



DOI: [10.29298/rmcf.v14i78.1384](https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i78.1384)

Artículo de Investigación

## **Evaluación del proceso de secado solar de los culmos de *Guadua aculeata* Rupr. ex E. Fourn.**

### **Evaluation of the solar drying process of *Guadua aculeata* Rupr. ex E. Fourn culms**

Juan Carlos Tamarit-Urias<sup>1</sup>, Juan Quintanar-Olguin<sup>1\*</sup>, Casimiro Ordóñez-Prado<sup>1</sup>, Melchor Rodríguez-Acosta<sup>2</sup>, Martha Elena Fuentes-López<sup>1</sup>

Fecha de recepción/Reception date: 3 de abril de 2023

Fecha de aceptación/Acceptance date: 30 de junio del 2023

<sup>1</sup>INIFAP, Campo Experimental San Martinito. México.

<sup>2</sup>INIFAP, Campo Experimental Ixtacuaco. México.

\*Autor para correspondencia; correo-e: [quintanar.juan@inifap.gob.mx](mailto:quintanar.juan@inifap.gob.mx)

\*Corresponding author; e-mail: [quintanar.juan@inifap.gob.mx](mailto:quintanar.juan@inifap.gob.mx)

#### **Resumen**

El contenido de humedad de los culmos de bambú recién cosechados es de alrededor de 100 %, el cual se considera alto, por lo que debe reducirse mediante algún proceso de secado. Un paso clave en el procesamiento de los culmos es el secado, que ha sido poco valorado por los productores y usuarios de bambú. La exposición al aire libre es el método más utilizado en México, pero poco eficiente, ya que tarda desde semanas hasta varios meses en función de las condiciones ambientales. El objetivo del presente estudio fue evaluar el secado de secciones de culmos (6 m de longitud) de *Guadua aculeata* en un secador solar tipo túnel, con forma de prisma rectangular. El contenido de humedad inicial promedio fue de 106.72 %, en 80 días se alcanzó un contenido de humedad final promedio de 29.84 %. La tasa de secado fue superior a 1.0 % por día durante los primeros 20 días, lapso en el cual redujeron aproximadamente 40 % de su contenido de humedad. En los siguientes 60 días, perdieron en promedio 37.41 % de humedad a una tasa de secado variable para cada culmo muestra. La curva de secado del método evaluado corresponde a una función exponencial. Bajo las condiciones experimentales de secado se determinó que las secciones de culmos de 6 m de longitud y diámetro promedio de 12.42 cm, pueden alcanzar un *CH* promedio menor a 18 % en un tiempo de 109 días, para posteriormente usarse como elementos estructurales.

**Palabras clave:** Bambú gigante, contenido de humedad, curva de secado, función exponencial, secador solar tipo túnel, tasa de secado.

#### **Abstract**

The moisture content of freshly harvested bamboo culms is high, near 100 %, and it should be reduced by some drying process. A key step in the processing of culms, which has been under-appreciated by bamboo producers and users, is drying. Outdoor exposure is the most widely used drying method in Mexico; however, it is not very efficient, as it takes weeks to several months, depending on the environmental conditions. The objective of the present study was to evaluate the drying of *Guadua aculeata* culm sections (6 m long) in a solar tunnel dryer with a rectangular prism shape. The initial average moisture content was 106.72 %, and after a period of 80 days, a final average moisture content of 29.84 % was reached. The drying rate was above 1.0 % per day in the first 20 days, during which their moisture content was reduced by approximately 40 %. In the following 60 days, they lost on average 37.41 % of moisture, at a variable drying rate for each sample culm. The drying curve of the assessed method corresponds to an exponential function. Under the experimental drying conditions, it was determined that 6 m long sections of culms with an average diameter of 12.42 cm can reach an average *MC* below 18 % in 109 days, thus becoming suitable for use as structural elements.

**Key words:** Giant bamboo, moisture content, drying curve, exponential function, solar tunnel dryer, drying rate.

## Introducción

Se conoce con el nombre genérico de bambú a las plantas de la familia Poaceae, subfamilia Bambusoideae, distribuidas prácticamente en todos los ecosistemas del mundo. En la actualidad, se reconocen 121 géneros y 1 662 especies de bambúes (Canavan *et al.*, 2017). En México existen ocho géneros, y se han identificado 61 especies de bambú leñoso, de las cuales 42 son endémicas de México (Ramírez-Ojeda *et al.*, 2021; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2022); la subtribu Guaduinæ es la más importante cultural y económicamente, y el género *Guadua* es el más representativo (Londoño *et al.*, 2002), ya que por sus grandes dimensiones (diámetro y longitud) y excelentes propiedades físicas y mecánicas, tiene un gran potencial económico, en particular para la construcción de viviendas en las regiones tropicales (Ordoñez *et al.*, 2013).

Dentro del taxón *Guadua*, una especie que sobresale por sus características anatómicas, físicas y mecánicas es *Guadua aculeata* Rupr. ex E. Fourn. (tarro, caña brava) que llega a medir 25 m de altura y 18 cm de diámetro en la base, con entrenudos huecos de 20 a 30 cm de largo y de 2 cm de espesor (Cedeño e Irigoyen, 2011). La parte del bambú que más se usa es el culmo (tallo principal) de la planta, cuya forma tradicional es cilíndrica, pero el diámetro disminuye con la altura, está separado internamente de manera transversal por nudos macizos y sus entrenudos son huecos (Chaowana *et al.*, 2021). Anatómicamente, está constituido por una corteza (cutícula), fibras y células de parénquima. Las proporciones y dimensiones de cada componente varían entre especies, dentro de especies y en un

mismo individuo, lo que genera una gran heterogeneidad en su comportamiento durante los procesos de transformación (Yuan *et al.*, 2022).

