

## DETERMINACION DE LA CURVA DE SECADO AL AIRE LIBRE, MEDIANTE MODELACION MATEMÁTICA Y EXPERIMENTAL DE LA *Guadua angustifolia* Kunth

### RESUMEN

Este artículo muestra los resultados de un experimento de secado al aire libre de la especie de bambú *Guadua angustifolia* en forma rolliza, practicado a algunas muestras de la especie de la Región cafetera. El experimento se realizó bajo condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa específicas del jardín botánico de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira. De acuerdo a los resultados se plantearon diferentes ecuaciones matemáticas para modelar el comportamiento del porcentaje de contenido de humedad en función del tiempo y con base en el coeficiente de correlación  $R^2$ , se propuso un modelo matemático exponencial. Finalmente aparecen 2 ejemplos para emplear el modelo y se dan algunas recomendaciones para el manejo práctico del secado de Guadua.

**PALABRAS CLAVES:** *Guadua angustifolia*, secado al aire libre, temperatura, humedad relativa, contenido de humedad.

### ABSTRACT

*This article shows the results of an experiment of air-dried of the Guadua angustifolia-bamboo species in round form, practiced to some samples of the species of the coffee region. The experiment was made under environmental conditions of specific temperature and relative humidity of the botanical garden of the Faculty of Environmental Sciences of the Technological University of Pereira Colombia. According to the experimental results different mathematical equations were tried to model the behaviour of the percentage of the moist content based on the time. With base of the correlation coefficient of  $R^2$  was proposed an exponential mathematical model. Finally appears 2 examples for to use the model and some recommendations for the practical handling of the dried of Guadua.*

**KEYWORDS:** *Guadua angustifolia*, air-dried, temperature, relative humidity, moist content.

### 1. INTRODUCCIÓN

Con el presente trabajo, se quiere dar a conocer aspectos importantes en el proceso de secado al aire libre de la *Guadua angustifolia* en forma rolliza. Los problemas de calidad del producto final, como rajaduras y agrietamientos, se originan en buena parte desde el procedimiento empleado para el proceso de secado. Conocer los tiempos de duración del secado y su contenido de humedad son aspectos fundamentales en la cadena productiva del sector. Tradicionalmente los productores de Guadua no han dado la importancia al proceso de secado. El secado es considerado como un proceso natural, pero se debe saber como eliminar el agua dentro de ella [4, 6]. El contenido de humedad en las Guaduas determina las propiedades físico-mecánicas así como sus aplicaciones [1, 2, 4, 6, 7]. Además el contenido de humedad varía de acuerdo a su altura y a la edad de los culmos [12, 13, 15].

La infraestructura de que se dispone en el campo para desarrollar esta actividad es limitada, por lo cual se presentan algunas recomendaciones y resultados al

seguimiento sistemático de acciones que normalmente se llevan a cabo durante este proceso, haciendo las recomendaciones pertinentes que contribuyan a su optimización, así como la justificación y explicación del porque de cada una de las tareas y precauciones requeridas. Se conoce que la duración del secado para el caso de la madera depende de los factores climáticos del lugar [3, 8, 14] y con el conocimiento de variables como temperatura y humedad relativa [8,14], se puede proyectar el tiempo que tardará el secado para el caso de la Guadua, permitiéndole al productor determinar la disponibilidad del material para sus entregas oportunas. La Calidad también es un aspecto importante a tener en cuenta cuando se habla de secado, máxime si se pretende posicionar los productos en el contexto internacional y ser competitivos [9]. Se conoce que un buen tratamiento de preservación en la Guadua, se inicia con un buen secado [15, 16, 17, 18].

Para éste experimento no se tuvo en cuenta la variable velocidad del viento. Pero es importante modelarla a futuro.

### JORGE AUGUSTO MONTOYA ARANGO

Ingeniero Mecánico, MSc.  
Profesor Asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
jorgeama@utp.edu.co

### ELIAS JIMENEZ ARIAS

Economista, MSc.  
Profesor Auxiliar  
Universidad Tecnológica de Pereira  
eliasjim@utp.edu.co

Se definen los siguientes términos que se emplearán en el presente artículo:

$u$  [%] ó HR%: Porcentaje de humedad relativa del ambiente.

