posteriormente, cuando la madera presenta un contenido de humedad promedio de 18%, se aplicó con el fin de recuperar colapso, un tratamiento intermedio en un ambiente lo más saturado posible para una temperatura de 60 °C. Finalmente se aplicó un acondicionado en un ambiente saturado a la última temperatura del programa, normalmente 70 °C.

Similares tratamientos en ambiente saturado se aplicaron a los renovales de canelo de 50 mm (ensayos 4, 5 y 6), las condiciones ambientales fueron un poco más suaves. El tratamiento inicial en madera verde, se realizó a 44 °C; el tratamiento intermedio con un CH alrededor de 18% se efectuó a 52 °C y el acondicionado final a 66 °C, en todos los casos se trató de saturar el ambiente de secado a las temperaturas correspondientes.

**Velocidad de secado experimental.**

La velocidad de secado experimental  $\Phi$  (%/h) se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\Phi = \frac{\Delta CH}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde  $\Delta CH$  es la variación de contenido de humedad (%) y  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo (h)

La velocidad de secado máxima  $\Phi_{MAX}$  (%/h) se calcula por la relación (Martin et al. 1995):

$$\Phi_{MAX} = \frac{h}{\Delta h_v} \cdot (T - T_h) \cdot \frac{A}{M_0} \quad (2)$$

Siendo  $T$  la temperatura de bulbo seco,  $T_h$  la temperatura de bulbo húmedo ( $^{\circ}C$ ),  $A$  la superficie de la madera ( $m^2$ ),  $M_0$  la masa anhidra de la madera (kg). El coeficiente convectivo de transporte calor  $h$  ( $w/m^2 \cdot ^{\circ}C$ ) se determina a partir de la ecuación (Salin, 1996; Pang, 1996a):

$$h = 0.023 \cdot \left( \frac{v \cdot d_H}{\nu} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left( \frac{v \cdot \rho \cdot C_p}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{\lambda}{d_H} \quad (3)$$

Donde  $d_H$  el diámetro hidráulico (m), calculado por la relación:

$$d_H = \frac{4 \cdot S}{PM} \quad (4)$$

Siendo  $S$  la superficie para el flujo del aire ( $m^2$ ) y  $PM$  el perímetro mojado (m). Además,  $\nu$  es la viscosidad cinemática del aire ( $m^2/s$ ),  $\rho$  la densidad del aire ( $kg/m^3$ ),  $C_p$  el calor específico del aire ( $kJ/kg \cdot ^{\circ}C$ ) y  $\lambda$  la conductividad térmica del aire ( $w/m \cdot ^{\circ}C$ ) son calculadas por las ecuaciones siguientes (Jumah et al. 1997):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5)$$

$$\mu = 1.691 \cdot 10^{-5} + 4.984 \cdot 10^{-8} \cdot T_K - 3.187 \cdot 10^{-11} \cdot T_K^2 + 1.319 \cdot 10^{-14} \cdot T_K^3 \quad (6)$$

$$\rho = \frac{353}{T_K} \quad (7)$$

$$\lambda = 0.02425 + 7.889 \cdot 10^{-5} \cdot T_K - 1.79 \cdot 10^{-8} \cdot T_K^2 - 8.57 \cdot 10^{-12} \cdot T_K^3 \quad (8)$$

Con  $T_K$  la temperatura del ambiente en (K).

El calor latente de vaporización  $\Delta h_v$  (kJ/kg) es calculado por la ecuación:

$$\Delta h_v = 2503 - 2.43 \cdot T_h \quad (9)$$

## RESULTADOS Y DISCUSION

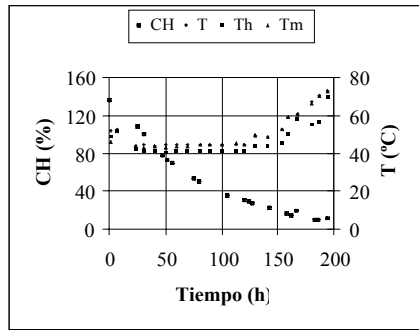
Las curvas de evolución de las condiciones de secado de los ensayos de 25 y 50 mm se indican en la Figura 2. La humedad inicial de la madera verde de los renovales de canelo de 25 varió entre 85 y 135%, debido al presecado natural de la madera antes de los ensayos (ensayos 1, 2 y 3). Por lo mismo la humedad inicial de la madera de 50 mm de espesor varió entre 80 y 140% de humedad (ensayos 4, 5 y 6).

