

## NOTA TECNICA N° 7

### SECADO SOLAR DE *Eucalyptus camaldulensis* de 40 mm de espesor

Andrés Ono (aono@latu.org.uy)  
Dpto. de Proyectos Forestales  
LATU

Palabras clave: *Secado de maderas, secado solar, eucaliptos colorados*

#### **Introducción**

La presente nota técnica se enmarca dentro de una serie de estudios que se vienen realizando sobre el secado de madera de eucaliptos colorados. Se presentan los resultados obtenidos en el secado solar de 2 metros cúbicos de tablas de 40 mm de espesor de *Eucalyptus camaldulensis*, de peso específico aparente básico promedio 660 kg/m<sup>3</sup>, que fue realizado entre los meses de enero a abril del 2005.

#### **Materiales**

Las tablas a secar fueron suministradas por el Grupo Forestal San Gregorio, y fueron extraídas de una plantación de abrigo de 5 ha de *Eucalyptus camaldulensis* en el departamento de Paysandú (Morató - Tres Árboles). (Cuadro 1)

Cuadro 1.- Datos del rodal

Edad	70 años	
Densidad de plantación	300 árboles / ha	Monte de abrigo originalmente plantado en un marco de 3 X 3.
Altura total	25 m	
Altura comercial	4-6 m	
Diámetro punta gruesa c/c	58.9 cm	Promedio para todas las trozas
Diámetro punta fina c/c	51.4 cm	

Las dimensiones de las tablas fueron de 40 x 130 x 3100 mm.

#### **Procedimiento**

El secado se llevó a cabo en el secador solar del LATU que se describió en la Nota Técnica N° 5, "Secado solar para maderas - condiciones operativas."

En el armado de la estiba se limpió el aserrín de cada tabla y se seleccionaron 8 tablas como testigos de seguimiento. Se identificaron todas las tablas y se midió el peso, ancho, espesor y largo. Además se evaluaron defectos (combadó, encorvadura, abarquillado, torcedura, grietas y rajaduras).

Se realizó una clasificación de las tablas en base al porcentaje de superficie libre de defectos y al número de piezas libre de defectos que se obtendrían. Esta clasificación fue tomada de la norma JAS. La aplicación de esta norma fue parcial ya que se tomaron en cuenta defectos importantes como nudos y rajaduras y se dejaron de lado otros criterios de la norma.

La estiba presentó las siguientes dimensiones: 1.40 m de alto x 0.9 m de ancho x 3.10 m de largo. Sobre la estiba se colocó un peso total de 1800 kg (663 kg/m<sup>2</sup>). (Figura 1).

Se utilizó un registrador de temperatura y humedad relativa (TANDD Thermo Recorder TR-72S) para seguir las condiciones dentro del secador.



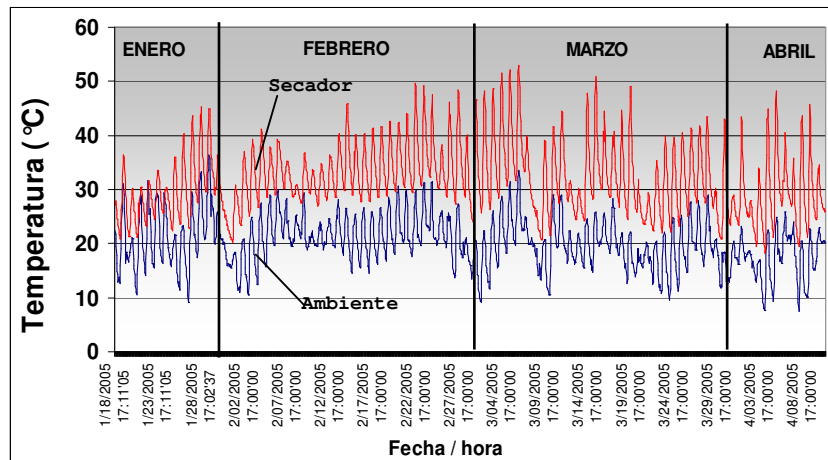
Figura 1.- Secador solar con estiba

En trabajos anteriores se observaron niveles de HR mayores en la parte inferior de la estiba con respecto a la parte superior de la misma. Para solucionar esto se utilizaron 2 espesores de separadores buscando homogeneizar la humedad relativa en toda la estiba. En la mitad inferior se colocaron separadores de 28 mm de espesor y en la mitad superior se utilizaron separadores de 24 mm de espesor.

