

CONSTRUCCIÓN DE CURVAS EQUIVALENTES, PARA COMPARAR LOS TIEMPOS DE SECADO DE LAS MADERAS

F. Zamudio-Sánchez; M. Fuentes-Salinas

Profesores- investigadores de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo Estado de México.
México. C.P. 56230 Tel./Fax: (595) 9541957.

RESUMEN

En este artículo se presenta una forma sencilla de construir y evaluar curvas y tiempos de secado de madera aserrada en estufa, mediante un procedimiento de curvas equivalentes, para comparar en rangos de humedad aproximadamente iguales, los tiempos de secado entre tratamientos, especies, espesores y/o estufas de secado, con cargas de madera que inician con contenidos de humedad diferentes, eliminando el efecto de las diferencias de contenido de humedad inicial pero sin perturbar el efecto de la variable que se quiere evaluar. El procedimiento requiere de dos repeticiones por tratamiento.

PALABRAS CLAVES: curvas de secado; madera; sales CCA; contenido de humedad.

BUILDING EQUIVALENT CURVES TO COMPARE DRYING TIMES IN WOOD

SUMMARY

This paper presents a simple way to build and evaluate dry times and curves of sawed wood in kilns by a procedure of equivalent curves, to compare in moisture ranks approximately equal, the dry times among treatments, species, thickness or dry kilns, with wood loads that start with different moisture contents, removing the effect of the differences of initial moisture content but leaving without any perturbation the effect of the variable being evaluated. The procedure needs two repetitions per treatment.

KEY WORDS: drying curves; wood; CCA salts; moisture content.

INTRODUCCIÓN

En el proceso de secado de la madera a nivel industrial, es muy importante poder estimar el tiempo de secado que requiere cada carga para así programar la productividad del equipo de secado y de la empresa misma; igualmente, en los estudios y evaluación de la aplicación de distintos programas de secado a una especie de madera, la aplicación de diferentes tratamientos o la evaluación de diferentes equipos de secado, entre otros casos, se basan las conclusiones principalmente en los tiempos de secado resultantes de dichos procesos o estudios. Sin embargo, hay factores inherentes a la madera que, independientemente de las condiciones de secado aplicadas, influyen en el tiempo de secado, sobresaliendo en este caso el contenido de humedad inicial con que cada carga de madera se haya empezado a secar.

Al variar el contenido de humedad inicial de la madera a secar, variará el tiempo de secado, lo que resulta en un

problema para casos de evaluación o estudio, al no saber si los diferentes tiempos de secado se deben a los tratamientos, condiciones o equipos o si se debe a los diferentes contenidos de humedad iniciales.

El objetivo del presente estudio es establecer un método que permita comparar apropiadamente las curvas de secado que se generan en cargas con diferentes contenidos de humedad iniciales (CH_0). Se propone aquí un algoritmo que traslada dos curvas de secado con niveles de humedad iniciales diferentes, a otras que inician en un CH_0 común, sin perturbar el efecto del tratamiento al que fueron sometidas las cargas.

METODOLOGÍA

Una curva de secado de madera en estufa tiene una conducta que se puede describir gráficamente como la de la Figura 1.

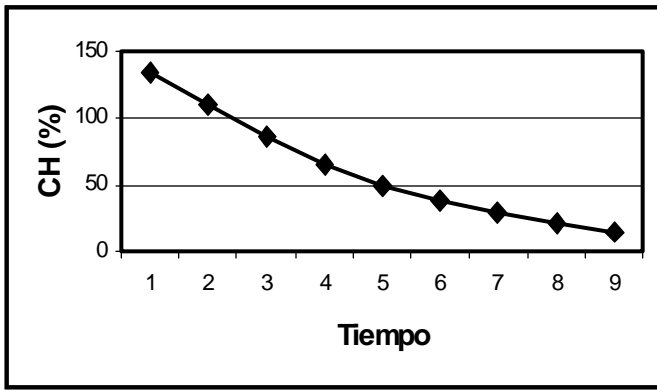


Figura 1. Curva representativa del proceso de secado de la madera.