CH%: Porcentaje contenido de humedad de la Guadua.

T° C: Temperatura en grados centígrados.

CHE %: Porcentaje contenido de humedad de equilibrio.

## 2. METODOLOGÍA

La variable evaluada corresponde al contenido de humedad porcentual de cada muestra de Guadua. Se calcula en forma gravimétrica [3, 8] mediante la diferencia de pesos inicial y final de la muestra (1). El procedimiento de medición del contenido de humedad se hizo cortando aros circulares de 5 cm de longitud y de acuerdo al procedimiento descrito en la Norma ISO 22157-1:2004, Numeral (6) y la DIN 52 183. El procedimiento de pesaje se hizo en balanza electrónica con una precisión de 0,001g y el secado de muestras se realizó de acuerdo a procedimientos de las mismas normas. Estas pruebas se realizaron en los laboratorios de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira.

$$u = \frac{m_h - m_s}{m_s} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

$u$  [%] = Contenido de humedad,

$m_s$  = Peso seco de la muestra,

$m_h$  = Peso húmedo de la muestra.

Con el propósito de validar las muestras seleccionadas se utilizó como herramienta estadística el muestreo aleatorio simple, ya que aplica para esta clase de investigación, se utilizó programa estadístico SPSS-10 para el procesamiento de la información. Para calcular el tamaño de muestra sin conocer el tamaño de la población, se empleó la siguiente fórmula según la aplicación del muestreo aleatorio simple:

$$n = \frac{Z_{\alpha/2}^2 \cdot S^2}{E^2} \quad (2)$$

$n$  = Tamaño necesario de la muestra

$Z_{\alpha/2}$  = Margen de confiabilidad que producirá el nivel de confianza deseado, para un intervalo de confianza del 95%,  $\alpha = 0.05$  y  $Z = 1.96$

$S$  = Desviación estándar de la población (conocida

o estimada a partir de anteriores estudios o de una prueba piloto de la variabilidad de la población), se estimó una desviación estándar de  $S = 0.08$ .

$E$  = Error o diferencia máxima entre la media muestral y la media de la población que se está dispuesto a aceptar con el nivel de confianza que se ha definido, 5%.

$$n = \left( \frac{(1.96)^2 (0.08)^2}{(0.05)^2} \right) = 9,83 \cong 10$$

Con el resultado obtenido de la ecuación (2), se determinó el tamaño de la muestra de 10 unidades.



Figura 1. Secado al aire libre, ubicación en perchas, proyecto secado de Guadua.



Figura 2. Secado al aire libre, ubicación en perchas, en forma de tijera.



Figura 3. Secado bajo sombra, ubicación en estanterías en forma horizontal.

### 3. RESULTADOS

La duración del de secado al aire libre depende de factores climáticos (temperatura, humedad relativa y velocidad del aire) y de las características propias de las guaduas, (diámetro, espesor de pared, contenido de humedad, edad, posición del tramo con respecto a la longitud y sitio), por lo que no se puede estimar con exactitud un proceso normalizado; se podría decir que en época de verano seco, el tiempo de duración del secado puede ser de cuatro meses y en invierno llegar hasta seis meses o más para conseguir un resultado del CHE%.

El tiempo de duración fue de 106 días, de acuerdo a la Tabla 2.

La duración del secado se proyecto a 120 días, para condiciones de 61% humedad relativa y de 26 °C, con una desviación estándar para la HR% de 6,5 y de T°C de 1,4; con porcentajes de coeficientes de variación para la HR% de 10,7 y para la T°C de 5,4, ver Tabla 3. Estos resultados de acuerdo al promedio, para la ciudad de Pereira son considerados como época seca, por lo tanto se realizó proyección matemática, hasta el 14% que es el Contenido de Humedad de Equilibrio para Pereira. El promedio de HR% y T°C para Pereira, es de 75% y 22°C durante todo el año.