## **Resultados del secado**

### **Condiciones de secado - Temperatura**

La temperatura dentro del secador solar fue en promedio 12°C superior a la temperatura ambiente. (Gráfica 1).



Gráfica 1.- Temperatura ambiente y dentro del secador solar según fecha

### **Contenido de humedad de equilibrio (CHE)**

El contenido de humedad de equilibrio (CHE) es el contenido de humedad al que tiende la madera si se la deja en un ambiente en condiciones determinadas de temperatura y humedad relativa y puede calcularse utilizando la ecuación 1 (Wood

Handbook, USDA,1999, pág. 3-5). El CHE dentro del secador se detalla en los gráficos 2 y 3.

$$M = \frac{1800}{W} \left[ \frac{K_h}{1 - K_h} + \frac{K_1 K_h + 2K_1 K_2 K^2 h^2}{1 + K_1 K_h + K_1 K_2 K^2 h^2} \right] \quad \text{Ecuación 1}$$

donde:

h = HR(%)/100

M = CHE (%)

T = Temperatura (°C)

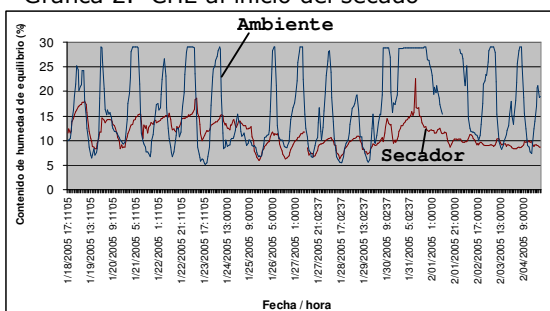
W = 349 + 1.29T + 0.0135T<sup>2</sup>

K = 0.805 + 0.000736T - 0.00000273T<sup>2</sup>

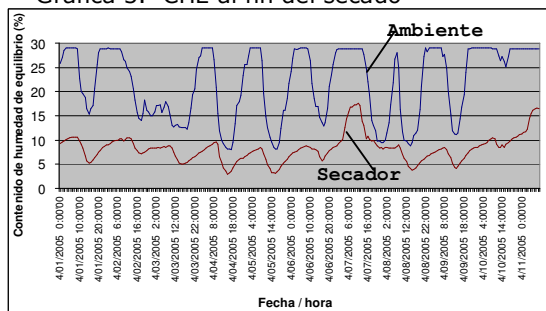
K<sub>1</sub> = 6.27 - 0.00938T - 0.000303T<sup>2</sup>

K<sub>2</sub> = 1.91 + 0.407T - 0.000293T<sup>2</sup>

Gráfica 2.- CHE al inicio del secado



Gráfica 3.- CHE al fin del secado



### Contenido de humedad de la madera

El secado comenzó el 18 de enero y se finalizó el 4 de abril.

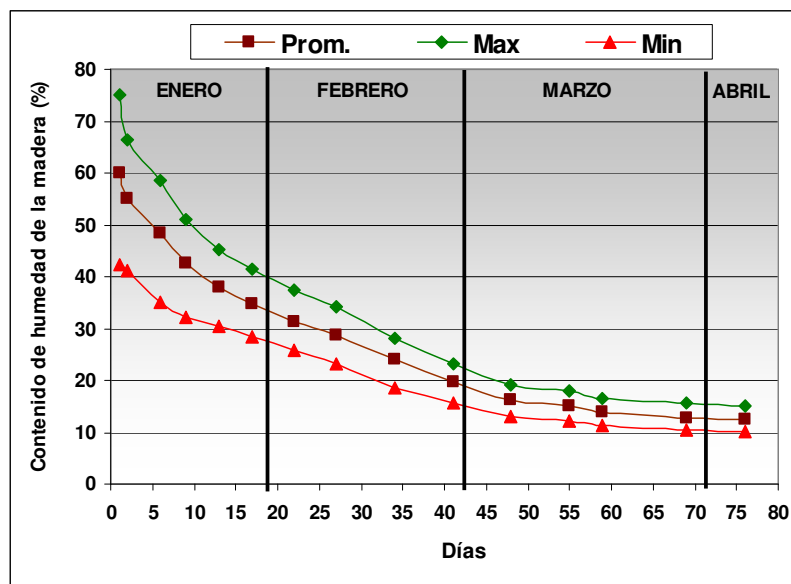
Cuadro 2.- Contenido de humedad al inicio y al final del secado