Analíticamente $H = h(t)$ con las siguientes propiedades:

- 1ª. $h(0) = CH_0$: Contenido de humedad inicial
- 2ª. h es una función monótona decreciente, i.e., $d h(t) / dt < 0$.
- 3ª. $\lim h(t) = c$; donde c es el contenido de humedad que alcanza después de un secado prolongado. En lo que sigue se toma $c = 0$, (Vermaas, 1987).

Cuando se hacen ensayos de secado en estufa con madera sometida a diferentes tratamientos, o de diferentes especies o espesores y se trata de estudiar cual es la conducta de los tiempos de secado bajo esos tratamientos o condiciones, se tiene el problema de los contenidos de humedad iniciales de la madera que se usa en cada tratamiento. Esto resulta efectivamente un problema, ya que la tasa de secado es mayor cuando mayor es el contenido de humedad inicial (CH₀), variando así los tiempos de secado (Fuentes, 1994). Gráficamente se manifiesta un comportamiento como el ilustrado en la Figura 2.

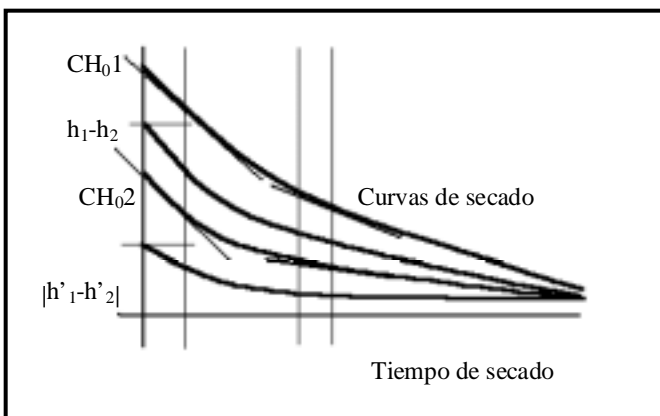


Figura 2. Curvas de secado, su diferencia y la diferencia de las velocidades de secado.

Obsérvese que la velocidad de secado en $t = 0^+$ es mayor en h_1 , i.e.,

$$a) h'_1(t) = dh_1(t) / dt < dh_2(t) / dt = h'_2(t) \quad \forall t$$

además ocurre que:

$$b) \lim h'_1(t) - h'_2(t) = 0 \text{ ya que ambas tasas de secado tienden a cero y, } t \rightarrow \infty$$

$$c) h'_1(t) - h'_2(t) \text{ es monótona creciente.}$$

Se tiene entonces la situación de que si h_1 recibe el tratamiento t_1 y h_2 el tratamiento t_2 , las conclusiones acerca de los tiempos de secado no se sabría si se deben a los tratamientos o a los CH iniciales. Esto requiere, para comparar las curvas apropiadamente, construir un algoritmo que traslade ambas curvas a otras que inicien en un CH₀ común sin perturbar el efecto de los tratamientos, lo cual eliminaría el efecto sobre la conducta de secado del CH₀ diferente que tienen estas curvas, quedando sólo el efecto de los tratamientos que se desea discriminar. El algoritmo requiere que cada tratamiento se repita dos veces.

Suponer ahora que h_1 y h_2 son las curvas de secado de las dos repeticiones del mismo tratamiento y se toma $k = CH_{01} - CH_{02} = h_1(0) - h_2(0)$. Si se modela la diferencia de velocidades de caída del contenido de humedad, i.e.,

$$h'_1(t) - h'_2(t) = g(t; k, a) \tag{1}$$

donde a sea un vector de parámetros y $g(t)$ una función continua que satisfaga las condiciones a) a c), es decir:

$$g(t; k, a) < 0 \quad \forall t$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g(t; k, a) = 0 \text{ y,}$$

$g(t; k, a)$ sea monótona creciente,

entonces se podría resolver la anterior ecuación para encontrar dicha función $g(.,.)$

