

Medición indirecta de la madurez del culmo de guadua por medio de las vibraciones mecánicas

Andrés Felipe Duque Herrera¹;
Adolfo Lara Castro²;
Héctor Fabio Quintero Riaza³;
Edison Henao Castañeda⁴;
Mauricio Monroy Jaramillo⁵

El uso del parlante como sensor permite predecir la madurez de los culmos de guadua mediante métodos indirectos de determinación de la frecuencia natural en un ensayo de vibración libre. La frecuencia natural tiende a incrementarse con la madurez, pero en un momento dado empieza a disminuir.



Foto: Grupo de Investigación GATA

¹ Universidad Tecnológica de Pereira, La Julita, Pereira, Colombia. afdh@hotmail.com; ivan_lara88@hotmail.com²; hquinte@utp.edu.co³; edisonhenao@utp.edu.co⁴; mauriciomonroy@utp.edu.co⁵.

Resumen

Un esfuerzo importante de la industria maderera se centra en el desarrollo de ensayos robustos no destructivos para determinar las propiedades intrínsecas de la madera. En este trabajo se presenta un método indirecto para la determinación experimental de la madurez de los culmos de guadua a partir de un ensayo de vibración libre. En sistemas mecánicos, las vibraciones libres ocurren porque la energía cinética se convierte en energía potencial elástica debido a la deformación del sistema, y retorna a energía cinética repetidamente durante el movimiento. En el caso de la madera, la frecuencia natural se asocia con la rigidez propia del sistema que, a la vez, está directamente relacionada con las propiedades físico-mecánicas del culmo y estas con la madurez. En el ensayo experimental, después de un golpe sobre el culmo se captura la señal de vibración con dos sensores: un acelerómetro o un parlante; mediante la transformada rápida de Fourier se determina la frecuencia natural del culmo analizado. Los resultados obtenidos muestran que este procedimiento es viable, utilizando el parlante como sensor; en el caso del acelerómetro, se requiere más procesamiento de la señal para que sea de utilidad.

Palabras claves: *Guadua*; bambúes; métodos; transformada rápida de Fourier; propiedades de la madera; propiedades mecánicas; culmo; madurez.

Summary

Indirect measurement of maturity in culms of *Guadua angustifolia* using mechanical vibration signals. An important effort of the wood industry is focused on the development of robust non-destructive tests to predict intrinsic properties of wood. Basing on a free vibration test, an indirect method for experimental determination of culm maturity was developed. In mechanical systems, free vibrations occur because kinetic energy is converted into elastic potential energy due to deformation of the system, and it repeatedly changes back to kinetic energy during the movement. In the case of wood, the natural frequency is associated to the system rigidity which directly relates to the culm's physical and mechanical properties and those to the culm's maturity. In these experimental tests, after hitting a culm, the vibration signal was captured with two sensors: an accelerometer or a tiny speaker, and the natural frequency of the culm was determined using the fast Fourier transform (FFT). The results showed that the procedure using the speaker as sensor is viable; in the case of the accelerometer more signal processing is required.

Keywords: *Guadua*; bamboos; methods; fast Fourier Transform; wood properties; mechanical properties; culms; maturity.

Introducción

Guadua angustifolia Kunth es un importante recurso forestal de la biodiversidad colombiana. Esta especie de bambú se aprovecha por sus beneficios ambientales, económicos, sociales y culturales en las áreas donde se encuentra presente. La guadua es una especie forestal con buenas posibilidades económicas, ya que su utilización como mate-

ria prima en la construcción y en la industria permite reducir costos (Salas 2006). Asimismo, por ser una de las especies forestales nativas con mayor número de aplicaciones gracias a sus excelentes propiedades físico-mecánicas, la guadua tiene un impacto socioeconómico muy significativo en Colombia (Camargo 2006). El buen aprovechamiento de la especie depende, en gran parte,

de los métodos utilizados para su recolección; por ello, la adopción de nuevas herramientas que permitan tecnificar el manejo de la especie es de necesidad prioritaria.

