

Determinación de la madurez de culmos de guadua mediante el análisis de frecuencia de señales de vibración y acústica

Olmedo Arias Pulgarin¹, Alexander Betancur², Héctor Fabio Quintero³

Resumen

Un esfuerzo importante de la industria de la madera se centra en el desarrollo de métodos robustos no destructivos para predecir las propiedades intrínsecas de la materia prima. En este trabajo se presenta un método experimental para la determinación de la madurez del culmo de *Guadua angustifolia*. La propuesta se basa en la determinación de la frecuencia natural y la atenuación de la señal en ensayos de vibración libre. Los resultados demuestran que es posible relacionar la madurez del culmo con la frecuencia natural obtenida con el ensayo de vibración libre.

Palabras clave: *Guadua angustifolia*; culmo; madurez; propiedades mecánicas; diseño experimental; modelos matemáticos; Colombia.

Abstract

Determination of maturity in bamboo culms by analyzing frequency of vibration and acoustic signals. A major effort of the wood industry focuses on the development of robust non-destructive methods to predict the intrinsic properties of the raw material. This paper presents an experimental method for determining maturity of bamboo culms. The method seeks to determine the natural frequency and signal attenuation on free vibration test. The results showed that culm maturity can be related with the low natural frequency on free vibration tests.

Keywords: *Guadua angustifolia*; culm; maturity; mechanical properties; experimental design; mathematical models; Colombia.

¹ Estudiante de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira. oarias@utp.edu.co

² Estudiante de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira. alexbeta44@hotmail.com

³ Profesor titular, Universidad Tecnológica de Pereira. hquinte@utp.edu.co

Introducción

El género de bambú nativo más importante de América tropical es la guadua, de la cual existen unas 30 especies distribuidas desde México hasta Argentina, en rangos de altitud que van desde el nivel del mar hasta los 2200 msnm (Moreno et al. 2006). Una de estas especies es *Guadua angustifolia* Kunth, un importante recurso forestal de la biodiversidad colombiana. El tallo se origina en el ápice de un rizoma y brota del suelo cubierto de hojas caulinares, con el diámetro máximo que tendrá de por vida. Dependiendo de las condiciones edáficas y de la época de brote, el tallo demora entre 4 y 6 meses para alcanzar su altura definitiva. El tallo es un cilindro hueco y adelgazado dividido en segmentos o internodos separados por diafragmas (nodos). Los internodos pueden alcanzar diámetros entre 10 y 14 cm y alturas entre 17 y 23 m (Moreno et al. 2006).

Las propiedades físico-mecánicas de esta especie le confieren características ideales para su uso en la construcción y en la industria de elaboración de muebles, modulares y combustibles, entre otros (Martínez et al. 2005). Por su bajo costo, genera buenos beneficios económicos (Salas 2006). Uno de los principales atributos de la guadua en aplicaciones estructurales, en comparación con otras maderas, es el corto tiempo que tarda en alcanzar la madurez.

Según Castaño y Moreno (2004), la calidad de la guadua se asocia con sus propiedades dendrométricas (longitud, altura, diámetro) y características superficiales (cantidad y distribución de los nodos, presencia de hongos y líquenes). Si la apariencia es la razón principal para determinar la calidad de un culmo, estas consideraciones son suficientes; sin embargo, son cuestionables si se requieren productos que ofrezcan condiciones de rigidez y resistencia.

Ambas características dependen del grado de madurez del culmo y, si no se aplica una medición real de estas propiedades, culmos dentro de un rango de edades muy amplio pueden ser clasificados en un mismo grado de madurez (Rodríguez y Camargo (2010). Por tal razón, es necesario contar con nuevas herramientas tecnológicas para el manejo adecuado de la especie.