Muestra	CHM Inicial (%)	CHM Final (%)		PEAC (g/cm <sup>3</sup> )
		Seguimiento	Control	
1 (2)	55.7	9.8	11.8	0.81
2 (15)	75.0	13.9	13.5	*
3 (54)	52.2	12.3	14.4	*
4 (55)	65.1	12.3	11.9	0.86
5 (56)	66.5	11.4	12.1	0.79
6 (57)	76.2	12.5	11.8	0.75
7 (93)	45.2	13.1	13.8	*
8 (99)	57.7	11.6	12.4	0.79
Promedio	61.7	12.1	12.7	0.80
Desv. Est.	10.9	1.2	1.0	0.04
C.V. (%)	17.7	10.3	8.1	5.1
n	8	8	8	8

La columna de seguimiento muestra el contenido de humedad calculado en base al peso anhidro teórico, la columna control muestra el contenido de humedad final real de las tablas determinado por el método de pesada y estufa. Los valores de peso específico aparente corriente (PEAC) para las muestras identificadas como 15, 54 y 93 fueron excluidos ya que su contenido de humedad final fue superior al del resto de las muestras.

## Evolución del secado

En la gráfica 4 se observa la evolución del CHM según el tiempo en días.

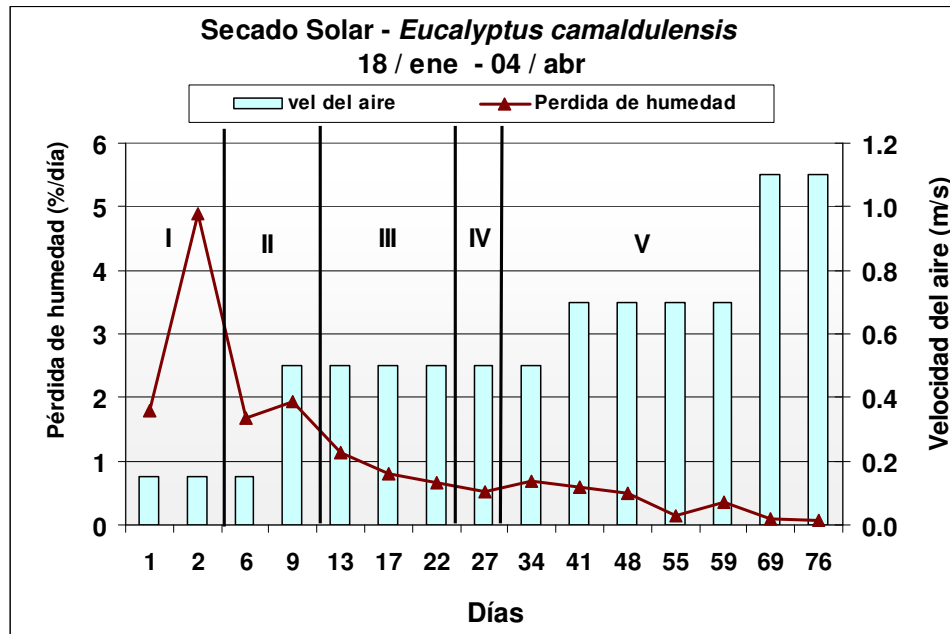


Gráfica 4.- Curva de secado

Tabla 3.- Tiempo de secado para diferentes CHM

CHM	Tiempo de secado (días)
20%	40
15%	58
12%	76

Se pueden observar 3 etapas diferenciadas durante este secado solar, una primera en la que el CHM desciende de 60% a 40%, una segunda de 40% a 20% y una tercera etapa, de secado más lento, desde 20% a 12% (gráfico 4). El diferente comportamiento de cada tramo responde entre otros factores, al contenido de humedad de la madera que se está secando en ese tramo, la época del año, (de enero a marzo-abril va descendiendo gradualmente la radiación solar diaria) y a las diferentes medidas de manejo que se fueron tomando a lo largo del secado y que se explican a continuación, identificados como períodos I a V en la gráfica 5.