Dada su capacidad de propagación, rápido crecimiento, utilidad y tradición de uso, así como sus características benéficas para el medio ambiente y su enorme potencial para la construcción, elaboración de

muebles, artesanías, fabricación de papel, pisos, modulares y combustible, la demanda y aceptación de la guadua por parte del sector productivo ha ido en aumento (Martínez et ál. 2005). En consecuencia, a medida que la industria de la guadua crece, se incrementa también la demanda en términos de cantidad de materia prima y calidad de las propiedades físico-mecánicas. En buena medida, la calidad depende de los procesos de cosecha, secado y preservación, pero principalmente tiene que ver con características intrínsecas de los culmos de guadua.

Uno de los principales atributos de la guadua para aplicaciones estructurales es el corto tiempo que requiere para alcanzar la madurez, en comparación con otras maderas. Sin embargo, la determinación de la madurez es subjetiva y se basa en características externas, como la presencia de líquenes u hongos sobre la superficie del tallo, lo cual depende de las condiciones del sitio. En consecuencia, es posible que culmos dentro de un rango de edades muy amplio sean clasificados en el mismo grado de madurez.

Tradicionalmente la calidad de la madera de guadua se asocia con la medición de variables dendrométricas (longitud, altura, diámetro) y la observación visual de características superficiales (cantidad y distribución de los nodos, hongos y otros defectos). Dependiendo de estos parámetros, se asignan diferentes grados de calidad, con rangos amplios para las propiedades físicas. Aunque esta clasificación es suficiente para los usos en que la apariencia es la consideración primordial, es cuestionable para aplicaciones estructurales en las que la rigidez y la resistencia son las variables de mayor importancia.

Ya se han hecho estudios de las propiedades físico-mecánicas de la guadua, pero es poco lo que se sabe sobre la determinación de la edad óptima de corte. A diferencia de los

árboles, en lo que es posible relacionar la edad con las dimensiones dendrométricas del tallo (diámetro y altura), los culmos de guadua alcanzan su mayor dimensión en la madurez temprana (Salas 2006, Judziewicz et ál. 1999). Sin embargo, durante esos primeros meses sólo se observan pequeños cambios en los entrenudos como resultado de la maduración meristemática (Liese y Weiner 1996).

Medición de la madurez mediante vibraciones y señales acústicas

La medición indirecta de la madurez mediante el análisis de vibraciones y señales acústicas se ha utilizado con éxito en frutos (Valente y Ferrandis 2003, Hernández et ál. 2005) y en maderas (Ross y Pellerin 1985, Wang et ál. 2001). Uno de los ensayos más utilizados consiste en producir una perturbación en el elemento y medir la respuesta del sistema. En el ensayo se induce una onda de vibración o acústica dentro del material y se mide su respuesta característica; por ejemplo, se mide el tiempo de viaje y la forma de la onda para obtener el espectro de frecuencia. La onda puede ser inducida mediante un golpe con martillo y la respuesta se mide con un acelerómetro en contacto con la pieza evaluada. Otro método consiste en producir una onda de sonido dentro del material.

La determinación experimental de las frecuencias naturales, formas modales y relación de amortiguamiento se conoce como *análisis modal experimental*. El objetivo de este ensayo es medir la respuesta con suficiente precisión y extensión en los dominios de frecuencia y espacio, para realizar el análisis y determinar las propiedades dinámicas según los modos de vibración de la estructura. En este análisis se incorporan los conceptos de vibración mecánica, instrumentación, procesamiento de señales e identificación modal (Rao 2004).

La medición de la señal creada y la determinación de la magnitud de la respuesta se basan en la velocidad de la señal. El análisis de la señal se basa en los algoritmos de la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés), con la que se obtiene la función de la respuesta en frecuencia. Básicamente, la señal análoga del dominio del tiempo se convierte en una información discreta en el dominio de la frecuencia (Rao 2004). Para la medición experimental de la madurez de los culmos, se implementa un ensayo en el que se golpea al culmo con un martillo para producir una vibración en estado libre sobre el culmo. Mediante un acelerómetro o un parlante se capta la señal y se identifica la frecuencia natural del sistema mediante un análisis de frecuencia; este análisis se obtiene con los algoritmos de la FFT. Este tipo de análisis modal es ampliamente utilizado en la evaluación de estructuras civiles, fuselajes de avión, detección de fallas en tuberías, etc. Las pruebas del análisis modal en estructuras se han incrementado en los últimos años debidos a los avances en los computadores y en la instrumentación, lo que permite lograr ensayos de gran precisión (Rao 2004).