El procedimiento de secado es clave para el aprovechamiento industrial y comercial de los culmos, debido a que mejora tanto las propiedades estructurales como la apariencia estética (Tang *et al.*, 2012; Burger *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2019), lo que permite que se amplíe su área de aplicación y se mejore su valor de utilización (Lv *et al.*, 2022). Sin embargo, los productores, comercializadores y usuarios de culmos no le han dado la importancia requerida, considerándolo un proceso natural (Montoya y Jiménez, 2006) que puede tardar desde semanas, hasta varios meses para alcanzar un contenido de humedad cercano a 12 % (Liese y Tang, 2015), el cual se considera idóneo para diferentes usos.

El agrietamiento y las hendiduras a lo largo de sus fibras son los principales defectos que se presentan durante el secado de culmos (Lv *et al.*, 2018a; Lv *et al.*, 2021) debido a la baja resistencia a la tracción transversal por la falta de células radiales (Liese y Tang, 2015; Lv *et al.*, 2018b).

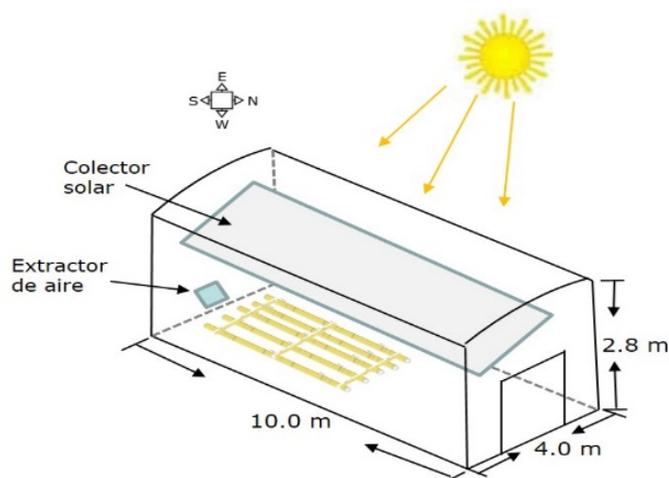
Hasta el presente, se han realizado pocas investigaciones sobre el secado solar de culmos de bambú (Ong, 1996; Montoya y Jiménez, 2006; Morales-Pinzón *et al.*, 2012; Vetter *et al.*, 2015; Hossain *et al.*, 2021; Kaba *et al.*, 2022), y en todas se utilizan secciones menores a 2 m de longitud. Frente a la poca importancia que se le ha dado al proceso de secado solar de culmos de bambú de 6 m para uso estructural, en el presente estudio se prueba ese método de secado para dicha dimensión de los culmos como una opción más eficiente en comparación con el secado al aire libre, cuyo objetivo fue evaluar el proceso de secado de culmos de *Guadua aculeata* en un secador solar tipo túnel activo en la región Hueytamalco, Puebla, México.

## Materiales y Métodos

La recolecta del material consistió en obtener piezas de 6 m de longitud de culmos maduros, a los cuales se les midió en pie su diámetro normal a una altura de 1.3 m sobre el nivel del suelo con una cinta diamétrica *Forestry Suppliers*<sup>®</sup> modelo 283D/5m-CSE de 5 m de longitud graduada con precisión al milímetro. El diámetro normal de los culmos varió en un intervalo de 10.7 a 13.8 cm con un promedio de 12.4 cm. Estas piezas se obtuvieron en rodales naturales de *G. aculeata* localizados en el predio Las Margaritas del municipio Hueytamalco, Puebla, México, entre las coordenadas geográficas 19°52' y 20°12' de latitud norte, y 97°12' y 97°23' de longitud oeste, a una altitud promedio de 430 m.

Para el secado de las piezas de culmos, se utilizó un secador solar construido en el Sitio Experimental Las Margaritas perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

El proceso de secado se realizó durante los meses de agosto a noviembre de 2018. El secador solar utilizado es de tipo túnel, en forma de prisma rectangular, y consta de un techo semiparabólico y paredes rectangulares cubiertas con polietileno con protección ultravioleta, estructura de PTR y piso de concreto. El secador posee un colector solar interno en forma de falso techo, construido con láminas lisas de aluminio pintadas en color negro mate. Las dimensiones del secador son 4 m de ancho, 10 m de largo y 2.8 m de alto (Figura 1). Las principales modificaciones realizadas al diseño original, fueron la sustitución de los ventiladores por un solo extractor eólico de 20 cm de diámetro colocado en la pared trasera y centrado en la parte inferior, cuya finalidad es extraer el aire húmedo del interior y expulsarlo fuera del secador.



**Figura 1.** Esquema del secador solar utilizado para el secado de los culmos de *Guadua aculeata* Rupr. ex E. Fourn.

El registro de temperatura y humedad relativa se realizó con dos *Data Logger HOBO*<sup>®</sup> UX100-003 con un error de 3.5 %: uno se colocó en el interior del secador y otro en el exterior, a una altura de 2 m del suelo para el registro de las condiciones del ambiente externo. Los datos de radiación solar promedio diarios y mensuales se obtuvieron de la base de datos *Global Solar Atlas by World Bank Group* (Solargis, 2023) para las coordenadas geográficas 20.000610, -97.307414 (20°00'02", -097°18'27") que corresponden a la ubicación de las instalaciones del Sitio Experimental Las Margaritas.

Para la evaluación del proceso de secado solar se formó una pila con 50 piezas de 6 m de longitud, recolectadas en una proporción de 80 % de la parte basal y 20 % del tercio medio con respecto a la longitud total del culmo. Al momento del derribo, se seleccionaron cuatro piezas de 6.1 m para utilizarlas como muestras de secado, y de cada una se obtuvieron dos probetas de humedad de 5 cm de largo, una de cada extremo de las piezas.