Gráfica 5.- Resumen del secado

I: Las ventilas se mantuvieron abiertas al máximo para que la HR disminuyera (ya que al inicio del secado la humedad que se extrae de las tablas mantiene una alta HR dentro del secador).

II: Debido a que se observaron condiciones de CHE muy bajas (aproximadamente 7%) los que, con contenidos de humedad de la madera de más del 50%, eran riesgosos y podían llevar a defectos, se aumentó el CHE dentro del secador colocando bandejas con agua. Se colocaron 2 bandejas en la parte superior de la estiba con 10 L de agua cada una.

III: Se seguían observando niveles bajos de CHE y para aumentarlo se cerraron las ventilas a la mitad y se colocaron 2 bandejas adicionales (inferiores) frente a los ventiladores con 30 L de agua cada una.

IV: Se recargaron las bandejas superiores con 15 L de agua cada una. El volumen de agua evaporada de las bandejas fue de 40 L en un período de 13 días.

V: Se abrieron las ventilas al máximo y se quitaron las bandejas de agua para disminuir la humedad relativa de la cámara y generar condiciones de menor CHE.

Como se puede observar en la gráfica 6 las bandejas de agua actuaron aumentando la HR dentro del horno llevando a condiciones de secado moderadas.

Otro de los factores que se detalla en el gráfico es la velocidad del aire la cual tiene un efecto importante en la capacidad del secado. La velocidad utilizada para este secado fue baja tomando en cuenta la distribución del aire, las variables de espesor y tipo de madera, y la época del año. A excepción de la última semana, la velocidad del aire se mantuvo por debajo de 1 m/s.



Figura 2.- Estiba con bandejas en la parte superior

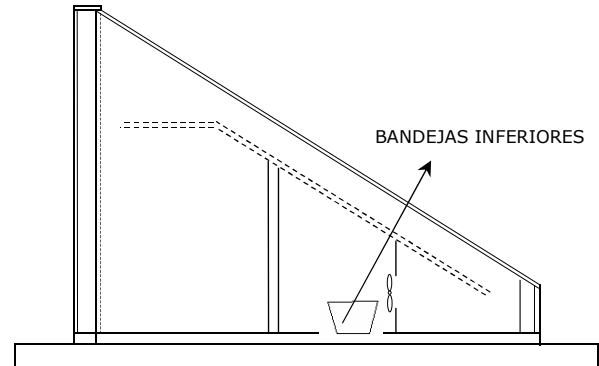
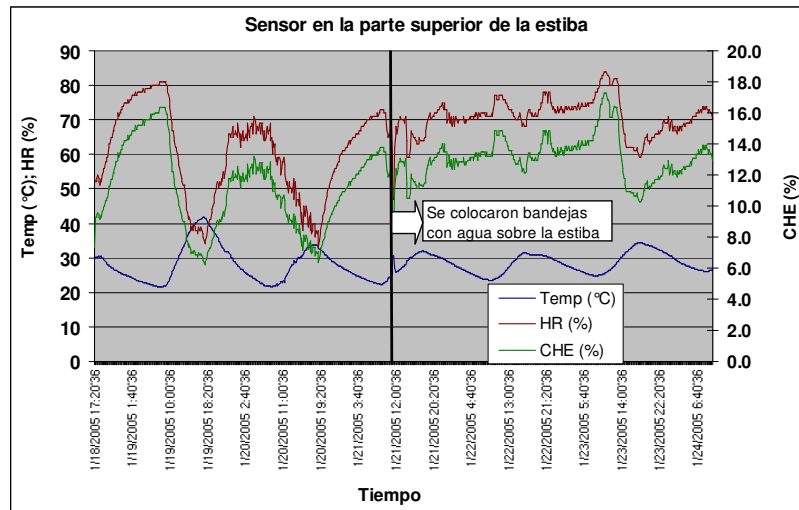


Figura 3.- Esquema del horno con bandejas inferiores

El gráfico 6 presenta el cambio que se produjo con la humedad relativa, con el CHE y con la temperatura cuando se colocaron las bandejas con agua.