Este tipo de análisis permite: i) visualizar los modos de vibración de la estructura con el propósito de afinar los modelos físico y entender las propiedades dinámicas complejas de la estructura; ii) comparar el comportamiento de la vibración real de la estructura con los parámetros correspondientes predichos con un modelo teórico; iii) corregir o refinar los modelos teóricos; iv) predecir los efectos de modificaciones realizadas, o predecir las modificaciones que se requieren para cambiar el comportamiento de la estructura; v) predecir el comportamiento de la estructura conformada por dos o más componentes; vi) detectar daños u otros cambios en la integridad de la estructura en el ciclo de vida; vii)

identificar parámetros impredecibles como amortiguamiento, efectos de la fricción dinámica, fuerzas de excitación de fuentes desconocidas (Ewins 2001).

La frecuencia natural de un sistema es cuando se da una vibración libre; esta es una característica propia del sistema. La vibración libre ocurre cuando la energía almacenada se convierte en otra forma de energía de manera repetida. En sistemas mecánicos, la vibración libre puede ocurrir porque la energía cinética -manifestada como la velocidad de las masas- se convierte en energía potencial elástica debido a la deformación del sistema y retornar a energía cinética, repetidamente, durante el movimiento. La frecuencia natural se asocia con la rigidez propia del sistema que, en el caso de la madera, depende de las propiedades físico-mecánicas del culmo. Se entiende por rigidez la relación entre una fuerza aplicada y la deformación del sistema; la rigidez depende de la capacidad del sistema para almacenar energía potencial elástica (Silva 2000).

Descripción del ensayo

Para determinar la madurez del culmo por medio de vibraciones mecánicas, se impacta en el culmo de tal manera que ese golpe genere una vibración en el cuerpo del culmo, la cual se mide con el acelerómetro o con el parlante. Para generar el golpe se construyó un dispositivo con un martillo que se sujeta al culmo y que al soltarlo desde una inclinación determinada impacta al culmo y genera una vibración (Fig. 1).

En cada uno de los culmos se realizaron cinco ensayos con ambos sensores (parlante, acelerómetro), con el fin de garantizar la repetitividad de los datos en un mismo culmo. El número de culmos por secuencia fue variable pues algunos de ellos se cayeron o dañaron durante el proceso; la toma de datos se hizo únicamente con los culmos en pie y sin daños significativos que alteraran sus propiedades físico-mecánicas. La señal procesada mediante el acelerómetro o el parlante fue filtrada y amplificada

antes de almacenarse mediante un osciloscopio digital portátil. Con la ayuda de Matlab se obtuvo el valor de la frecuencia. Este valor fue el utilizado para comparar las diferentes secuencias, y sobre todo para verificar la hipótesis que las frecuencias varían con respecto a la edad del individuo y a sus características físicas.

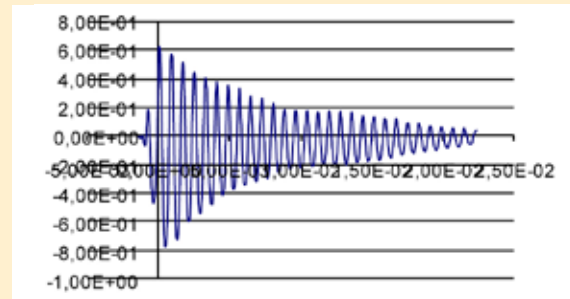
Los ensayos se realizaron en tres lugares diferentes: Jardín Botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira (6 secuencias), hacienda Nápoles (7 secuencias) y hacienda La Esmeralda (3 secuencias); ambas haciendas se localizan en el municipio de Montenegro, departamento del Quindío. Las secuencias de la Universidad y la Esmeralda constaron de más de cuatro culmos, en tanto que en Nápoles sólo se evaluó un culmo por secuencia debido a que estos guaduales habían sido aprovechados recientemente.