El aprovechamiento de la guadua depende, en gran medida, de los métodos empleados para la recolección, secado y preservación de los culmos. Mediante la formulación de modelos matemáticos que permitan determinar las propiedades físico-mecánicas y el grado de madurez, es posible establecer la calidad de un culmo. En este trabajo se presenta un método experimental que cumple con tales expectativas. El método propuesto se basa en la determinación de la frecuencia natural en ensayos de vibración libre y en la atenuación de la señal (Ewins 2001).

La medición indirecta de la madurez mediante el análisis de vibraciones y señales acústicas se ha utilizado con éxito en frutas (Valente y Ferrandis 2003, Hernández et al. 2005), vegetales (Saltveit et al. 1985), en maderas (Ross y Pellerin 1985 y Wang et al. 2001) y en guadua (Duque et al. 2010). Inducir una onda de vibración dentro de un material y medir la respuesta característica de dicha perturbación constituye uno de los ensayos más usados. El método empleado para este ensayo consiste en producir una onda mediante un golpe con un objeto determinado y medir la vibración o sonido con un acelerómetro o sensor acústico, puesto en contacto con el elemento evaluado.

Entre las ventajas que este método ofrece es que no es destructivo y, sin embargo, permite determinar las propiedades idóneas de los culmos de guadua para su aprovechamiento en usos diversos. La industria productora de guadua

está bajo presión económica para maximizar el valor del producto procesado, el cual depende, en gran parte, de conocer cuándo el culmo tiene la madurez adecuada para obtener materia prima de la mejor calidad.

Equipos empleados

En este ensayo se utilizaron los siguientes equipos: martillo de impacto modal REF 780991, acelerómetro con ganancia 10 mV/G, tarjeta de adquisición de datos de la National Instruments NI 9234, computador portátil con la aplicación Data Acquisition de Matlab.

Medición de la madurez mediante el análisis de la señal de vibración en ensayo estático

Mediante este ensayo se busca medir la respuesta con suficiente precisión y extensión en los dominios de frecuencia y espacio, de manera que se pueda realizar el análisis y determinar las propiedades dinámicas según los modos de vibración de la estructura. En este análisis se consideraron los conceptos de vibración mecánica, instrumentación, procesamiento de señales e identificación modal (Rao 2004). El proceso experimental fue el siguiente: se golpea el culmo con un martillo para producir una vibración en estado libre; con un acelerómetro se capta la señal y se identifica la frecuencia natural del sistema con un análisis de frecuencia, a partir de los algoritmos de la FFT (Fast Fourier Transform, por sus siglas en inglés). El análisis modal es ampliamente utilizado en la evaluación de estructuras civiles, fuselajes de avión, detección de fallas en tuberías, etc.

La frecuencia natural de un sistema se observa en ensayos de vibración libre; esta 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



Figura 1. Prueba de impacto en el culmo de guadua



Figura 2. Adquisición de la señal del martillo de impacto y del acelerómetro

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, la deformación del sistema y la capacidad de almacenar energía potencial elástica (De Silva 2000).

Las mediciones se tomaron en dos lugares diferentes: finca Esmeralda y finca Yarima. En el primero se muestrearon cinco secuencias en una parcela; la prueba se repitió diez veces para cada culmo. En el

segundo se realizó un muestreo de seis secuencias en una parcela; la prueba se repitió cinco veces para cada culmo.

Para el ensayo se utilizó un martillo de impacto modal y se tomó la señal de la vibración mediante un acelerómetro (Figura 1). La señal del martillo de impacto y la del acelerómetro fueron adquiridas con una tarjeta de adquisición (Figura 2). Para el almacenamiento y procesamiento de las señales capturadas se utilizó la herramienta *Data Acquisition* de Matlab.

Resultados y discusión

Para el análisis del método propuesto se analizaron diferentes secuencias en dos parcelas diferentes. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de la señal obtenida en un culmo de la finca Yarima. La señal de vibración se presenta después de inducir el impacto en el culmo; esta señal tiene la forma de un ensayo característico de la vibración libre de un sistema. Por medio de la señal en el tiempo, se hizo el análisis de frecuencia utilizando la transformada rápida de Fourier. La Figura 4 muestra el espectro de frecuencia de la señal en el tiempo mostrada en la Figura 3; la respuesta muestra un pico muy alto que se corresponde con la frecuencia natural del culmo.