Las piezas se apilaron en forma horizontal en cinco camas de 10 piezas cada una, entre ellas se colocaron como separadores tres culmos de un diámetro inferior a los

apilados y con un largo de 2.5 m, con una separación de 3 m aproximadamente. Las muestras de secado se pusieron dos a cada lado de la pila, una en su parte baja y la otra en la media (Figura 2).



**Figura 2.** Apilado de los culmos de *Guadua aculeata* Rupr. ex E. Fourn. dentro del secador solar.

El contenido de humedad ( $CH$ ) inicial (en condición verde) de las muestras de secado se determinó con el método gravimétrico, para lo cual se pesaron las probetas en una balanza electrónica digital *Ohaus*® PR Series *Precision* PR1602/E con precisión de 0.01 g para determinar su peso húmedo, luego se dispusieron en un horno de laboratorio *TECSA*® modelo HDP 334 para su secado a una temperatura de  $103 \pm 2$  °C durante 24 horas, periodo requerido para alcanzar su peso seco. El  $CH$  de cada probeta se calculó como la pérdida de peso, expresada como un porcentaje de su peso seco, mediante la Ecuación 1 (International Organization for Standardization, 2019):

$$CH_i = \frac{P_{hi} - P_s}{P_s} 100 \quad (1)$$

Donde:

$CH_i$  = Contenido de humedad de cada probeta expresada como un porcentaje de su respectivo peso seco

$P_{hi}$  = Peso húmedo inicial de la probeta antes del secado

$P_s$  = Peso seco en horno de la probeta

El seguimiento del proceso de secado se realizó mediante el peso seco calculado ( $PSC$ ) de las muestras de secado. Para ello se usó el  $CH$  promedio obtenido de las probetas antes referidas y el peso de cada muestra al momento del derribo y corte del culmo (Ecuación 2) (Simpson, 1991; Aquino-González *et al.*, 2010):

$$PSC = \frac{P_m}{CH_i + 100} 100 \quad (2)$$

Donde:

$PSC$  = Peso seco calculado para la muestra

$P_m$  = Peso húmedo inicial de la muestra de secado

$CH_i$  = Contenido de humedad promedio de las probetas determinado con la Ecuación

(1)

El seguimiento del proceso de secado, en términos de pérdida de peso y su respectivo  $CH$  en diferentes intervalos de tiempo, se llevó a cabo con el método gravimétrico a través de la pérdida de peso de las muestras de secado, las cuales se pesaron cada dos días y se les determinó el  $CH$  mediante la Ecuación 3 (Baranski *et al.*, 2021):

$$CH_{ms} = \frac{P_h - PSC}{PSC} 100 \quad (3)$$

Donde:

$CH_{ms}$  = Contenido de humedad de cada muestra de secado al momento del registro del peso durante el proceso de secado

$P_h$  = Peso de las muestras en cualquier momento del proceso de secado

$PSC$  = Peso seco calculado de las muestras de secado

La tasa de secado ( $TS$ ) se determinó con la Ecuación 4, que describe la variación de contenido de humedad medida a un tiempo ( $t$ ) con respecto al tiempo anterior ( $t-1$ ) (Montero y Rozas, 2019):

$$TS = \frac{\Delta CH}{\Delta t} \quad (4)$$

Donde:

$TS$  = Tasa de secado (%  $CH$  día<sup>-1</sup>)

$\Delta CH$  = Variación de contenido de humedad (%)

$\Delta t$  = Tiempo entre cada medición (día)

## **Curva de secado para evaluar el secado solar de culmos**

El contenido de humedad ( $CH$ , %) y el tiempo de secado ( $t$ , horas) registrados en las muestras fueron las variables que se utilizaron para generar la curva que caracteriza el proceso de secado solar de culmos en el área de estudio. Un análisis previo que consistió en evaluar el ajuste de diferentes formas de modelos exponenciales referidos por Mehta *et al.* (2022) y Rezaei *et al.* (2022), condujo a seleccionar el modelo cuya estructura matemática se muestra en la Ecuación (5).

$$CH = \alpha \times \exp(-\beta \times t) \quad (5)$$

Donde:

$CH$  = Contenido de humedad

$\alpha$  y  $\beta$  = Coeficientes de regresión por estimar

$\exp$  = Función exponencial

$t$  = Tiempo en horas de secado

Con base en Hox *et al.* (2017), la Ecuación (5) se ajustó por regresión mediante la técnica de modelos de efectos mixtos, se utilizó el paquete *nlme* del programa

estadístico R versión 4.2.3 (R Core Team, 2022). Se determinaron los siguientes estadísticos de bondad de ajuste: Coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros ( $R^2_{adj}$ ), Raíz del cuadrado medio del error ( $RCME$ ), Criterio de Información de Akaike ( $AIC$ ), Criterio de información Bayesiano ( $BIC$ ) y el logaritmo de verosimilitud ( $logLik$ ).