Tales diferencias en humedad inicial condicionaron el tiempo de secado de los renovales de canelo. En el caso de la madera de 25 mm de espesor la reducción fue de aproximadamente 80 horas, con una duración de 192 horas en el ensayo 1 y 112 horas de secado en el ensayo 3, o sea una reducción de un 40 % en el tiempo de secado. En madera de 50 mm de espesor la duración del secado varió entre 272 y 444 horas (ensayos 4, 5 y 6). En este caso, aparte de la humedad inicial, influyó el comportamiento de la madera frente al secado. La atención a la conducción del secado fue fundamental, en este caso se observó la tendencia a la cementación superficial y grietas lo que obligó a mantener condiciones muy suaves de secado prolongándose el tiempo del secado para favorecer la calidad de la madera.

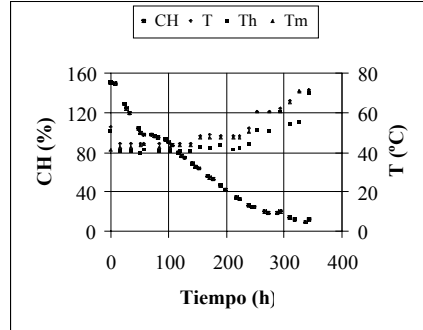
En todos los ensayos, fue notable la disminución del contenido de humedad inicial al debutar el secado (oreado de la madera), permitiendo reducir el tiempo de secado artificial. La calidad inicial de la madera, en particular la presencia de médula, condicionó fuertemente el tiempo de secado como consecuencia de la tendencia a las grietas de los renovales de canelo (Ananías 2004).

En relación con la evolución temporal de la temperatura interna de la madera, se observa además, que ésta tiende a alcanzar rápidamente la temperatura de bulbo húmedo, luego comienza a aumentar hasta el final del secado, situándose muy cerca de la temperatura de bulbo seco. Tal comportamiento resulta particularmente interesante, para conseguir las condiciones de tratamiento térmico HT necesarias para esterilizar la madera para embalaje, recomendadas por las normas internacionales (Ananías y Venegas 2005).

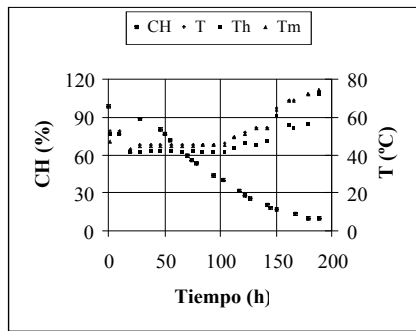
Las curvas de velocidad de secado experimental son presentadas en la Figura 3. La velocidad del secado es determinada por la ecuación 1, considerando el contenido de humedad experimental expresado en función del tiempo mediante algoritmos de regresión. Se observa en todos los casos la carencia de la etapa de velocidad de secado constante y la etapa de velocidad de secado decreciente. Este es un comportamiento similar al reportado durante el secado de otras maderas refractarias tales como coigüe (Ananías et al. 2001<sup>a</sup>; Broche et al. 2002) y eucalipto (Jankowsky y Dos Santos, 2005).