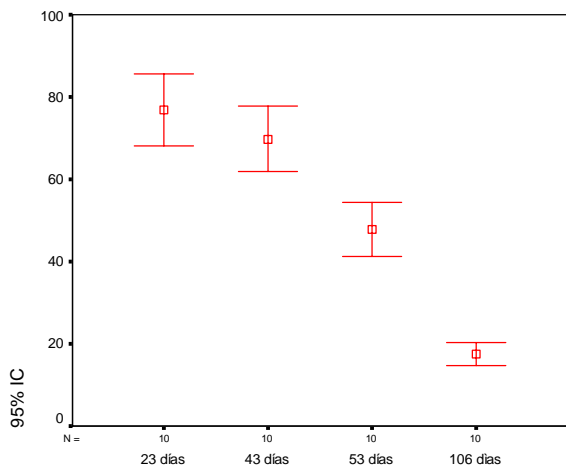


Figura 4. Contenidos de humedad con un 95% de intervalo de confianza

#### Estadísticos descriptivos

	N	Mínimo	Máximo	Media	s (Desv. típ.)
23 días	10	55,16	98,37	76,7810	12,2457
43 días	10	43,95	80,72	69,8280	11,2332
53 días	10	31,27	64,56	47,8190	9,0638
106 días	10	8,49	22,52	17,5000	3,7387
N válido (según l	10				

Tabla 1. Estadísticos descriptivos del secado de la guadua

Resultados del u % Vivero Universidad Tecnológica de Pereira				
	23	43	53	106
Guadua 1	85,43	80,72	52,68	19,46
Guadua 2	76,58	66,79	44,49	20,25
Guadua 3	98,37	76,44	45,99	19,51
Guadua 4	64,41	71,61	46,62	22,52
Guadua 5	73,88	58,37	64,56	18,17
Guadua 6	86,93	79,9	58,41	8,49
Guadua 7	80,38	76,21	44,72	17,33
Guadua 8	77,81	74,02	46,28	16,51
Guadua 9	68,86	70,27	31,27	16,32
Guadua 10	55,16	43,95	43,17	16,44
Promedio	76,78	69,83	47,82	17,5
s	12,2	11,2	9,1	3,7
CV%	15,9	16,1	19,0	21,4

Tabla 2. Resultados del secado de la guadua durante 106 días

	HR (%)	Temperatura (°C)
Universidad Tecnol. Pereira, periodo entre 20.09.04 al 5.01.2005	60,9	26,2
Desviación Estandar de la HR % y Temperatura, en ese periodo.	6,5	1,4
% CV (Coeficiente de Variación)	10,7	5,4

Tabla 3. Promedios de la HR% y T° C, periodo 20.09.04 al 5.01.2005.

En la Tabla 4, se muestran las ecuaciones que se pueden obtener empleando las expresiones matemáticas: ecuación lineal, exponencial, logarítmica y polinómica. Se presentan las 4 posibilidades, puesto que los resultados obtenidos son compatibles con esas expresiones. De acuerdo a la forma de la curva y los valores de correlación lineal R<sup>2</sup>, donde un valor de R<sup>2</sup> = 1, es el valor ideal. Por lo tanto el comportamiento del secado de la *Guadua angustifolia* al aire libre es exponencial, dado que su R<sup>2</sup> es el más cercano a uno.

TIPO	ECUACIÓN	R <sup>2</sup>
Exponencial	$y = 132,42e^{-0,0188(x)}$ $y = \% CH, x = días$	0,969
Lineal	$y = 0,7335(x) + 94,243$ $y = \% CH, x = días$	0,9489
Polinomial	$y = 0,0015(x)^2 - 0,9412(x) + 99,6$ $y = \% CH, x = días$	0,9511
Logarítmica	$y = -40,312 \ln(x) + 209,5$ $y = \% CH, x = días$	0,9056

Tabla 4. Ecuaciones matemáticas para el secado al Aire Libre.