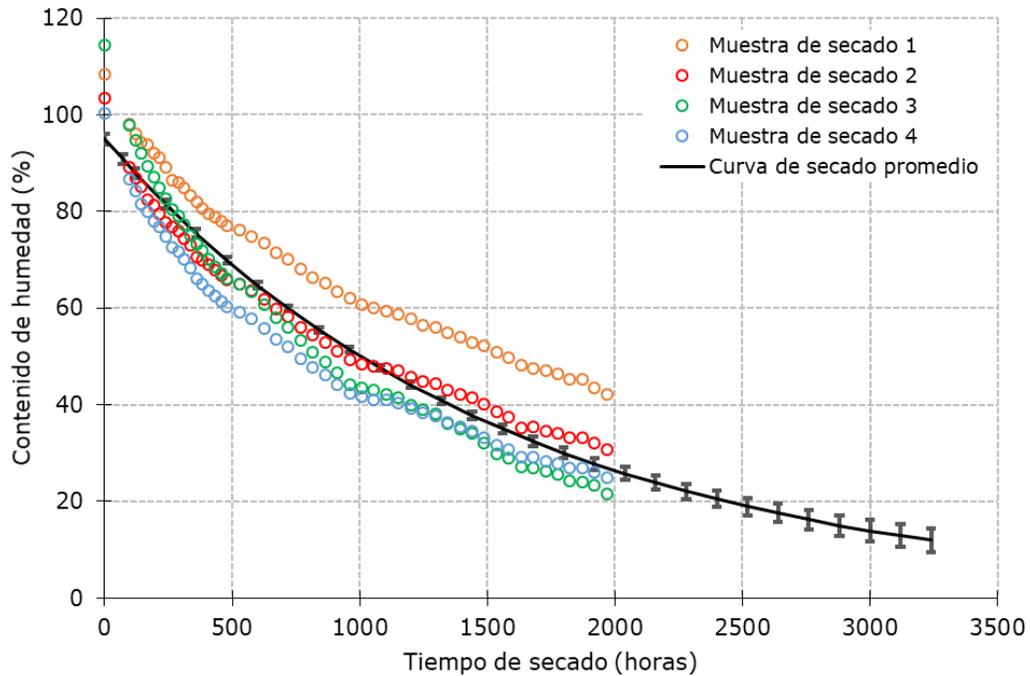
## **Resultados**

### **Análisis climatológico de la zona del estudio**

La radiación solar promedio mensual que se presentó durante el estudio fue de 3 433, 3 729 y 3 382 Wh m<sup>-2</sup> para los meses de septiembre, octubre y noviembre, respectivamente. Los valores de temperaturas máximas que se registraron al interior fue de 46.9 °C y mínimas de 18.8 °C, mientras que en el exterior la máxima fue de 39.6 °C y la mínima de 18.8 °C, con un diferencial de la temperatura ambiental e interna promedio de 11 °C entre las 12:00 y las 14:00 h, con una diferencia máxima de 13 °C observada aproximadamente a las 13:00 h. En relación con la humedad relativa, el valor mínimo fue de 31.8 % y máximo de 91 % al interior del secador, y una mínima de 53.6 % y máxima de 89 % en el ambiente exterior.

## Curva de secado solar de culmos

El seguimiento del proceso de secado de culmos de *G. aculeata* fue durante un periodo de 1 920 horas (80 días). Se inició con un *CH* promedio de las muestras de secado de 106.71 %, el *CH* promedio observado que se alcanzó al día 80 fue de 29.84 %, el cual está en el intervalo del *CH* que corresponde al punto de saturación de la fibra (Liese y Tang, 2015). La curva de secado promedio ajustada y las respectivas desviaciones estándar que reproduce la Ecuación (4) de tipo exponencial, cuyos valores de sus coeficientes de regresión fueron  $a=95.02205$  y  $\beta=0.00064$ , mismos que resultaron altamente significativos con un nivel de probabilidad de 95 % ( $\alpha=0.05$ , valor de  $p=2e-16$ ), junto con las tendencias de secado observadas se presentan en la Figura 3. Los valores que se obtuvieron para los estadísticos de bondad de ajuste del modelo fueron de 0.9856, 2.4996, 985.80, 1005.41 y -486.90 para  $R^2_{adj}$ ,  $RCME$ ,  $AIC$ ,  $BIC$  y  $logLik$ , respectivamente.



**Figura 3.** Comportamiento gráfico observado del proceso de secado solar de culmos y tendencia de la curva de secado promedio a partir de la expresión exponencial.

Para estimar el tiempo de secado ( $t$ ) en horas necesario para algún valor de  $CH$  de interés que se considere apto según el uso que se pretende dar a los culmos, fue necesario despejar el valor de  $t$  de la Ecuación (5), obteniendo la Ecuación (6). Sin embargo, para estimar el tiempo de secado en días, el resultado de aplicar la Ecuación 5 deberá de dividirse entre 24.

$$t = -\frac{\ln\left(\frac{CH}{\alpha}\right)}{\beta} \quad (6)$$

Donde:

$t$  = Tiempo de secado (horas)