De los resultados obtenidos se observa una alta repetición de la frecuencia natural en los culmos de la secuencia. En el Cuadro 1 se muestran los valores de la frecuencia natural, f_n [Hz], obtenidos en las cinco pruebas de cada culmo de la secuencia analizada. La desviación estándar es muy baja, lo que respalda los resultados obtenidos.

La Figura 5 muestra la variación de la frecuencia natural en la secuencia analizada, el culmo 1 es el más joven y 6 el antiguo. Se observa que la frecuencia natural tiene una tendencia a aumentar hasta el culmo 5 y en el 6 empieza a disminuir la frecuencia natural.

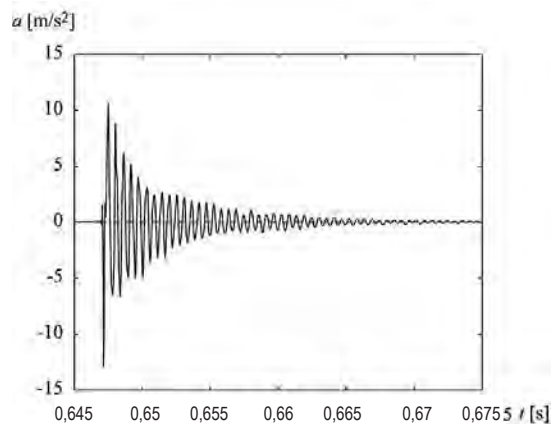


Figura 3 Señal del acelerómetro de un culmo de la finca Yarima

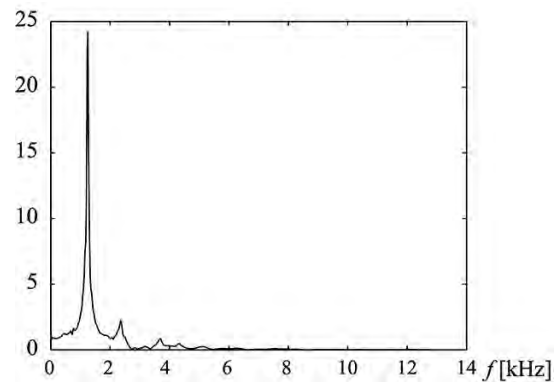


Figura 4. Espectro de frecuencia de un culmo de la finca Yarima

Cuadro 1. Medición de la frecuencia natural en los culmos de la finca Yarima

Prueba	Culmo					
	1	2	3	4	5	6
P1	1152	1691	1807	1891	1982	1355
P2	1152	1686	1802	1892	1977	1356
P3	1150	1699	1807	1896	1977	1357
P4	1156	1688	1803	1888	1970	1350
P5	1152	1691	1808	1893	1977	1358
Media	1152,4	1691	1805,4	1892	1976,6	1355,2
Desviación	2,19	0,99	0,54	2,92	4,28	3,11

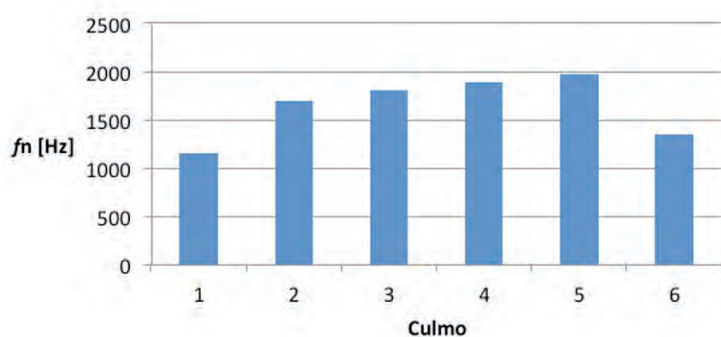


Figura 5 Variación de la frecuencia natural en una secuencia de la finca Yarima

Los análisis realizados en finca Esmeralda mostraron resultados muy similares.