Resultados y discusión

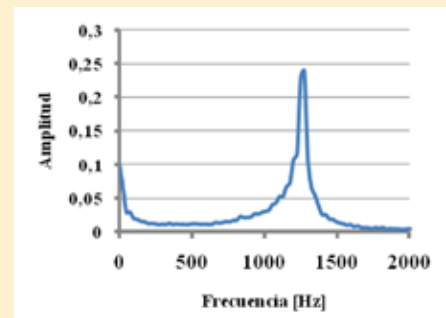
En la Fig. 2 se representa la forma de onda de un ensayo y el espectro



Figura 1. Impacto sobre el culmo



(a)



(b)

Figura 2. Onda característica (a) y espectro de frecuencia (b) del culmo No. 1, secuencia 3, evaluado en la Hacienda Nápoles

Cuadro 1. Frecuencias naturales encontradas con el sensor parlante en la secuencia 3 de la Hacienda Nápoles

Culmo no.	Frecuencia (Hz)					Media	Desv.
	P1	P2	P3	P4	P5		
1	1250	1275	1275	1275	1275	1270	11,18
2	1299	1299	1299	1299	1299	1299	0
3	1373	1373	1373	1373	1370	1372	1,34
4	1765	1765	1765	1765	1765	1765	0
5	1905	1905	1905	1905	1905	1905	0
6	1808	1808	1808	1808	1808	1808	0

Cuadro 2. Frecuencias naturales encontradas con el sensor parlante en la secuencia 3 de la Hacienda La Esmeralda

Culmo no.	Frecuencia (Hz)					Media	Desv.
	P1	P2	P3	P4	P5		
1	903,8	903,8	903,8	903,8	903,8	903,8	0
2	1075	1075	1075	1075	1075	1075	0
3	1114	1114	1114	1114	1114	1114	0
4	1075	1075	1075	1075	1075	1075	0
5	1172	1172	1172	1172	1172	1172	0
6	1490	1490	1490	1490	1490	1490	0
7	1685	1685	1685	1685	1685	1685	0

de frecuencia obtenida mediante la FFT. En los ensayos con un mismo espécimen se logró una alta repetitividad de los resultados, en tanto que en los ensayos con diferentes individuos, la forma de onda fue muy similar y, por ende, el espectro de frecuencia lo fue también. Al utilizar el parlante como sensor, el espectro de frecuencia mostró un valor pico para cada culmo a una frecuencia $f = 1275$ Hz (Fig.

2b). Este valor pico en el espectro de frecuencia permite identificar con precisión la frecuencia natural característica. En los Cuadros 1 y 2 se presentan los resultados de frecuencia natural obtenidos en dos secuencias de dos sitios diferentes. Para cada culmo se realizaron cinco pruebas (P1 a P5); la numeración de los culmos corresponde al nivel de madurez de los mismos, siendo el no. 1 el culmo menos

maduro. En las dos secuencias estudiadas se observó una tendencia al incremento de la frecuencia natural con la madurez. Sin embargo, en los resultados del Cuadro 1 es evidente que el último individuo tiene una menor frecuencia natural; el mismo comportamiento se dio en todas las secuencias analizadas de los tres sitios seleccionados.

En la Fig. 3 se presentan la señal obtenida y su espectro de frecuencia

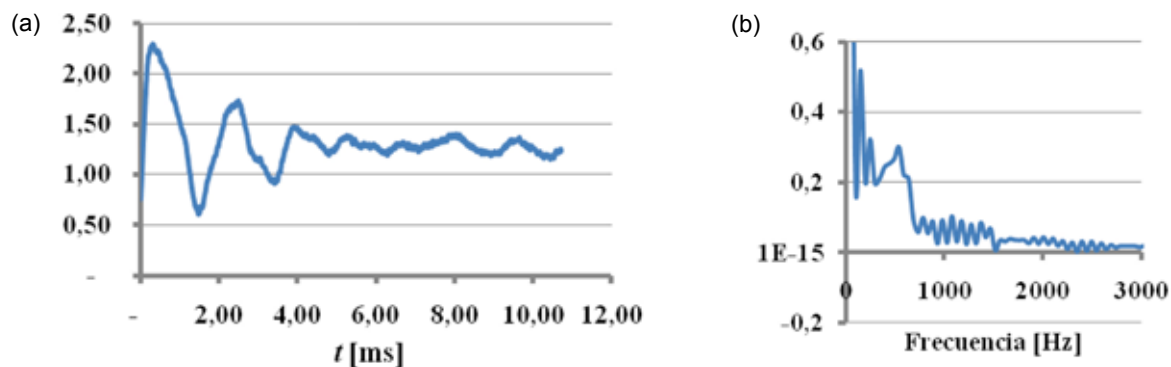


Figura 3. Onda característica (a) y espectro de frecuencia (b) del culmo No. 1, secuencia 23, determinadas mediante acelerómetro en la Hacienda Nápoles