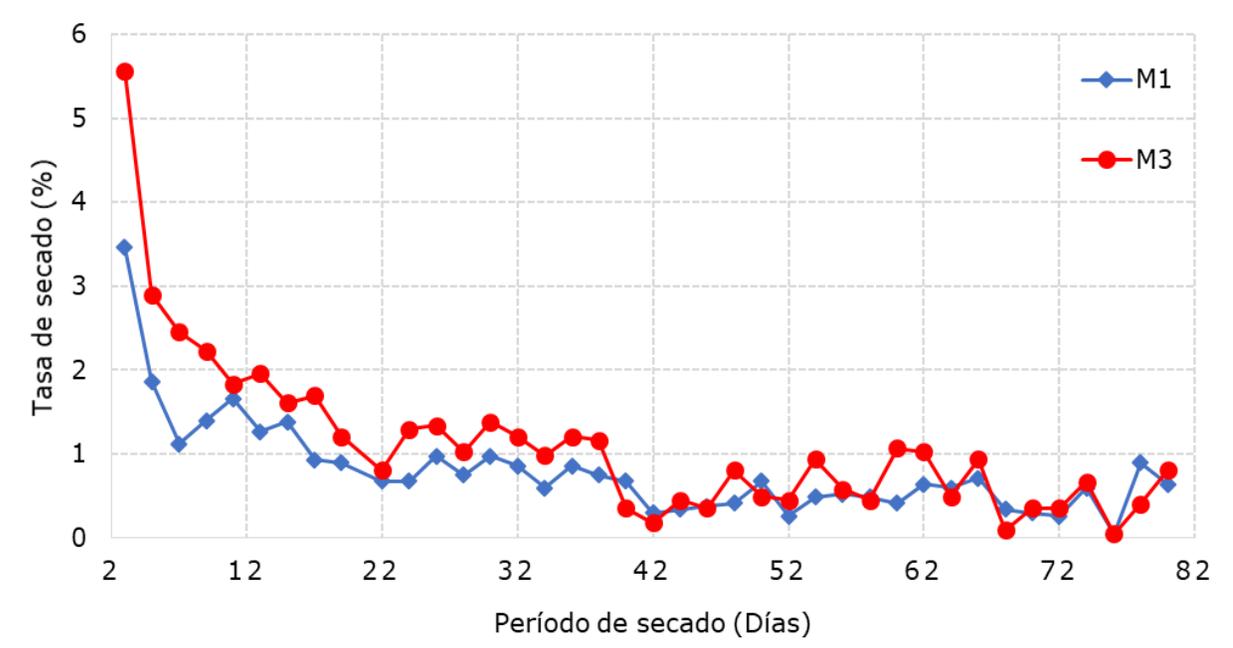
$\ln$  = Logaritmo natural

$CH$  = Contenido de humedad (%)

$\alpha$  y  $\beta$  = Coeficientes de regresión utilizados para generar la curva de secado

### **Tasa de secado de *Guadua aculeata* en secador solar**

La pérdida de humedad por día fue diferente en cada uno de los culmos muestra, así como a lo largo del periodo de secado. En la Figura 4, se ilustra el comportamiento de las dos muestras que tuvieron las tasas de secado más lenta y rápida durante el proceso de secado. En ambos casos se aprecia que al inicio del proceso, cuando tienen altos contenidos de humedad, la pérdida de humedad por día es superior a 1.0 %. La muestra de secado 1, con un  $CH$  inicial de 108.36 % presentó una tasa máxima de pérdida de humedad de 1.86 % por día y mantuvo la tasa de secado por encima de 1.0 % durante los primeros 16 días, hasta alcanzar aproximadamente 78 % de humedad. A partir de ese punto, la tasa disminuyó con variaciones entre 1.0 y 0.6 % hasta el día 40, cuando alcanzó un  $CH$  de 60 %; a partir de ese  $CH$ , la tasa de secado se mantuvo inferior a 0.6 % cada 24 horas.



**Figura 4.** Tasa de secado cada 24 horas de dos muestras de bambú, mediante secado solar.

La muestra de secado 3 con un *CH* inicial de 114.52 %, empezó con una pérdida de humedad de 2.9 % cada 24 horas y con una tasa de secado constante por arriba de 1.5 % hasta alcanzar aproximadamente un *CH* de 66 % en los primeros 17 días, posteriormente, la tasa de secado se mantuvo sobre 1.0 % hasta alcanzar un *CH* de 44 % a los 38 días. A partir de este punto, la tasa de secado promedio fue constante de 0.5 % cada 24 horas.

## Discusión

El *CH* inicial en base seca de las diferentes especies de bambú citadas en la literatura especializada es superior a 100 %, aunque existen variaciones que dependen de la especie, área de crecimiento y temporada de corte (Hossain *et al.*, 2021). En el caso de los culmos de *G. aculeata* estudiados, el *CH* inicial promedio fue de 106 %, valor mayor al registrado por Wang *et al.* (2019) para el bambú *Phyllostachys heterocycla* fo. *pubescens* (Pradelle) D. C. McClint., de 90 %. Aun cuando existe una clara diferencia en el *CH* entre las diferentes alturas de un culmo de bambú, Hartono *et al.* (2022) documentan contenidos de humedad promedio de 223.4 % en la parte baja de los culmos de *Bambusa vulgaris* var. *vittata* Rivière & C. Rivière. Con relación al proceso de secado, de acuerdo con Tang *et al.* (2012) los bambúes con culmos sólidos son más fáciles de secar que las especies con culmos huecos, como es el caso de *G. aculeata*. Montoya y Jiménez (2006) indican que la duración del secado de bambú depende de factores inherentes a la especie como diámetro del culmo, espesor de pared, contenido de humedad inicial, edad, posición en la altura del culmo, longitud de la muestra por secar y sitio de crecimiento.

Un factor fundamental que se debe considerar en la determinación del tiempo que dura el proceso de secado de culmos de bambú es la longitud de las piezas, ya que cuanto más largas, requerirán de mayores periodos debido a que el movimiento de la humedad a través de la estructura anatómica de los bambúes solo ocurre en el sentido longitudinal. Ante la falta de elementos anatómicos en la dirección transversal como vasos o parénquima, el movimiento de humedad en este sentido es secundario (Huang *et al.*, 2015; Lv *et al.*, 2021). Así, Morales-Pinzón *et al.* (2012) secaron secciones preservadas de 6 m y necesitaron de al menos cuatro meses para lograr un *CH* entre 19 y 27 %.