Ante un ensayo de impacto, la respuesta del sistema bajo vibración libre es dada por una función con decremento de la amplitud de la vibración. Esta función es dada como una multiplicación de una función exponencial con exponente negativo y una función armónica:

$$x(t) = Ae^{-\zeta\omega_n t} \cos(\omega_d t - \varphi) \quad (1)$$

Donde:

las funciones $Ae^{-\zeta\omega_n t}$, y $-Ae^{-\zeta\omega_n t}$ son las curvas envolventes de la respuesta del sistema

A es una constante que depende de las condiciones iniciales y se relaciona con la amplitud de vibración inicial

ζ es la relación de amortiguamiento que determina el factor con que se reduce la amplitud de la vibración en cada ciclo
 ω_n es la frecuencia natural circular [rad/s] y se puede relacionar con la frecuencia natural del sistema

$\omega_n = 2\pi fn$. ω_d es conocida como la frecuencia natural circular amortiguada y determina la frecuencia de la vibración libre.

La frecuencia de la vibración libre es determinada mediante:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2)$$

En este estudio se propone implementar un procedimiento de identificación de la curva envolvente utilizando un cambio de variable. La dificultad de la identificación en la señal original se debe a la multiplicación de dos funciones no lineales. Por este motivo, se calcula el logaritmo natural del valor absoluto de la señal original:

$$X(t) = \ln|x(t)| = \ln A - \zeta \omega_n t + \ln|\cos(\omega_d t - \varphi)| \quad (3)$$

Es necesario utilizar el valor absoluto de la función armónica, ya que el logaritmo de un número negativo genera un número complejo. El método utilizado para la identificación de la función envolvente determina los máximos locales de la función $X(t)$ y el tiempo en que ocurren. Por medio de métodos de mínimos cuadrados se realiza la regresión lineal de la línea recta que contiene los valores máximos de

$X(t)$. En la Figura 6 se presenta el comportamiento de la función $X(t)$ con los datos obtenidos de un culmo de la finca Esmeralda y se muestra la línea recta del modelo lineal.

Una vez ajustada la recta de regresión a los datos del cambio de variable, X , de la señal de vibración, x , es importante disponer de una medida que mida la bondad del ajuste realizado para decir si el ajuste lineal es suficiente o si se deben buscar métodos alternativos. Como medida de ajuste se utiliza el coeficiente de determinación, definido como:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum (X_{est,i} - X_{dat,i})^2}{\sum (X_m - X_{dat,i})^2} \quad (4)$$

Donde:

$X_{est,i}$ es el valor estimado i del modelo lineal

$X_{dat,i}$ es el dato medido i , i varía entre 1 y N , siendo N el número de máximos locales de X

X_m es el valor medio de X_{dat} .

La frecuencia natural amortiguada $f_d = \omega_d / 2\pi$, se puede determinar midiéndolo el tiempo entre dos máximos locales de la función $x(t)$. Es importante recordar que los máximos locales de la $X(t)$ alternan valores máximos y mínimos locales de la función original, ya que se toma el valor absoluto de la función armónica, para convertir los mínimos de la función original $x(t)$ en máximos locales de $X(t)$. Con esta consideración se determinó la frecuencia f_d mediante:

$$\frac{1}{f_d} = T_d = \frac{t_{p,N} - t_{p,1}}{(N-1)/2} \quad (5)$$

Donde:

T_d es el periodo de oscilación de la vibración libre

N el número de máximos locales encontrados en la señal X

$t_{p,N}$ y $t_{p,1}$ son los tiempos en que ocurre, respectivamente, el máximo local N y el primero

La división por 2 es para contar solo los ciclos positivos de $x(t)$.