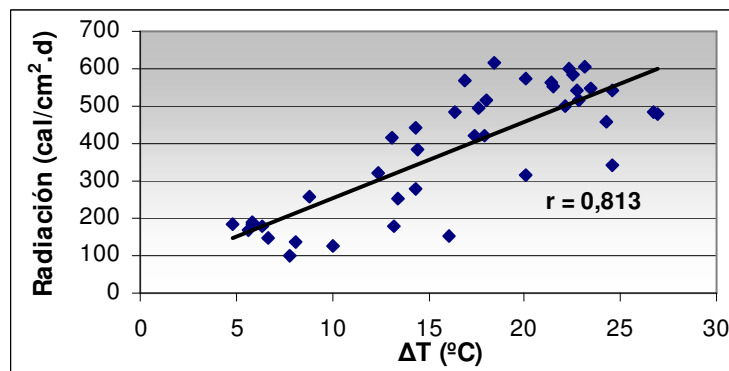
Gráfica 6.- Cambio de las condiciones de T y HR al colocar las bandejas.

Se constató que los días luego de colocadas las bandejas fueron días en los que la temperatura y humedad ambiente fueron similares a los días anteriores.

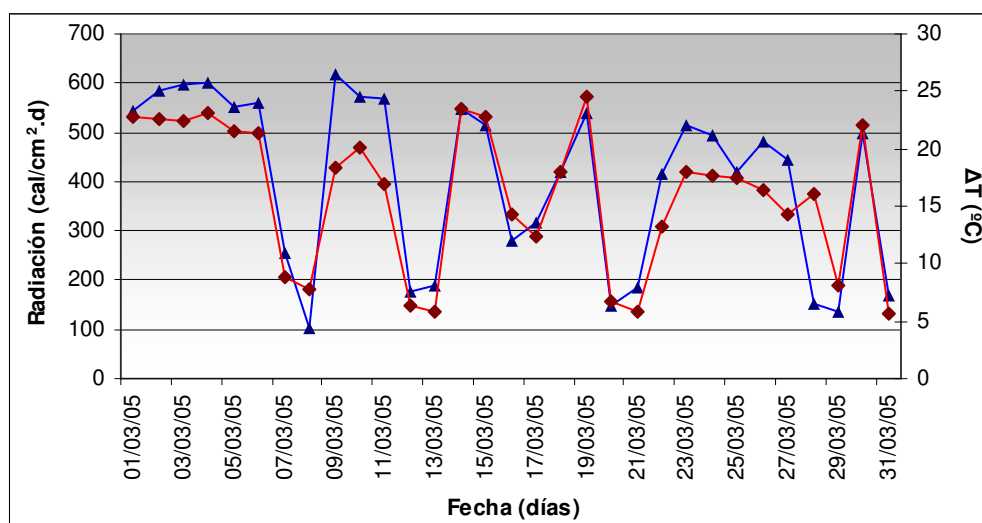
### Radiación solar

Los datos de radiación solar fueron obtenidos de la estación meteorológica de INIA Las Brujas, donde se cuenta con los valores de radiación solar acumulada por día.

Se observó una correlación positiva entre la radiación diaria acumulada con las condiciones que se generaron dentro del horno expresados en amplitud térmica ( $\Delta T$ , diferencia entre temperaturas máxima y mínima). (Gráficas 7 y 8).



Gráfica 7.- Relación entre radiación solar y amplitud térmica dentro del horno



Gráfica 8.- Radiación y amplitud térmica según fecha para el mes de marzo

### Evaluación de tablas

A partir de las dimensiones de las tablas antes y después del secado se pueden obtener las contracciones en el ancho y en el espesor. (Cuadros 4 y 5)