Hossain *et al.* (2021) al secar culmos de tres especies de bambú de 2.5 m de longitud en un secador solar y con un *CH* inicial promedio de 60 % hasta 14 %, requirieron de 30 días para *Bambusa balcooa* Roxb., 27 días para *Bambusa vulgaris* Schrad. ex J. C. Wendl., y 24 días para *Schizostachyum* Nees. Mientras que Kaba *et*

*al.* (2022) al realizar estudios sobre secado de culmos de *Yushania alpinia* (K. Schum.) W. C. Lin de 4 m de largo, apilados de forma horizontal bajo cobertizo sin exponerlos a la humedad, la lluvia o la luz solar, tardaron 97 días para secarse de un *CH* inicial de 110.81 % a 13.90 % de humedad final. Otro estudio de secado al aire libre y bajo cobertizo, fue el realizado por Yan *et al.* (2022) quienes citan que al utilizar secciones de culmos de *Phyllostachys edulis* (Carrière) J. Houz. de 6 m de largo y un *CH* inicial de 76 %, a los seis meses alcanzó un *CH* final de 11 %.

En el presente estudio, se inició con un *CH* promedio de 106.71 % y se requirieron 80 días para alcanzar 29.84 % de *CH* final, sin embargo, mediante la utilización de la función exponencial generada se estima un tiempo de 4.7 meses para alcanzar un *CH* final de entre 11 y 12 %, lo que comparativamente muestra que el secado solar es 22 % más rápido que el secado tradicional, con una baja proporción de defectos por rajaduras, y se obtienen mejoras en la calidad del producto (Chen *et al.*, 2023).

Al utilizar la función exponencial ajustada para estimar el tiempo de secado de culmos de 6 m de longitud de *G. aculeata* a un valor de *CH* menor a 18 %, valor sugerido para uso en diseño estructural (Seduvi, 2017), se requieren de 109 días. Este periodo es semejante al calculado por Montoya y Jiménez (2006) de 106 días para alcanzar un contenido de humedad de 17.5 % para culmos de *Guadua angustifolia* Kunth en Pereira, Colombia; en ese estudio se usó la función exponencial  $CH = 132.42 \times \exp(-0.0188 \times t)$  con un  $R^2$  de 0.969. En este sentido, Vetter *et al.* (2015) refieren que el secado de culmos de bambú en su forma rolliza necesita de periodos prolongados, condición indispensable para que se logre el mínimo de defectos por rajaduras, que de acuerdo con Chen *et al.* (2023) suelen presentarse en los nudos, entrenudos y en ambos extremos de las secciones de los culmos.

Referente a la tasa de secado a la cual los culmos de *G. aculeata* perdieron humedad durante el proceso de secado solar, fue superior a 1.0 % por día durante

los primeros 20 días, a partir de una humedad inicial de 106.71 % hasta una humedad promedio de 67 %, es decir, en promedio perdieron aproximadamente 40 % de humedad. Posterior a este periodo, la tasa de secado fue variable, en promedio perdieron 37.41 % en los siguientes 60 días, con una tasa promedio de 0.62 % por día, aunque algunas muestras de secado alcanzaron durante este segundo lapso de tiempo una tasa diaria de secado cercana a 1.0 %. Los valores obtenidos de la tasa de secado son mayores a los registrados por Yan *et al.* (2022) para el secado al aire libre y bajo cobertizo de los culmos de *Phyllostachys edulis*, que presentaron una tasa diaria de secado de 0.50 % al reducir su *CH* de 76 a 35 % en 81 días y de 0.22 % para pasar de 35 a 11 % en un periodo de 108 días. Sin embargo, aunque estas son tasas de secado promedio, en el proceso debe considerarse la altura del culmo de la que proviene la sección por secarse, ya que piezas provenientes de la parte media tienen una tasa de secado más alta que aquellas provenientes de la parte baja, como muestran los resultados de las dos muestras analizadas en relación a la tasa de secado, en la cual la muestra 1 provenía de la parte basal y presentó una tasa de secado menor que la muestra 3 que se obtuvo del segundo tercio del culmo. Lo anterior es debido a las diferencias químicas, físicas y de estructura anatómica que existen en los culmos de bambú (Tang *et al.*, 2012; Chaowana *et al.*, 2021); además de un mayor grosor de la pared de la sección inferior del culmo (Vetter *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2023).

## Conclusiones

La evaluación del proceso de secado solar de culmos comerciales de *Guadua aculeata* procedente de Hueytamalco, Puebla, México, con secciones de 6 m de

longitud permite concluir que es factible estimar el tiempo de secado de culmos de *G. aculeata* bajo condiciones de secado solar mediante el uso de la Ecuación:

$t = -\frac{\ln\left(\frac{CH}{95.02205}\right)}{0.00064}$ . Al utilizar la ecuación de tipo exponencial ajustada, se estima un

tiempo de 109 días para secar culmos de *G. aculeata* hasta un contenido de humedad de 18 % sugerido para uso estructural. Los culmos de *G. aculeata* presentan una tasa de secado superior a 1 % durante los primeros 20 días de proceso y de 0.62 % en promedio durante los 60 días restantes.

### **Agradecimientos**

A Volkswagen México S. A. de C. V. por el apoyo financiero al INIFAP para ejecutar el proyecto “Establecimiento de una plantación forestal sustentable de bambú nativo (*Guadua aculeata*) en una superficie de 355 ha en el Sitio Experimental Las Margaritas, municipio Hueytamalco, Puebla”.

### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés en la realización del presente trabajo de investigación. Juan Carlos Tamarit-Urias declara no haber participado en el proceso editorial del documento.

### **Contribución por autor**

Juan Carlos Tamarit-Urias: conceptualización y organización de la investigación, colecta de información en trabajo de campo, conformación de bases de datos, análisis estadístico, escritura y corrección del documento; Juan Quintanar-Olguin: conceptualización de la investigación, curación de datos, escritura y corrección del documento con énfasis en la revisión bibliográfica; Casimiro Ordóñez-Prado y Martha Elena Fuentes-López: obtención de fondos, corrección del documento; Melchor Rodríguez-Acosta: colecta de información en trabajo de campo y corrección del documento.