La integración de (1) en el intervalo $[0, t]$ está dada por:

$$[h_1(t) - h_1(0)] - [h_2(t) - h_2(0)] = G(t) - G(0)$$

que es equivalente a:

$$h_1(t) - h_2(t) = G(t) - (G(0) - k) \tag{2}$$

donde debe observarse que $G'(t) = g(t)$ y tomar en cuenta que:

$$k = h_1(0) - h_2(0) = CH_{01} - CH_{02}$$

Obviamente, en un proceso de secado igual sobre una misma clase de madera (ya que son repeticiones de un mismo tratamiento) se tendría que:

$$h_1(t) - h_2(t) > 0, \text{ para toda } t, y,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h_1(t) - h_2(t) = 0$$

De hecho, estas características definen en parte el comportamiento descrito para las funciones de contenido de humedad – tiempo ($h_1(t)$) de la Figura 2. Por lo tanto se requiere:

$$G(t) - [G(0) - k] \geq 0, \quad \forall t,$$

y para $t = \alpha$, $G(t) - [G(0) - k] = 0$, es decir, se necesita una función $G(t)$ que satisfaga:

$$G(t) \geq G(0) - k, \quad \forall t, y, \quad (3)$$

$$G(t) \rightarrow G(0) - k \text{ cuando } t \rightarrow \infty \quad (4)$$

Una función conveniente, no la única es:

$$G(t) = (G(0) - k)(1 + a \exp(-bt)) \text{ con } a > 0, \quad (5)$$

ya que satisface (3) y (4). Además, como se observa enseguida, describe la conducta de la diferencia $h_1(\cdot) - h_2(\cdot)$ de las curvas de secado.

Note que $G(0) = [G(0) - k](1 + a)$, por lo tanto $G(0) = [k(1 + a)/a]$ y sustituyendo este valor en (5) se tiene:

$$G(t) = (k/a) (1 + a \exp(-bt)) \quad (6)$$

Sustituyendo (6) en (2) se obtiene la diferencia,

$$h_1(t) - h_2(t) = k \exp(-bt), \quad (7)$$

cuya forma funcional es geoméricamente “parecida” a la diferencia de las curvas de la Figura 2.

Otras funciones $G(t)$ convenientes y la solución para la diferencia de las dos curvas de secado son:

$$G(t) = (G(0) - k)[1 + (a / (1 + bt))], \text{ con solución } h_1(t) - h_2(t) = k / (1 + bt)$$

$$G(t) = (G(0) - k)(1 + a \exp(-bt^c)), \text{ con solución } h_1(t) - h_2(t) = k \exp(-bt^c)$$

y así sucesivamente. Obsérvese que la primera solución obtenida es un caso especial de esta última, con $c = 1$.

Es importante notar que hasta ahora, nada se ha dicho de la forma funcional de h_1 y h_2 , lo que quiere decir que

cualquier función que modele la curva de secado puede ser usada.

Por ejemplo:

$$h_1(t) = CH_{01} \exp(-b_1 t) \quad y, \quad (8)$$

$$h_2(t) = h_1(t) - [h_1(t) - h_2(t)],$$

donde se usaría cualesquiera de las funciones adaptadas para $h_1(t) - h_2(t)$, i.e., $k \exp(-bt)$, $k / (1 + bt)$, ó $k \exp(-bt^c)$.

Usando la primera de las anteriores funciones, la forma de h_2 es:

$$h_2(t) = CH_{01} \exp(-b_1 t) - k \exp(-bt) \quad (9)$$

Establecidas (8) y (9) se debe estimar b_1 y b , los parámetros correspondientes de h_1 y $h_1 - h_2$. Antes de proceder a ello es necesario reflexionar en lo que sigue: en un ensayo experimental, no se cuenta con las curvas, sólo se poseen observaciones de cada una de ellas en los tiempos seleccionados para obtenerlas, la solución inmediata que se daría para caracterizar la conducta de secado sería combinar la información tomando el promedio aritmético de los contenido de humedad de las dos repeticiones en cada uno de los tiempos y tratar a estos promedios como los puntos observados de la “verdadera” curva de secado para el tratamiento respectivo. Lo anterior tiene dos desventajas:

1°) Puede ocurrir que los tiempos en que se realizan las observaciones no sean los mismo en cada una de las repeticiones. Esto no es muy grave, ya que se puede planear para tener las observaciones en los mismos tiempos.