Cuadro 4.- Dimensiones de tablas al inicio y al fin del secado

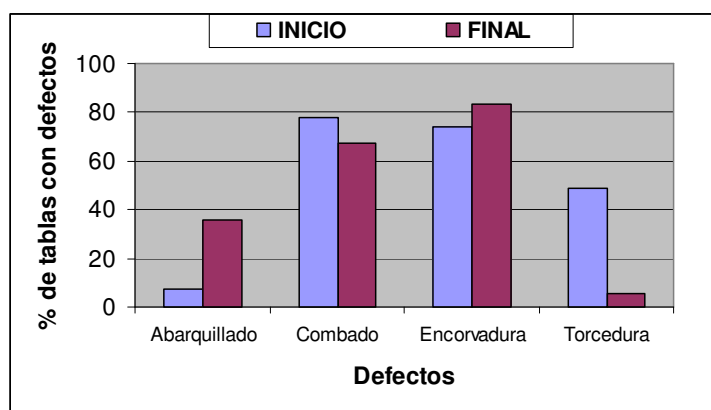
	INICIAL		
	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Peso (Kg)
Promedio	129.15	39.83	17.16
Desv. Est.	2.2	1.2	1.2
C.V. (%)	1.7	3.1	7.1
n	131	131	131
	FINAL		
	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Peso (Kg)
Promedio	119.41	36.52	12.27
Desv. Est.	4.3	1.7	1.5
C.V. (%)	3.6	4.5	12.5
n	131	131	131

Cuadro 5.- Contracciones en el ancho y espesor de la tabla.

	Contracción (%)	
	ANCHO	ESPESOR
Prom.	7.6	8.3
Max.	16.9	19.1
Min.	2.8	2.8
Desv. Est.	2.7	3.5
n	131	131

### Evaluación de defectos

Se evaluó la presencia de defectos de abarquillado, combado, encorvadura y torcedura. (Gráfica 9).



Gráfica 9.- Porcentaje de tablas con presencia de defectos

El defecto de abarquillado fue el que más aumentó con el secado. El defecto de encorvadura también aumenta pero en menor grado. Para el caso de las torceduras y el combado se observa una disminución de ambos defectos.

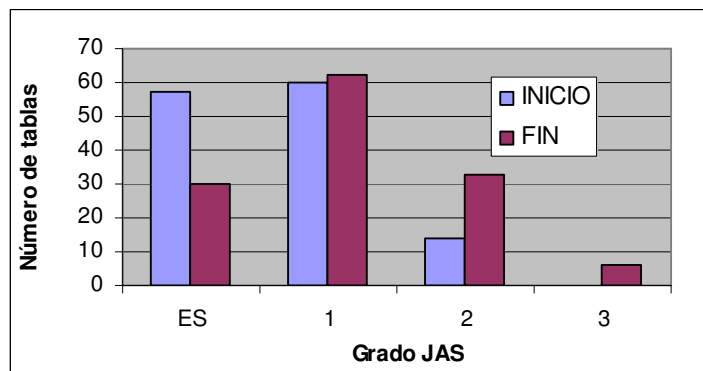
### Clasificación visual antes y después del secado

En la clasificación visual las tablas fueron separadas en categorías de acuerdo al porcentaje de superficie libre de defectos y al número de piezas libre de defectos que pueden obtenerse, y corresponde a una adaptación de la norma JAS (Japanese Agricultural Standard). Esta clasificación se aplicó a todas las tablas antes y después del secado.

Cuadro 6.- Grados de clasificación visual

GRADO	DESCRIPCIÓN
ES	mínimo de 9/10 de superficie libre de defectos en una única pieza
1	mínimo de 2/3 de la superficie libre de defectos con un máximo de 2 piezas
2	Mínimo de 1/2 de la superficie libre de defectos
3 *(no está incluida en la norma)	Tablas de descarte





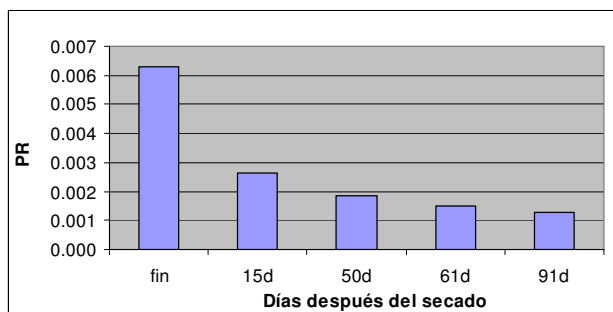
Gráfica 10.- Tablas clasificadas antes y después del secado

Se observa que las tablas cambian de categoría luego del secado, del grado especial al grado 1 y del grado 1 al grado 2. (gráfico 10).