Una vez determinado el modelo lineal de los máximos locales de $X(t)$, con lo que se determina los valores $\ln(A)$, y $C_1 = \zeta \omega_n$, del modelo lineal, y $\omega_d = f_d$ se puede calcular ζ y ω_n mediante:

$$\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} = \omega_d = C_2 \quad (6)$$

$$\zeta \omega_n = C_1 \quad (7)$$

Elevando al cuadrado la primera ecuación y dividiendo por el cuadrado de la segunda, se obtiene:

$$\frac{\omega_n^2 (1 - \zeta^2)}{(\zeta \omega_n)^2} = \frac{1 - \zeta^2}{\zeta^2} = \frac{C_2^2}{C_1^2} = C_3 \quad (8)$$

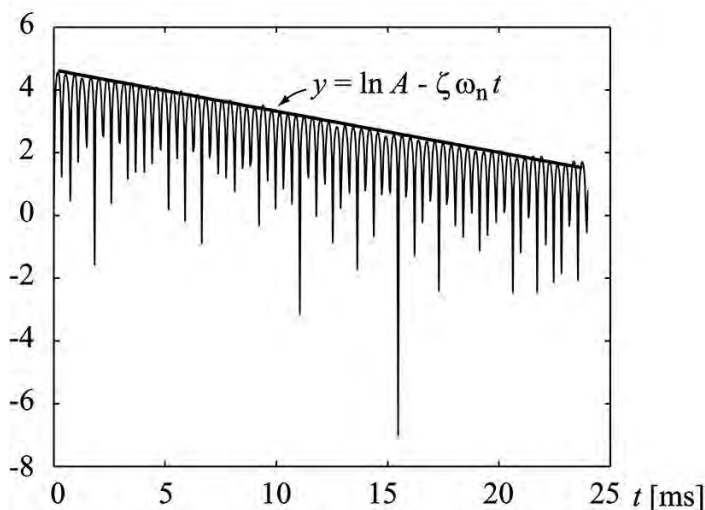


Figura 6. Estimación parámetros del modelo lineal

Con lo que se obtiene:

$$\zeta = \sqrt{\frac{1}{1+C_3}} \quad (9)$$

$$\omega_n = C_1 / \zeta \quad (10)$$

En la Figura 7 se muestran los datos de la señal original, x , y las envolventes obtenidas mediante el método de identificación de envolventes. Se observa que las envolventes obtenidas mediante el análisis de los resultados son muy cercanas a la curva exponencial que pasaría por cada uno de los picos de la señal de vibración.

Para decidir si se puede utilizar la variación de la relación de amortiguamiento como método alternativo para la determinación de la madurez del culmo de guadua se aplicó el análisis a los resultados obtenidos de la secuencia de la finca Esmeralda. En el Cuadro 2 se presentan los resultados obtenidos de la frecuencia natural, la relación de amortiguamiento, y el coeficiente de determinación en cada ensayo de los culmos de la secuencia analizada.


En la Figura 8 se muestra la variación del promedio de la relación de amortiguamiento equivalente para cada culmo de la secuencia analizada. En los resultados obtenidos, se observa que la desviación estandar es baja; sin embargo, la variación de la relación de amortiguamiento equivalente entre culmos no da a pie para establecer un método de determinación de la madurez basado en este parámetro.

La Figura 9 presenta el promedio de la variación de la frecuencia natural en la secuencia analizada. Como se ve, estos resultados son muy similares a los obtenidos mediante la transformada rápida de Fourier (Figura 5).

Conclusiones

Los resultados demostraron que es posible asociar la frecuencia natural del culmo, calculada mediante el espectro de frecuencia empleando la transformada rápida de Fourier o la obtención de la envolvente, a partir de la respuesta de la señal de vibración en un ensayo estático. Estos resultados permiten determinar la madurez del culmo de guadua mediante un método indirecto: la determinación de la frecuencia natural en un ensayo de vibración libre. 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.

