

# Efecto del tratamiento de higro-termo-fatiga en las características acústicas de la madera de *Pinus douglasiana* y *Quercus* spp.

*Javier Ramón Sotomayor-Castellanos y Germán Suárez Bejar*

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, UMSNH.

## Resumen

Se estudió el efecto del tratamiento de higro-termo-fatiga en las características acústicas de la madera de *Pinus douglasiana* y *Quercus* spp. Probetas sin tratamiento y con tratamiento se ensayaron en vibraciones transversales libre-libre y se calcularon los parámetros densidad, contenido de humedad, frecuencia natural, módulo de elasticidad en vibraciones transversales, módulo específico, decremento logarítmico, coeficiente de amortiguamiento y coeficiente acústico. Análisis estadísticos demostraron que la frecuencia natural está relacionada con los módulos de elasticidad y que el tratamiento de higro-termo-fatiga modificó significativamente la densidad y los módulos de elasticidad y específico.

**Palabras clave:** vibraciones transversales, frecuencia natural, módulo de elasticidad, decremento logarítmico, coeficiente de amortiguamiento, coeficiente acústico.

## Abstract

The influence of the higo-thermo-fatigue treatment in the acoustic characteristics of *Pinus douglasiana* and *Quercus* spp. wood was studied. Specimens without treatment and with treatment were tested in bending vibration free-free. Density, moisture content, natural frequency, modulus of elasticity in bending vibration, specific modulus, logarithmic decrement, damping coefficient and acoustic coefficient were computed. Statistical analyses demonstrated that natural frequency is related to the modulus of elasticity and that higo-thermo-fatigue treatment modified significantly the density and the elasticity and specific modulus.

**Key words:** bending vibration, natural frequency, modulus of elasticity, logarithmic decrement, damping coefficient, acoustic coefficient.

## Introducción

Durante los procesos de secado y de preservación, la madera es sometida a variaciones en su contenido de humedad y temperatura. Igualmente, a lo largo de su vida en servicio, los elementos estructurales están expuestos a la oscilación periódica de las condiciones ambientales de calor y humedad relativa del aire, las cuales pueden inducir una variación en su contenido de humedad. Este proceso puede ocasionar el deterioro de la madera y disminuir sus propiedades de resistencia mecánica (Tamarit-Urias y López-Torres, 2007).

Cuando la madera aserrada se encuentra en servicio y está expuesta a la intemperie, se deteriora. Particularmente su apariencia y calidad de superficie se modifican de tal forma que su apreciación estética disminuye. Entre otras soluciones, el tratamiento y el recubrimiento de su superficie han sido recientemente estudiados entre otros autores por Tamarit-Urias y López-Torres (2007).

El término intemperismo se refiere a la degradación física y química de la madera cuando es expuesta a condiciones de lluvia y de radiación solar. El mecanismo de deterioro del material depende del tipo y especie de madera y de la combinación de factores encontrados en las condiciones de servicio de la madera. Por ejemplo: la humedad, la luz solar, el calor y el frío, así como agentes biológicos (Williams, 2005).

A manera de simulación del efecto del intemperismo sobre la madera de los factores humedad y calor, esta investigación propone que se pueden someter probetas a ciclos de calor y de humidificación en condiciones de laboratorio, de tal forma que su contenido de humedad varíe en condiciones excesivas, por ejemplo, desde un estado anhidro, hasta un estado higo-saturado, en el cual el contenido de humedad de la madera es mayor al punto de saturación de la fibra. De aquí el nombre de tratamiento de higo-termo-fatiga: higo por la variación del contenido de humedad en la madera, térmico por la aplicación de calor hasta alcanzar temperaturas de 103 °C y fatiga por su carácter cíclico.

Los valores de temperatura y contenido de humedad de este tratamiento son más intensos que los valores reales a los que está expuesta la madera en condiciones de servicio en climas templados. No obstante, la idea de trabajar con valores extremos de contenido de humedad tiene por objeto simular y acelerar el proceso de envejecimiento de la madera y observar si existe un efecto inmediato, de pocos ciclos pero en condiciones extremas de calor y humidificación, sobre las características mecánicas de la madera.