## Referencias

- Aquino-González, L. V., J. Rodríguez-Ramírez, L. L. Méndez-Lagunas y S. Sandoval-Torres. 2010. Evaluación de programas de secado para madera de chalamite (*Pinus pseudostrobus*). *Madera y Bosques* 16(2):35-46. <https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v16n2/v16n2a3.pdf>. (20 de mayo de 2023).
- Baranski, J., A. Suchta, S. Baranska, I. Klement, T. Vilkovská and P. Vilkovský. 2021. Wood moisture-content measurement accuracy of impregnated and nonimpregnated wood. *Sensors* 21(21):7033. Doi: 10.3390/s21217033.
- Burger, M. D., G. A. Oosthuizen, J. F. Oberholzer, P. De Wet and C. I. Ras. 2017. Strategies to standardise bamboo for manufacturing process chains. *Procedia Manufacturing* 8:330-337. Doi: 10.1016/j.promfg.2017.02.042.
- Canavan, S., D. M. Richardson, V. Visser, J. J. Le Roux, M. S. Vorontsova and J. R. U. Wilson. 2017. The global distribution of bamboos: assessing correlates of introduction and invasion. *AoB Plants* 9(1):1-18. Doi: 10.1093/aobpla/plw078.
- Cedeño V., A. y J. Irigoyen C. 2011. El bambú en México. *Revista Arq.urb* 6:223-243. <https://revistaarqurb.com.br/arqurb/article/view/317>. (20 de enero de 2023).

Chaowana, K., S. Wisadsatorn and P. Chaowana. 2021. Bamboo as a sustainable building material-culm characteristics and properties. *Sustainability* 13(13):7376. Doi: 10.3390/su13137376.

Chen, Q., Y. He, Y. Jiang, J. Qi, ... and J. Xie. 2023. Effect of bamboo nodes on crack generation of round bamboo and bamboo-based composites during drying. *European Journal of Wood and Wood Products* 81(2). Doi: 10.1007/s00107-023-01942-7.

Hartono, R., A. H. Iswanto, T. Priadi, E. Herawati, ... and I. Sumardi. 2022. Physical, chemical, and mechanical properties of six bamboo from Sumatera Island Indonesia and its potential applications for composite materials. *Polymers* 14(22):4868. Doi: 10.3390/polym14224868.

Hossain, M. A., M. A. Rahman, U. K. Rokeya and R. Akther. 2021. Application of solar heated kiln for determination of seasoning schedule of borak (*Bambusa balcooa*), baijja (*Bambusa vulgaris*) and dolu (*Schizo stachyum*) round bamboo species. *Eco-friendly Agriculture Journal* 14(3):9-13. [http://efaj-international.com/wp-content/uploads/2021/04/002\\_21\\_BFRI\\_Seasoning-Scheduleof-Bamboo.pdf](http://efaj-international.com/wp-content/uploads/2021/04/002_21_BFRI_Seasoning-Scheduleof-Bamboo.pdf). (10 de noviembre de 2022).

Hox, J., M. Moerbeek, and R. van de Schoot. 2017. *Multilevel analysis: Techniques and applications*. Routledge Taylor & Francis Group. New York, NY, United States of America. 364 p.

Huang, X. D., C. Y. Hse and T. F. Shupe. 2015. Study of moso bamboo's permeability and mechanical properties. *Emerging Materials Research* 4(1):130-138. Doi: 10.1680/emr.14.00034.

International Organization for Standardization (ISO). 2019. NORM 22157:2019(en) Bamboo structures-Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms-Test methods. ISO. Geneva, GE, Switzerland. 25 p. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:22157:ed-1:v1:en> (24 de febrero de 2023).

- Kaba, G., M. Mussa, G. Desalegn, A. Tesfaye, T. Wubishet and G. Mezgebu. 2022. Imperative seasoning characteristics of *Yushania alpina* (Highland bamboo) culms grown in Dire-Dawa, Ethiopia. Indonesian Journal of Innovation and Applied Sciences 2(3):247-254. Doi: 10.47540/ijias.v2i3.546.
- Liese, W. and T. K. H. Tang. 2015. Preservation and Drying of Bamboo. In: Liese, W. and M. Köhl (Edits.). Bamboo: The Plant and its Uses. Springer International Publishing. Cham, ZG, Switzerland. pp. 257-297.
- Londoño, X., G. C. Camayo, N. M. Riaño and Y. López. 2002. Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms. Bamboo Science and Culture: The Journal of the American Bamboo Society 16(1):18-31. [http://www.bamboo.org/publications/e107\\_files/downloads/ABSJournal-vol16.pdf#page=20](http://www.bamboo.org/publications/e107_files/downloads/ABSJournal-vol16.pdf#page=20). (15 de diciembre de 2022).
- Lv, H., C. Lian, B. Xu, X. Shu, J. Yang and B. Fei. 2022. Effects of microwave-assisted drying on the drying shrinkage and chemical properties of bamboo stems. Industrial Crops and Products 187:115547. Doi: 10.1016/j.indcrop.2022.115547.
- Lv, H., M. Chen, C. Lian, H. Li, .. and B. Fei. 2021. Distribution and migration of moisture in round bamboo in response to microwave drying. BioResources 16(3):5915-5925. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/distribution-and-migration-of-moisture-in-round-bamboo-in-response-to-microwave-drying/> (20 de enero de 2023).
- Lv, H., M. Chen, X. Ma, J. Li, ... and B. Fei. 2018b. Effects of different drying methods on bamboo's physical and mechanical properties. Forest Products Journal 68(4):445-451. Doi: 10.13073/FPJ-D-18-00009.
- Lv, H., X. Chen, X. Liu, C. Fang, ... and B. Fei. 2018a. The vacuum-assisted microwave drying of round bamboos: Drying kinetics, color and mechanical property. Materials Letters 223:159-162. Doi: 10.1016/j.matlet.2018.04.038.
- Mehta, P., N. Bhatt, G. Bassan and A. E. Kabeel. 2022. Performance improvement and advancement studies of mixed-mode solar thermal dryers: a review.