El cálculo de la relación de amortiguamiento equivalente, a pesar de que arrojó resultados similares en los diferentes ensayos realizados en cada culmo, no mostró resultados concluyentes que permitan afirmar que este parámetro puede definir la madurez del culmo de guadua. 

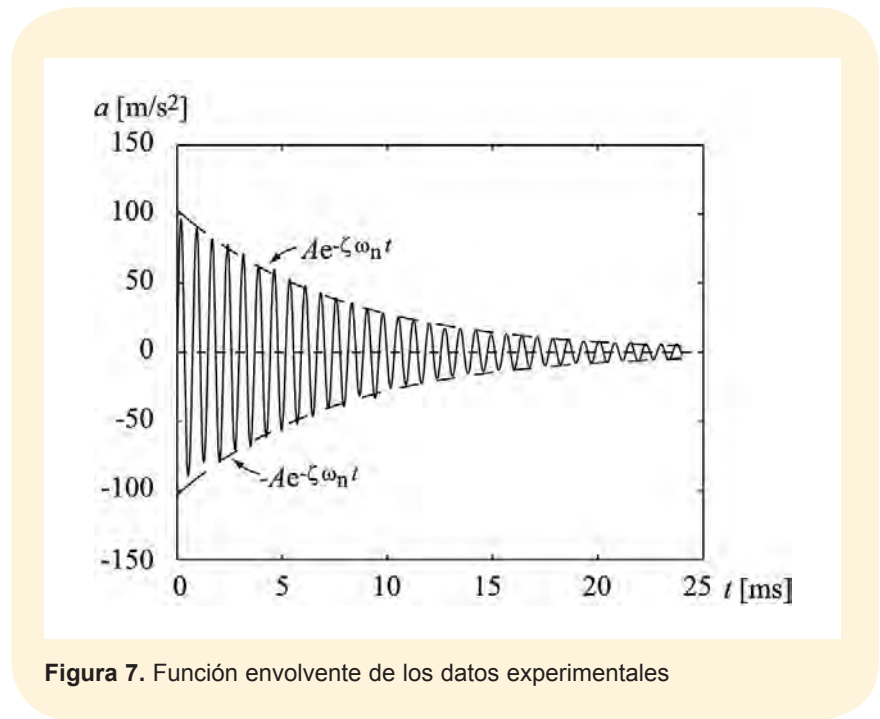


Figura 7. Función envolvente de los datos experimentales

Cuadro 2. Resultados del método envolvente aplicado a los culmos analizados en finca Esmeralda

Culmo	fn [Hz]		z		r
	s	s	s	s	
1	1085,4	1,77	0,0237	0,0008	0,97
2	1130,5	3,44	0,0177	0,0021	0,96
3	1189,7	25,41	0,0298	0,0036	0,92
4	1356	3,77	0,01812	0,002	0,98
5	974,1	8,43	0,0208	0,0019	0,94

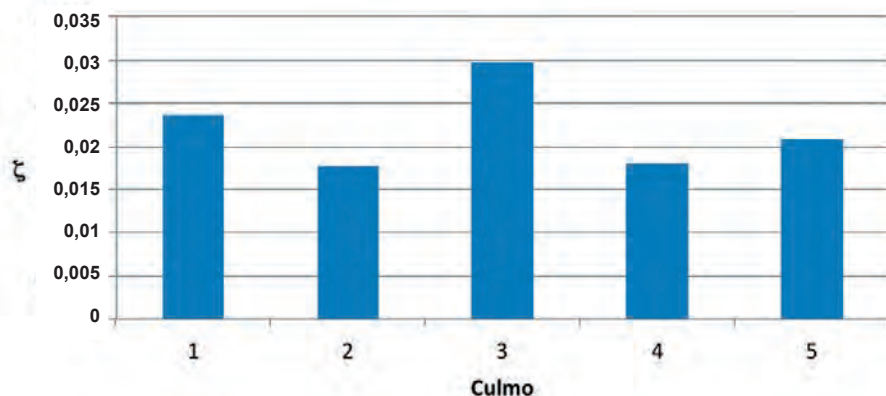


Figura 8. Variación de la relación de amortiguamiento en la secuencia de la finca Esmeralda