2ª) La curva de secado obtenida sería la del efecto conjunto del promedio de los CH iniciales y el del tratamiento, lo que ocasionaría una confusión al no saber si el comportamiento se debe al primero o al segundo aspecto.

Otra posibilidad más apropiada; (Rosen, 1980, 1982) sería la de estandarizar los datos por medio de sus CH iniciales, es decir, si $h_{1i}(t)$ y $h_{2i}(t)$ representan las i -ésimas humedades observadas en el tiempo t de ambas curvas, se puede razonablemente pensar que $h_{1i}(t)/CH_{02}$ y $h_{2i}(t)/CH_{02}$ tienen una misma conducta y por consiguiente se podrían usar todas las observaciones para estimar una sola curva de secado representativa del tratamiento. Lo anterior implica que:

$$(h_{1i}(t) / CH_{01}) = \exp(-b_1 t), \quad y, \quad (10)$$

$$(h_{2i}(t) / CH_{02}) = \exp(-b_2 t), \quad (11)$$

$$\text{con } b_1 = b_2$$

Para confirmar esta hipótesis, de un experimento de secado de madera aserrada sometida a tres tratamientos (impregnada con sales CCA, con agua y el testigo, con dos repeticiones en cada uno de ellos), se hizo lo siguiente:

1°) Se ajustó el modelo propuesto correspondiente, i.e., (10) y (11) a las dos repeticiones en cada uno de los tres tratamientos, y,

2°) Se probó la hipótesis:

$$H_0 : b_1 = b_2 \text{ vs } H_a : b_1 \neq b_2.$$

Los resultados de estas hipótesis se muestran en la Tabla 1

CUADRO 1. Análisis de varianza de los tiempos de secado de madera sometida a tres tratamientos, considerando los modelos (10) y (11).

Tratamiento	\hat{b}_1 (Error Est.)	\hat{b}_2 (Error Est.)	F calculada para H_0	a N.S.
Testigo	0.066260 (.0011773)	0.075853 (.0017370)	20.9006	0.0001
Agua	0.060997 (.0006182)	0.074741 (.0008106)	181,7518	0.0001
CCA	0.035982 (.0004673)	0.041548 (.0006726)	46,1857	0.0001

N.S. = No significativo

En los tres tratamientos el resultado fue el rechazo de la hipótesis nula con un nivel de significancia muestral muy pequeño; i.e., $\alpha = 0.0001$. Por lo tanto, la conclusión sobre esta estandarización es que, aunque razonable, es falsa.

Lo anterior condujo a construir lo que se ha denominado "curvas equivalentes", es decir, aquellas que previamente descuentan el efecto del diferente CH inicial. Estas pueden obtenerse, como ya se ha dicho, de dos conjuntos observados en un mismo tratamiento con CH iniciales diferentes, procediendo como sigue:

1°) Se selecciona una forma de curva para el secado, (para el experimento referido se uso (8)), y se ajustan los datos de cualquiera de los dos conjuntos (se tomó aquél con el CH más alto) para obtener la estimación de b_1 ; es decir, se ajusta:

$$(h_1(t)) / CH_{01} = \exp(-b_1 t)$$

NOTA: a esta curva se le denominó "curva guía".