Environmental Science and Pollution Research 29(42):62822-62838. Doi: 10.1007/s11356-022-21736-3.

Montero, C. y C. Rozas. 2019. Estudio exploratorio para la caracterización de la tasa de secado de la madera de *Eucalyptus nitens*, aplicando modelos de regresión múltiple. Scientia Forestalis Piracicaba 47(121):105-113. Doi: 10.18671/scifor.v47n121.10.

Montoya A., J. A. y E. Jiménez A. 2006. Determinación de la curva de secado al aire libre, mediante modelación matemática y experimental de la *Guadua angustifolia* Kunth. Scientia et Technica 12(30):415-419. Doi: 10.22517/23447214.6593.

Morales-Pinzón, T., L. F. Durán y C. A. Alzate. 2012. Contenido de humedad en guadua rolliza preservada y secada en invernadero. Recursos Naturales y Ambiente (65-66):45-50.

<https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7065/Contenido%20de%20humedad%20en%20guadua%20rolliza%20preservada%20y%20secada%20en%20invernadero.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=En%20las%20muestras%20evaluadas%20de,entre%206%25%20y%2015%25.> (6 de diciembre de 2022).

Ong, K. S. 1996. Experimental investigation of a solar bamboo dryer. Drying Technology An International Journal 14(10):2411-2417. Doi: 10.1080/07373939608917213.

Ordóñez C., V. R., M. T. Mejía S. y G. M. Bárcenas P. 2013. Manual para la construcción sustentable con bambú. Comisión Nacional Forestal (Conafor). Zapopan, Jal., México. 94 p. [http://www.conafor.gob.mx:8080/biblioteca/descargar.aspx?articulo=506\\_](http://www.conafor.gob.mx:8080/biblioteca/descargar.aspx?articulo=506_) (15 de noviembre de 2022).

R Core Team. 2022. The R Project for Statistical Computing (Version 4.2.3). Vienna, W, Austria. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>. (15 de febrero de 2023).

Ramírez-Ojeda, G., G. Orozco-Gutiérrez, L. Á. Barrera-Guzmán and E. Ruiz-Sanchez. 2021. Edaphoclimatic diversity and ecological descriptors of *Guadua* bamboo species (Poaceae: Bambusoideae) in México. *International Journal of Agriculture, Environment and Bioresearch* 6(3):228-244. Doi: 10.35410/IJAEB.2021.5641.

Rezaei, M., M. Sefid, K. Almutairi, A. Mostafaeipour, ... and K. Techato. 2022. Investigating performance of a new design of forced convection solar dryer. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 50:101863. Doi: 10.1016/j.seta.2021.101863.

Ruiz-Sanchez, E., C. D. Tyrrell, P. Carrillo-Reyes and A. T. Nuño-Rubio. 2022. A striking new species of *Rhipidocladum* (Poaceae: Bambusoideae: Bambuseae: Arthrostylidiinae) with single, terminal-spikelet synflorescences, endemic to Jalisco, Mexico. *Plant Ecology and Evolution* 155(3):417-424. Doi: 10.5091/plecevo.86519.

Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda (Seduvi). 2017. NTC2017 Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de madera. *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*. 15 de diciembre de 2017. Ciudad de México, México. pp. 567-613. [https://paot.org.mx/centro/normas\\_a/2022/6.pdf](https://paot.org.mx/centro/normas_a/2022/6.pdf). (22 de febrero de 2023).

Simpson, W. T. 1991. Dry kiln operator's manual. United States Department of Agriculture and Forest Service. Madison, WIS, United States of America. 274 p. <https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/usda/ah188/ah188.htm>. (18 de mayo 2023).

Solargis. 2023. Global Solar Atlas. World Bank Group. <https://globalsolaratlas.info/map>. (15 de enero de 2023).

Tang, T. K. H., J. Welling, T. Ho and W. Liese. 2012. Investigation on optimisation of kiln drying for the bamboo species *Bambusa stenostachya*, *Dendrocalamus asper* and *Thyrsostachys siamensis*. *Bamboo Science and Culture: The Journal of the American Bamboo Society* 25(1):27-35.

<https://www.semanticscholar.org/paper/Investigation-on-optimisation-of-kiln-drying-for-Tang-Welling/d6fd5b445b94e3ebb48ec2205260082f301e1ee5>. (15 de enero de 2023).

Vetter, R. E., R. A. Sá Ribeiro, M. G. Sá Ribeiro and I. P. A. Miranda. 2015. Studies on drying of imperial bamboo. *European Journal of Wood and Wood Products* 73:411-414. Doi: 10.1007/s00107-015-0900-6.

Wang, X., L. Song, D. Cheng, X. Liang and B. Xu. 2019. Effects of saturated steam pretreatment on the drying quality of moso bamboo culms. *European Journal of Wood and Wood Products* 77:949-951. Doi: 10.1007/s00107-019-01421-y.

Yan, Y., B. H. Fei and S. Q. Liu. 2022. The relationship between moisture content and shrinkage strain in the process of bamboo air seasoning and cracking. *Drying Technology* 40(3):571-580. Doi: 10.1080/07373937.2020.1819307.

Yuan, J., Q. Chen and B. Fei. 2022. Different characteristics in the hygroscopicity of the graded hierarchical bamboo structure. *Industrial Crops and Products* 176(1):114333. Doi: 10.1016/j.indcrop.2021.114333.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.