### 3.1 Aplicación de los Resultados

Para una mejor comprensión y empleo práctico de la Figura 5, su aplicación permite conocer el %CH, de acuerdo al número de días, conforme se ilustra en el siguiente ejemplo:

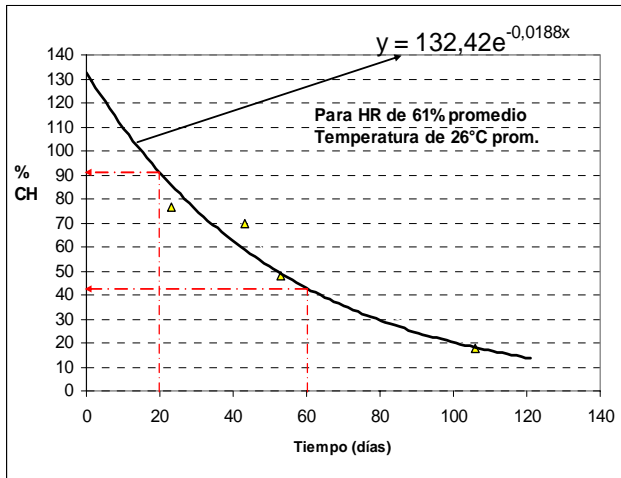


Figura 5: Curva de secado para calcular gráficamente el contenido de humedad, secado al aire libre, para condiciones promedio de HR de 61% y T de 26° C.

Ejemplo 1 y 2.

Se desea secar un lote de Guaduas al aire libre, con condiciones ambientales de época relativamente seca a una HR promedio de 61% y 26°C de temperatura (Jardín Botánico Universidad Tecnológica de Pereira), calcular el contenido de humedad en forma gráfica y teórica si se desea conocer su contenido de humedad a los 20 días y a los 40 días.

Respuesta: (gráfica)

En el gráfico de la Figura 5, seleccionamos en el eje “x”, los valores de 20 y 60 días respectivamente, se trazan dos líneas hasta el punto de corte con la curva exponencial, proyectando los correspondientes valores en el eje “y”; obteniendo como resultado 91 y 42 días respectivamente.

.Respuesta: (teórica)

Tomamos la ecuación tipo exponencial de la Tabla 4,

Ejemplo 1: Para el caso de 20 días, tenemos:

$y = 132,42e^{-0,018(x)}$ ; Donde  $y$  es el contenido de humedad, que deseamos conocer.

$x$  es el número de días.

$$y = 132,42e^{-0,018(20)};$$

$$y = 132,42 \frac{1}{e^{0,018(20)}};$$

$$y = 91,0;$$

CH = 91,0%; el resultado se

puede ver gráficamente, Figura 5.

Ejemplo 2: Para el caso de 60 días, tenemos:

$y = 132,42e^{-0,018(x)}$ ; Donde  $y$  es el contenido de humedad, que deseamos conocer.

$x$  es el número de días.

$$y = 132,42e^{-0,018(60)};$$

$$y = 132,42 \frac{1}{e^{0,018(60)}};$$

$$y = 43,0;$$

CH = 43,0%; El resultado se

puede ver gráficamente, Figura 5.

Durante el proceso de experimentación se evidenciaron algunos aspectos que se recomiendan durante el proceso de secado al aire libre, así:

1. Ubicación en perchas: consiste en apilar las guaduas recién cortadas en soportes ubicados a la intemperie o preferentemente bajo cobertizos transparentes [3, 4, 8]. de forma que estén sometidas a las condiciones medioambientales y muy especialmente al aire, elemento que favorece el intercambio calorífico y el arrastre del vapor de agua procedente del interior de la estructura de la guadua, ver Figuras 1 y 2.
2. La circulación horizontal del aire por la perchas se consigue colocando las guaduas entre cruzadas en los soportes. Las guaduas en posición vertical, se girarán sobre su eje (diariamente), se consigue un buen secado separando las guaduas en la parte inferior, y aislándolas de la humedad del piso colocándolas sobre una tabla o esterilla de guadua. Se deja también en el interior de las perchas un vacío en forma de chimenea para permitir una mejor circulación descendente del aire húmedo y frío.
3. El apilado en sombra después del perchado al aire libre y cuando el contenido de humedad de la guadua está entre 30% - 45% se deben apilar las guaduas en un sitio bajo sombra y con suficiente aireación. La forma de alinear el apilado es fundamental para asegurar un secado correcto Figura 3.