Desde otra perspectiva, en condiciones de laboratorio la resistencia mecánica de la madera no es afectada de manera permanente si ésta es expuesta a periodos cortos y a temperaturas menores a 100 °C. Sin embargo, la resistencia puede disminuir de manera permanente si la madera se expone a una temperatura mayor de 65 °C, durante periodos de tiempo prolongado. Los factores principales en la modificación de la resistencia de la madera son la temperatura del tratamiento, el medio de transferencia de calor, el contenido de humedad de la madera, la especie y el volumen de la madera a tratar (Oltean *et al.*, 2007). Este fenómeno se observa para temperaturas superiores a los 100 °C. En tratamientos térmicos comprendidos en el intervalo que va de 0 a 100 °C, la madera sólida no presenta una influencia permanente en lo que respecta a sus propiedades mecánicas (Estevez y Pereira, 2009).

Experimentalmente se ha demostrado que el módulo de elasticidad dinámico y el coeficiente de amortiguamiento de la madera dependen de su composición química (Minato *et al.*, 2010), de tratamientos químicos (Brémaud *et al.*, 2010), de sus propiedades higroscópicas (Obataya *et al.*, 1998) y de las características anatómicas de la madera (Brancheriau *et al.*, 2006a y 2006b; Brémaud *et al.*, 2011; Roohnia *et al.* 2011).

Brémaud *et al.* (2011) compilaron datos de la bibliografía del módulo de elasticidad en vibraciones transversales y del coeficiente de amortiguamiento en pruebas con condiciones de temperatura de 20 a 25 °C y de humedad relativa del aire de 55 a 65 %, en un rango de frecuencias que va de 50 a 2000 Hz. Sus resultados son: para maderas de especies angiospermas con densidad promedio de 660 kg/m<sup>3</sup>, un módulo de elasticidad de 13.5 GPa y un coeficiente de amortiguamiento de 0.0081. Para maderas gimnospermas con densidad de 440 kg/m<sup>3</sup>, un módulo de elasticidad de 11.04 GPa y un coeficiente de amortiguamiento de 0.0071.

Obataya *et al.* (1998) determinaron en vibraciones transversales, para madera de *Picea sitchensis*, de densidad de 448 kg/m<sup>3</sup> y con un contenido de humedad de 12.7 %, módulos de elasticidad en promedio de 12.95 GPa y valores de coeficiente de amortiguamiento de 0.0071. Brancheriau *et al.* (2010) determinaron para madera de *Dalbergia* sp., valores promedio de coeficiente de amortiguamiento de 0.0038 en ensayos de vibraciones transversales con frecuencias de entre 400 y 1000 Hz. Sedik *et al.* (2010) determinaron para seis especies angiospermas, un módulo específico en vibraciones transversales libre-libre promedio de 6.91 GPa para maderas con densidad promedio de 310 kg/m<sup>3</sup>. Por su parte, Zhang *et al.* (2011), calcularon para tres especies angiospermas un módulo específico en un rango de 16 a 35 GPa y un coeficiente de amortiguamiento en un rango de 0.005 a 0.0095.