2°) Se selecciona una forma de curva para la diferencia $h_1 - h_2$ (el último término de la ecuación (9) fue

la seleccionada), los datos del segundo conjunto se restan de los valores estimados de h_1 en los tiempos correspondientes a las observaciones del segundo conjunto; y por último, estas diferencias se dividen entre k para obtener la estimación de b (también la de c si se usa $k \exp(-bt^c)$). Es decir se ajusta:

$$[CH_{01} \exp(-b''_1 t) - h_2(t)] / k = \exp(-bt)$$

donde:

b''_1 = la estimación obtenida de b_1 en 1°)

t = denota los tiempos en que se tomaron las observaciones del segundo conjunto.

3°) Para generar cualquier otra curva equivalente a h_1 , por ejemplo h_3 , que tenga contenido de humedad inicial CH_{03} , se puede hacer usando la expresión:

$$CH_{01} \exp(-b''_1 t) - k' \exp(-b'' t) \quad (12)$$

donde:

b'' es la estimación de b en 2°) y,

$$k' = CH_{01} - CH_{03}$$

Obviamente, los dos términos de (12) cambian de acuerdo a las funciones usadas para h_1 y $h_1 - h_2$.

El experimento referido, donde se usó esta metodología, se realizó impregnando sales hidrosolubles a base de cobre, cromo y arsénico (CCA). Este tipo de preservación se ha incrementado en el mercado de la madera preservada. Sin embargo, la madera impregnada con este tipo de preservadores hidrosolubles presenta la necesidad de ser secada nuevamente antes de su comercialización o puesta en servicio, lo que puede acarrear aumentos en el tiempo, pérdidas y costos de producción.

En razón de que el contenido de humedad que llega a presentar la madera impregnada puede ser superior al de la misma en estado verde, a la inclusión de las sales en el tejido celular y a las presiones aplicadas durante el proceso de impregnación, es posible que el resecado de esta madera se vea alterado, prolongando el tiempo en comparación de la madera natural bajo un mismo programa de secado.

Para los ensayos de secado en estufa se utilizó madera de *Pinus radiata* D. Don de 2.5 x 15 x 110 cm, manejando temperaturas máximas de TBS 85 °C y TBH 65 °C. La madera fue previamente sometida a tres diferentes tratamientos con dos repeticiones cada uno; el primero, consistió en secar la madera en condiciones normales; en el segundo, la madera se impregnó a presión con agua natural, y en el tercero, se impregnó la madera con una solución de sales CCA a un nivel de retención de 4.8 kg/m³. Cada repetición (carga) consistió de 48 tablas, registrándose la pérdida de humedad durante el secado en base al promedio de 5 tablas muestra por carga, a diferentes intervalos de tiempo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presenta un resumen de la construcción de las curvas de secado equivalentes para los tres tratamientos realizados.

CUADRO 2. Curvas de secado equivalentes de los tres tratamientos realizados a la madera.

Curvas guías				
Tratamiento	R ²	CH ₀	b'' ₁	Error Est. de b'' ₁
Testigo	0.9953	134.28	0.066260	0.00117725
Agua	0.9988	140.31	0.060997	0.00061819
CCA	0.9968	112.67	0.035982	0.00046728
Diferencia de curvas h ₁ - h ₂				
Tratamiento	R ²	k	b''	Error Est. de b''
Testigo	0.7350	20.48	0.041105	0.00806670
Agua	0.9879	30.03	0.031857	0.00111544
CCA	0.8525	14.39	0.014764	0.00169192

En la Figura 3 se muestra gráficamente los ajustes obtenidos para las dos cargas del tratamiento 1 (testigo), es decir, h₁ y h₂, la tercera es la generada para compararla con los otros dos tratamientos y se ha denotado como curva equivalente h₁₀₀, ya que su CH inicial se fijó en 100%. Del mismo modo, se puede generar una familia de curvas representativas del tratamiento 1, todas ellas equivalentes aunque con contenidos de humedad iniciales diferentes. Sólo se presenta la gráfica del tratamiento 1, ya que para los otros dos se tiene básicamente lo mismo.