#### 4. CONCLUSIONES

Los diferentes resultados obtenidos, a partir de las diferentes opciones de los modelos matemáticos considerados, recomiendan que la ecuación de mejor aceptación sea aquella para la cual el valor de  $R^2$  se aproxima a uno, situación que se presenta cuando utilizamos la ecuación exponencial  $y = 132,42e^{-0,018(x)}$ . A partir ésta ecuación se determinó la curva de secado al aire libre en la Figura 5, se puede conocer el contenido de humedad, asumiendo un valor para “x” número de días y saber el estado de la *Guadua angustifolia*, permitiendo de esta manera conocer su avance en el proceso de secado del material, así como la disponibilidad para su uso y aplicación final.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abd. Latif M., Liese, W. (1998) – Moisture content of Two Malasyan Bamboos in relation to age, culm height, site and harvesting month. *Bamboo for Sustainable Development*, San José de Costa Rica, November 1998, 257-268 pp.
- [2] Arce-Villalobos, O.A. (1993): *Fundamentals of the design of bamboo structures*. Dissertation. Eindhoven, Netherlands: Technische Universiteit, 261 pp.
- [3] Alvarez-Noves, H., Fernandez-Golfin Seco, J.I. (1992) – *Fundamentos teóricos del secado de la madera*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Editorial: Neografis S. L., Madrid 1992, 193 pp.
- [4] Hidalgo, O. (2003): *Bamboo - The gift of the goods*. Bogota, Colombia: Hidalgo, O.. 553 p.
- [5] Hormilson, Cruz Rios (1994): *La Guadua: Nuestro Bambú*. CRQ & Centro Nacional para el Estudio del Bambú Guadua, FUDEGRAF-Armenia, Armenia Quindío Colombia 1994, 293 pp.
- [6] Liese, W. (1998): *The anatomy of bamboo culms*. INBAR Techn. Rep. No 18 . Beijing, China. 208 p.
- [7] Liese, W., Kumar, S. (2003): *Bamboo preservation compendium*. INBAR - CIBART, ABS-Technical Report No 22, New Delhi, India. 231 p.
- [8] Hoheisel, H. (1989) – *Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas*. Junta de acuerdo de Cartagena, Editorial: Carvajal S. A., Perú 1989, 418 pp.
- [9] Londoño X. (2000) – *Guadua un gigante dormido*. Seminario Guadua en la Construcción, memorias seminario, Armenia Quindío Colombia, Febrero 2000, 80 pp.
- [10] Jiménez E. (2005) – *Estudio técnico económico sobre el sistema de secado de la guadua al aire libre*. Universidad Tecnológica de Pereira Tesis MSc., 2005
- [11] Liese W. (1992<sup>a</sup>) – *Anatomía*. Memorias I Congreso Mundial de Bambú – Guadua, Pereira Colombia, 1992<sup>a</sup>, pp 25-29.
- [12] Qisheng, Z., Shenxue, J., and Yongyu T. (2002) – *Industrial utilization on Bamboo*. INBAR, Technical Report N° 26, Beijing China 2002, 207 pp.
- [13] Gandhi, Y. (1998)– *Preliminary study on the drying of bamboo (*Bambusa blumeana*) in a wood waste-fired kiln*. *Bamboo for Sustainable Development*. INBAR Proceedings N°7, VSP INBAR , pp. 495-510.
- [14] Kollmann, F. (1959) – *Tecnología de la Madera y sus aplicaciones*. Tomo I – Editorial: Gráficas Reunidas, S. A. Madrid 1959, 675 pp.
- [15] Janssen, J.J.A. (1998) – *Designing and Building with Bamboo*. INBAR Technical Report No 20, Beijing China 1998, 207 pp.
- [16] Montoya, J.A. & Morales, T., (2002), *Investigación tecnológica en métodos para la preservación de la Guadua*, Memorias Seminario –taller Avances en la investigación sobre Guadua, Universidad Tecnológica de Pereira, Mayo de 2002.
- [17] Montoya, J.A., (2002), *Investigación tecnológica en métodos para la preservación de la Guadua*. Universidad Nacional de Colombia, Tesis MSc., 180 P.
- [18] Villegas, M., (2000), *Sistema de secado y preservación de la Guadua y la Madera por medio de Ahumado*, en Seminario GUADUA en la Construcción, Armenia 10-12 Feb. 2000, pp. 59-60.