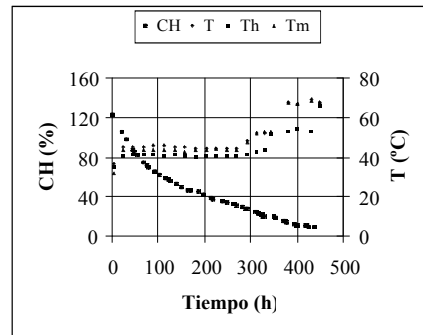
Ensayo 1



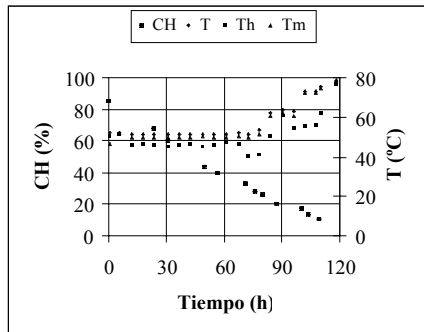
Ensayo 4



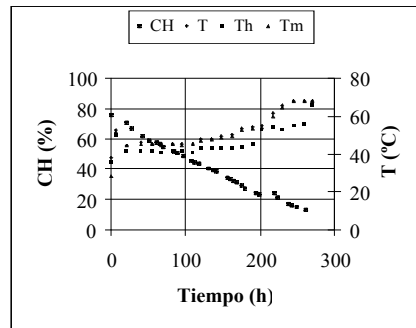
Ensayo 2



Ensayo 5



Ensayo 3



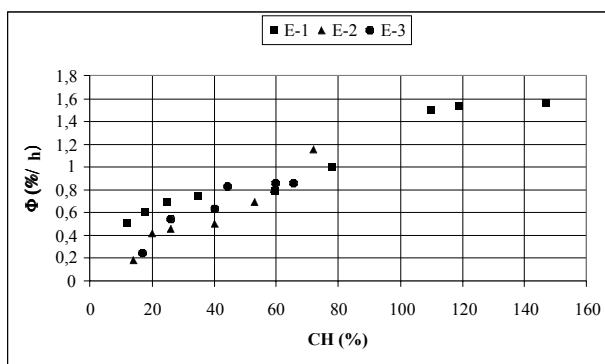
Ensayo 6

**Figura 2:** Condiciones de secado y temperatura interna de la madera  
(CH= Contenido de humedad, T= Temperatura de bulbo seco, Th=Temperatura de bulbo húmedo, Tm= Temperatura interna de la madera)

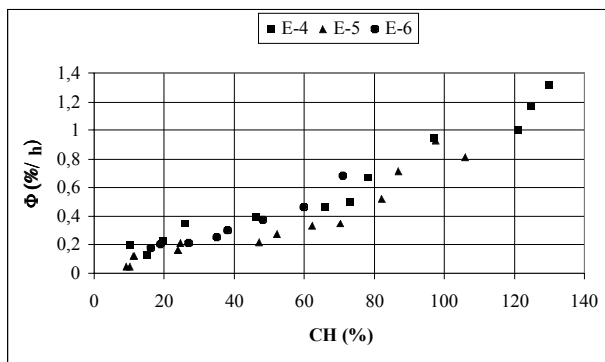
En la madera de 25 mm la etapa de secado decreciente es continua, en cambio en 50 mm se observa un cambio de pendiente en la velocidad del secado alrededor de 30 % de contenido de humedad, que representa el ingreso de toda la madera en el rango higroscópico favoreciendo con ello el mecanismo de movimiento difusional, lo que limita la velocidad del secado de la madera más gruesa.

Los valores calculados de la velocidad de secado máxima según la ecuación 4, varían entre 2.99 y 1.72 (%/h) en la madera de 25 y 50 mm respectivamente. En base de los valores de la velocidad máxima indicados más arriba se estimo el contenido de humedad crítico, éste es de 120 y 140 % para 25 y 50 mm de espesor respectivamente. Estos valores del contenido de humedad crítico, muestran que teóricamente podría presentarse una primera etapa de secado constante por sobre estos valores de humedad, en particular para las maderas con más alto contenido de humedad, esta etapa sería muy corta tal como en los ensayos 1 y 3 de 25 mm de espesor y ensayos 4 y 5 en los renovales de canelo de 50 mm (Figura 3).

Por lo anteriormente expuesto, en los renovales de canelo se impone un frente de evaporación desde el debut del secado, tal comportamiento sería además condicionado por una baja permeabilidad debida a la carencia de vasos y una débil resistencia mecánica por la presencia de grandes radios leñosos, favoreciendo la tendencia a los defectos del secado. Como indicado anteriormente, la atención a la conducción del secado en particular las condiciones de secado permitió controlar la tendencia a la cementación superficial y grietas como se reportará en otro trabajo de los mismos autores (Perez et al. 2005) pero limitó la velocidad del secado de la madera.



a) Ensayos de 25 mm



b) Ensayos de 50 mm

**Figura 3:** Curvas de velocidad del secado de los renovales de canelo (Φ= velocidad del secado, CH=contenido de humedad)



## CONCLUSIONES

La velocidad del secado a temperaturas convencionales de los renovales de secado es generalmente decreciente. Las curvas de secado de los renovales de canelo carecen de la etapa de velocidad de secado constante. El rango de la velocidad de secado máxima se encuentra entre 2.99 y 1.72 (%/h) y el contenido de humedad crítico varía entre 120 y 140 %, en los renovales de canelo de 25 y 50 mm de espesor respectivamente. La duración del secado de los renovales de canelo de 25 mm desde verde 85% a 100% hasta 10% de humedad final, es de 112 a 192 horas. Para 50 mm de espesor el tiempo de secado desde verde 120% a 140% hasta 11%, demora entre 272 y 444 horas.

## AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Forestal de Investigación de Chile, en particular al proyecto financiado por la CORFO denominado “*Desarrollo de aplicaciones industriales no pulpables para renovales de canelo*”, por permitir la divulgación de estos resultados. A la Dirección de Graduados de la Universidad del Bío-Bío por el financiamiento de una parte de este estudio.