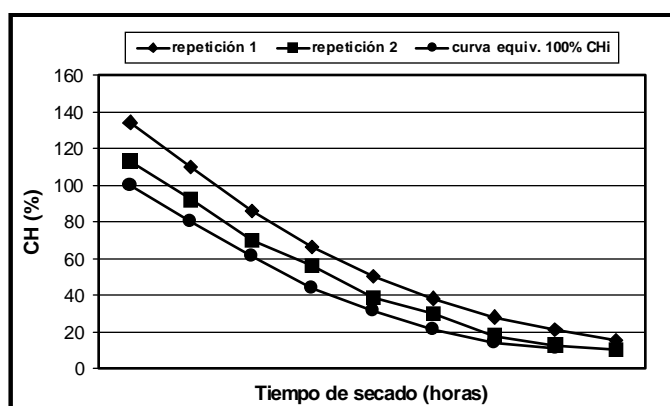


Figura 3. Curvas de secado de las dos cargas del tratamiento 1, curvas guía y equivalente.

Por último, se tiene la gráfica de la Figura 4 que muestra la comparación de los tres tratamientos, usando sus correspondientes curvas equivalentes con el mismo contenido de humedad inicial igual a 100%. Estas son las curvas buscadas para comparar los tres tratamientos, minimizando en el efecto final los debidos a los contenidos de humedad iniciales diferentes.

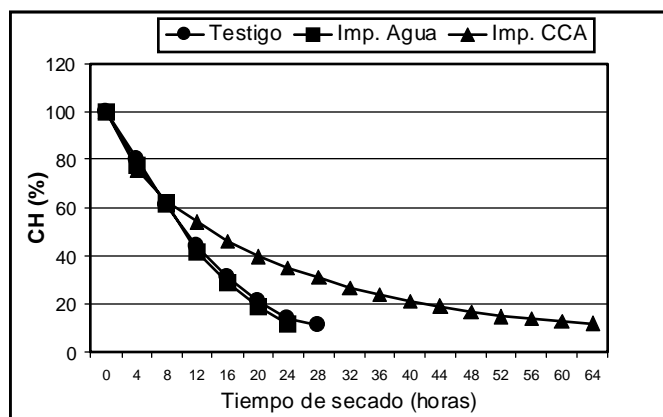


Figura 4. Curvas equivalentes de los tres tratamientos con CH₀ = 100%

De esta gráfica se puede apreciar que el tratamiento 3, donde se impregnó la madera con sales CCA, requiere aproximadamente 37 horas más que los otros dos tratamientos para alcanzar un contenido de humedad cercano al 10%. También, que los tratamientos 1 y 2 siguen básicamente la misma conducta, lo cual es razonable, ya que la única diferencia fue que en el tratamiento 2 se impregnó la madera con agua, mostrando que esta acción no altera el proceso de secado normal.

CONCLUSIONES

- 1) El procedimiento propuesto es flexible, rápido y eficiente, ya que tanto las curvas iniciales, como las diferencias de ellas pueden ser modeladas por diferentes funciones que describan sus correspondientes comportamientos.
- 2) Se requiere únicamente ajustar dos modelos y la representación que se obtiene de la comparación buscada es muy clara.
- 3) Dicho procedimiento de curvas equivalentes de secado, permite hacer evaluaciones más adecuadas y realistas para la comparación de tiempos de secado, ya sea entre diferentes especies, diferentes espesores, diferentes tratamientos previos de la madera y diferentes equipos (estufas) de secado que se quieran probar

LITERATURA CITADA

- FUENTES S., M. 1994. Secado de la Madera de *Pinus radiata* D. Don, Impregnada con Sales Hidrosolubles CCA. Tesis de maestría. FCF. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 162 p.
- ROSEN, HOWARD N. 1980. Empirical model for characterizing wood drying curves. *Wood Science*, 12(4):201-206.
- ROSEN, HOWARD N. 1982. Functional relations and approximation techniques for characterizing wood drying curves. *Wood Science*, 15(1):49-55.
- VERMAAS, H. F. 1987. Drying curve characterization for *Pinus radiata* and *Pinus patula* for temperatures above 100°C. *Holzforschung*, 41(6):389-394.