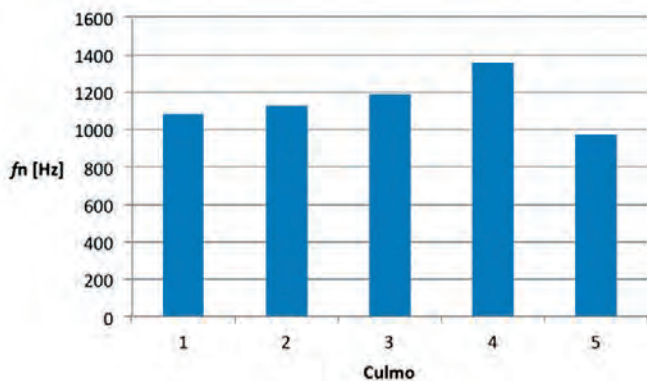


Figura 9. Variación de la frecuencia natural de la secuencia de la finca Esmeralda, método envolvente

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a Colciencias (Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia), por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación mediante el Proyecto “Tecnología para definir la madurez del culmo de *Guadua angustifolia*: una contribución al desarrollo forestal del Eje Cafetero colombiano” (Código No. 1110452-21121; Contrato 442-1-2008).

Literatura citada

- Castaño, F.; Moreno, R.D. 2004. Guadua para todos: cultivo y aprovechamiento. Bogotá, Colombia, Proyecto Manejo Sostenible de Bosques de Colombia. 190 p.
- De Silva, C. 2000. Vibration: Fundamentals and practice. Boca Ratón, USA, CRC Press.
- Duque, A.F.; Lara, A.; Quintero, H.F.; Henao, E.; Monroy, M. 2010. Medición indirecta de la madurez del culmo de guadua por medio de las vibraciones mecánicas. Recursos Naturales y Ambiente no 61:32-37.
- Ewins, D.J. 2001. Modal analysis, experimental. In: Braun, S; Ewins, DJ; Rao, S.S. (Eds.). Encyclopedia of Vibrations. Elsevier. p. 805-813. http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=1873&VerticalID=0
- Hernández, A.; Wang, J.; Pereira, A.G. 2005. Impulse response of pear fruit and its relation to Magness-Taylor firmness during storage, Postharvest Biology and Technology 35: 209-215.
- Martínez, H.J.; 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 Agro cadenas. 24 p.
- Moreno, L.; Osorio, L.; Trujillo, E. 2006. Estudio de las propiedades mecánicas de haces de fibra de *Guadua angustifolia*. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85202009>
- Rao, S. 2004. Mechanical vibrations. New Jersey, Prentice Hall.
- Rodríguez, J.A.; Camargo, J.C. 2010. Determinación en campo de la madurez de los culmos de *Guadua angustifolia* Kunth en el Eje Cafetero de Colombia. Revista Recursos Naturales y Ambiente N°61: 95-103.
- Ross, R.J.; Pellerin, R.F. 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. PhD thesis. Barcelona, España, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (ETSAB), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).
- Saltveit, M.E.; Upadhyaya, J.F.; Harpp, R.; Brien, O. 1985. Maturity determination of tomatoes using acoustic methods. ASAE Paper No 85-3536.
- Valente, M.; Ferrandis, J.Y. 2003. Evaluation of textural properties of mango tissue by a near-field acoustic method. Postharvest Biology and Technology 29: 219-228.
- Wang, X.; Ross, R.J.; McLellan, M.; Barbour, R.J.; Erickson, J.R.; Forsman, J.W.; McGinnis, G.D. 2001. Wood and fiber science 33(4): 522-533.