Las tablas pertenecientes a la categoría especial (ES) disminuyeron casi en un 50 %, las tablas de la categoría 1 se mantuvieron en la misma proporción y las tablas 2 aumentaron en casi un 60 %. 6 tablas pasaron de la categoría 2 a la 3.

### Tensiones de secado

Se realizó la evaluación de las tensiones de secado y su posterior liberación por estacionamiento en depósito, a través del Test de Fuller (Nota Técnica N° 6, tomado de Fuller, J., 1995, Modeling Prong Test Response During Conditioning of Red Oak Lumber, FPL-RP-540, Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 7 p.).

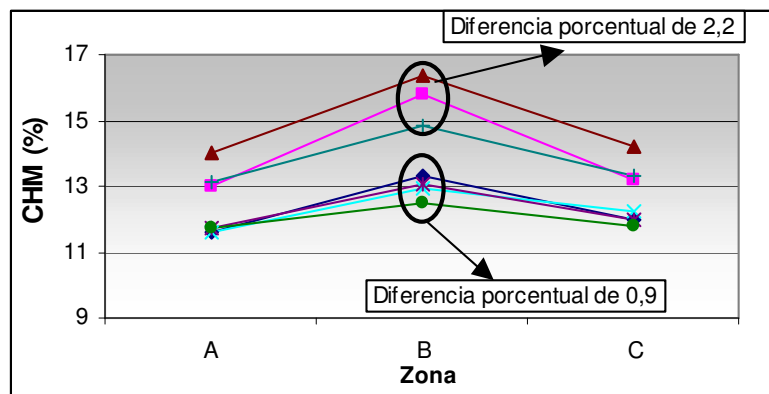


Gráfica 11.- Test de Fuller según días de estacionamiento

Para la probeta 1 (2) se realizó el test en muestras durante un período de 3 meses. Como se observa en la gráfica 11, las tensiones se van liberando a medida que pasa el tiempo de estacionamiento.

### Gradiente de humedad interna

Se evaluaron los gradientes internos de contenido de humedad y los resultados se muestran en la gráfica 12.



Gráfica 12.- Gradiente de humedad interna

Se observa que el gradiente de humedad interna fue mayor para las tablas que tenían un contenido de humedad mayor al final del secado.

### **Conclusiones**

- Continuando con las experiencias en secado solar de Eucalipto colorado, se obtuvieron resultados valiosos de condiciones y evolución del secado para el período comprendido entre enero y abril (verano – comienzos de otoño).
- Se logró un CHM promedio de 12.7% en 76 días (enero-abril), con un nivel de defectos moderado. Como en anteriores experiencias, se observaron gradientes internos de CH y tensiones residuales en la madera seca, que fueron liberándose con el tiempo dejando la madera estacionada en depósito.
- Se obtuvieron bajos niveles de CHE durante la etapa final del secado (por debajo del 10%) que marcan un potencial de secado que permite llegar a bajos valores de CHM.
- La utilización de recipientes con agua en la parte superior de la estiba favoreció a la homogeneización de la HR dentro del secador. Una mejora posible del diseño podría ser la instalación de aspersores de agua para aumentar la HR dentro del secador cuando éste sea necesario.
- Se confirma lo observado en el secado anterior (Nota Técnica N° 6, Secado Solar de *Eucalyptus tereticornis*), obteniéndose condiciones de secado favorables en el interior del secador solar con respecto al ambiente. Cuando la madera tiene un CHM por debajo de un 50 %, se empiezan a observar niveles de CHE menores a los del ambiente, lo que se traduce en condiciones de secado favorables dentro del secador solar.
- Cuando la madera se encuentra por debajo del punto de saturación de la fibra (aproximadamente 30%), la radiación solar nos permite estimar la amplitud térmica que se genera dentro del horno. La correlación entre la amplitud térmica y la radiación solar mejora a medida que nos acercamos al final del secado ya que en las primeras etapas de secado la energía solar es absorbida mayoritariamente por la madera y es utilizada para eliminar el agua del interior de la misma (aumentando la HR dentro de la cámara) y en menor grado, para aumentar la temperatura de la cámara.