al utilizar el acelerómetro. Como se observa en la Fig. 3b, el espectro de frecuencia de la vibración medida con el acelerómetro es complejo y no permite la identificación de un valor característico. A diferencia del espectro del sensor acústico, el espectro de frecuencia del acelerómetro no presenta un pico característico que permita asociarlo con la frecuencia natural del culmo. Por ello se consideró como valor característico el valor pico del espectro de frecuencia. En el Cuadro 3 se presentan los resultados obtenidos con dos secuencias de la hacienda Nápoles; es evidente la poca claridad de la caracterización de la frecuencia natural con este sensor; tampoco se nota una variación consistente entre la frecuencia natural y la madurez de los culmos analizados. La envolvente del espectro de frecuencia no permitió definir con claridad la frecuencia natural que se debe especificar debido a la existencia de varios picos.

Cuadro 3. Valores medios de frecuencia para las secuencias 5 y 14 de la Hacienda Nápoles

Culmo No.	Frecuencia (Hz)	
	Secuencia 5	Secuencia 14
Culmo 1	634	587,7
Culmo 2	391	537,7
Culmo 3	582	587,3
Culmo 4	439	668,5
Culmo 5	433	
Culmo 6	597	

Conclusiones

Los resultados demostraron que el uso del parlante como sensor permite predecir la madurez de los culmos de guadua mediante métodos indirectos de determinación de la frecuencia natural en un ensayo de vibración libre. La frecuencia natural tiende a incrementarse con la madurez, pero en un momento dado empieza a disminuir.

Puesto que la edad se relaciona con las propiedades físico-mecánicas de los culmos de guadua, mediante un *software* ya existente es posible utilizar la frecuencia natural para determinar la edad del culmo y su capacidad de uso. Dicho procedimiento permitirá tecnificar el proceso de selección y corte de la guadua que, hasta ahora, es bastante empírico.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a Colciencias por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación mediante el Proyecto código no. 1110452-21121; Contrato 442-1-2008.

Literatura citada

- Camargo, JC. 2006. Growth and productivity of the bamboo species *Guadua angustifolia* Kunth in the Coffee Region of Colombia. Ph.D. Thesis. Göttingen, Deutschland, Göttingen Universität. 205 p.
- Ewins, DJ. 2001. Modal analysis, experimental. In Braun, S; Ewins, DJ; Rao, SS. (Eds.). Encyclopedia of Vibrations. p. 805-813. Available at: http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=1873&VerticalID=0
- Hernández, A; Wang, J; Pereira, AG. 2005. Impulse response of pear fruit and its relation to Magness-Taylor firmness during storage. *Postharvest Biology and Technology* 35: 209-215.
- Judziewicz, EJ; Clark, LG; Londoño, X; Stern, M. 1999. American bamboos. Washington D.C., Smithsonian Institution press. 392 p.
- Martínez, HJ; Pinzón, N; Espinosa, D. 2005. La cadena de la guadua en Colombia: una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005. Bogotá, Colombia, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural / Observatorio Agrocadenas. 24 p.
- Liese, W; Weiner, G. 1996. Ageing of bamboo culms: A review. *Wood Science and Technology* 30: 77-89.
- Rao, SS. 2004. Mechanical vibration. 4 ed. New Jersey, USA, Pearson Prentice Hall. 1078 p.
- Ross, RJ; Pellerin, RF. 1985. NDE of Wood-based composites with longitudinal stress waves. *Forest Products Journal* 38(5): 39-45.
- Salas, E. 2006. Actualidad y futuro de la arquitectura de bambú en Colombia. Tesis Doctoral. Barcelona, España, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Silva, C. 2000. Vibration fundamentals and practice. 2 ed. Florida, USA, CRC Press. 925 p.
- Valente, M; Ferrandis, JY. 2003. Evaluation of textural properties of mango tissue by a near-field acoustic method. *Postharvest Biology and Technology* 29: 219-228.
- Wang, X; Ross, RJ; McClellan, M; Barbour, RJ; Erickson, JR; Forsman, JW; McGinnis, GD. 2001. Acoustic evaluation of wood quality in standing trees. Part I: Acoustic wave behavior. *Wood and Fiber Science* 33(4): 522-533.