## BIBLIOGRAFIA

- ALVEAR, M.; BROCHE, W.; SALINAS, C.; ANANÍAS, R.A. 2003. Drying kinetics of chilean coigüe: Study of the drying global coefficient. 8IWDC, pp. 383-387.
- ANANÍAS, R.A.; VALLEJOS, S.; SALINAS, C. 2005. Estudio de la cinética del secado convencional y bajo vacío del pino radiata. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 7(1):37-47.
- ANANÍAS, R.A.; VENEGAS, R. 2005. Secado industrial del pino radiata. Estudio del tiempo de esterilización con calor y evolución temporal de la temperatura. Sometido a la revista *Maderas. Ciencia y tecnología*.
- ANANÍAS, R.A. 2004. Estudio experimental del secado de renovales de canelo. Informe final. Proyecto AT 0405. INFOR. Universidad del Bío-Bío. Concepción, Chile. 24pp.
- ANANÍAS, R.A.; BROCHE, W.; SALINAS, C. 2001a. Modelación del secado convencional del coigüe. Parte 1. Fundamentación teórica. *Maderas. Ciencia y tecnología* 3(1/2):27-34.
- ANANÍAS, R.A.; CHRUSCIEL, L.; MOUGEL, E.; ZOULALIAN, A. 2001b. Drying rate modelling of convective wood drying at low temperature. Unpublished data.
- BROCHE, W.; ANANÍAS, R.A.; SALINAS, C.; RUIZ, P. 2002. Modelación del secado convencional del coigüe. Parte 2. Resultados experimentales. *Maderas. Ciencia y tecnología* 4(2):69-76.
- HALL, M.; WITTE, J. 1998. *Maderas del sur de Chile*. IER Ediciones. Santiago, Chile. 91 pp.
- INFOR-CONAF. 1998. Monografía del canelo *Drimys winteri*. Ministerio de Agricultura, 61 pp.
- JANKOWSKY, I.P.; DOS SANTOS, G.R. 2005. Drying behaviour and permeability of *Eucalyptus grandis* Lumber. *Maderas. Ciencia y tecnología* 7(1):17-21.
- JUMAH, R.Y.; MUJUMDAR, A.S.; RAGHAVAN, G.S.V. 1997. A mathematical model for constant and intermittent batch drying of grains in a novel rotating jet spouted bed. In mathematical modeling and numerical technique in drying technology. Ed. By I. Tumer & A.S. Mujumdar. Dekker, Inc. N. York, pp. 339-380.
- PANG, S. 1996. External heat and mass transfer coefficients for kiln drying timber. *Drying Technology* 14 (3&4):859-871.
- PEREZ, P.; ANANIAS, R.A.; HERNANDEZ, G. 2005. Estudio experimental del secado de renovales de canelo. Resumen preparado para ser presentado en la X Reunión de Investigación y desarrollo en productos forestales. Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.
- RODRÍGUEZ, S. 1998. Antecedentes tecnológicos de canelo *Drimys winteri*. *Bosque* 19(1):91-99.
- SALIN, J.G. 1996. Prediction of heat and mass transfer coefficients for individual board surfaces. A review. 5IWDC, pp. 49-58.
- VAN MEEL, D.A. 1958. Adiabatic convection batch drying with recirculation of air. *Chemical Engineering Science* 9:36-44.

**Lista de símbolos**

A superficie de la madera ( $m^2$ )  
CH contenido de humedad de la madera (%)  
CHE contenido de humedad de equilibrio (%)  
CHC contenido de humedad crítico (%)  
 $C_p$  calor específico del aire ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )  
 $d_h$  diámetro hidráulico (m)  
h coeficiente convectivo de transporte calor ( $w/m^2 \cdot ^\circ C$ )  
 $M_0$  masa anhidra de la madera (kg).  
PM perímetro mojado (m)  
S superficie flujo del aire ( $m^2$ )  
T temperatura de bulbo seco ( $^\circ C$ )  
 $T_h$  temperatura de bulbo húmedo ( $^\circ C$ )  
 $T_K$  temperatura del ambiente en (K)  
 $T_m$  temperatura de la madera

**Letras griegas**

$\Delta h_v$  calor latente de vaporización ( $kJ/kg$ )  
 $\rho$  densidad del aire ( $kg/m^3$ ),  
 $\lambda$  conductividad térmica del aire ( $w/m \cdot ^\circ C$ )  
 $\Phi$  velocidad de secado experimental (%/h)  
 $\Phi_{MAX}$  velocidad de secado máxima (%/h)  
 $\mu$  viscosidad dinámica del aire ( $kg/m \cdot s$ )  
 $\nu$  viscosidad cinemática del aire ( $m^2/s$ )