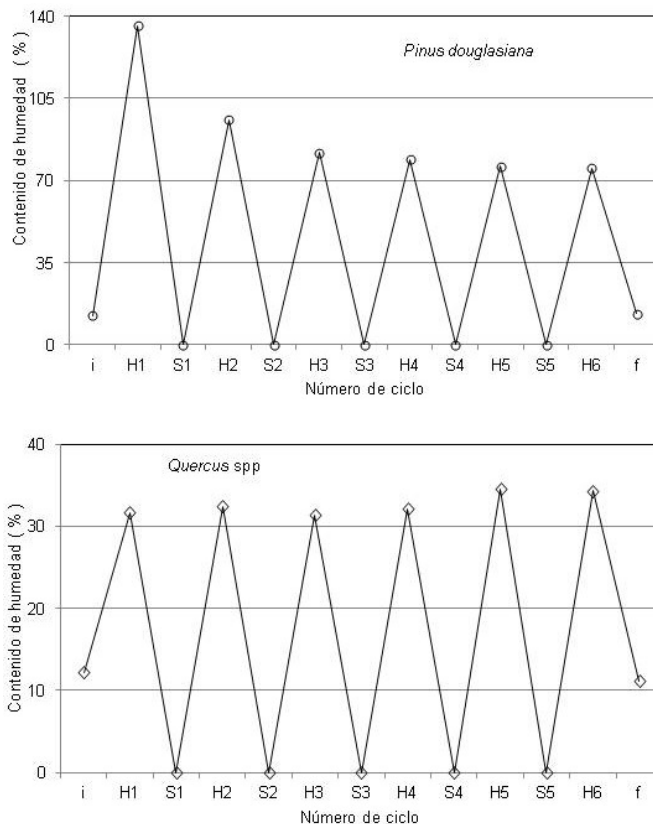


Figura 1. Ciclos de fatiga higo-térmica (Sotomayor-Castellanos y Suárez-Bejar, 2012).

## Objetivo

Determinar el efecto del tratamiento de fatiga higo-térmica en las características acústicas de las maderas de *Pinus douglasiana* y de *Quercus spp*.

## Métodos y materiales

El material experimental consistió en maderas de *Pinus douglasiana* y de *Quercus spp* recolectadas en Michoacán, México. Para las pruebas de vibraciones se emplearon 45 probetas de *P. douglasiana*: 30 para aplicar el tratamiento y 15 sin tratamiento; 50 probetas de *Quercus spp*: 30 para tratamiento y 20 sin tratamiento. Las probetas fueron recortadas del tronco de un árbol de cada especie de acuerdo a la metodología propuesta por Villaseñor Aguilar (2007). Las dimensiones normalizadas de las probetas fueron en promedio de 20 x

20 x 320 mm, orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal con respecto al plano leñoso. La madera estuvo libre de irregularidades de crecimiento y de madera de duramen, de acuerdo con la norma ISO (International Organization for Standardization, 1975).

La estrategia experimental consistió en someter a las probetas destinadas a tratamiento, a cinco períodos de secado y de hidratado en condiciones extremas, con el objeto de verificar experimentalmente el efecto del tratamiento sobre sus características físicas y mecánicas. El tratamiento consistió en secar las probetas durante 24 horas a una temperatura de 103 °C, hasta alcanzar un peso constante, es decir el estado anhidro de la madera. Para cada ciclo y después de realizar las mediciones de peso y dimensiones a cada una de las probetas, se procedió a su re-humidificación en agua durante un periodo de 48 horas a una temperatura ambiente de laboratorio de 23 °C, y así sucesivamente durante “N” ciclos de tratamiento. Este procedimiento se aplicó al mismo lote de probetas estudiado por Sotomayor-Castellanos y Suárez-Bejar (2012).

La Figura 1 explica los ciclos de variación de los valores del contenido de humedad en porcentaje. “i” es el valor inicial de contenido de humedad de la madera; H1, H2, ... son los valores del contenido de humedad de las probetas después de 48 horas de inmersión en agua; S1, S2, ... son los valores del contenido de humedad igual a cero después de cada ciclo de secado de 24 horas y “f” es el valor final. Al final del proceso de fatiga higo-térmica se realizaron pruebas de vibraciones transversales libre-libre, con carácter no destructivo.

La densidad ( $\rho_H$ ) de la madera se calculó con la relación peso/volumen al momento del ensayo de cada probeta con la fórmula:

$$\rho_H = \frac{W_H}{V} \quad (1)$$

Donde:

$\rho_H$  = Densidad de la madera ( $\text{kg/m}^3$ )

$W_H$  = Peso de la probeta (kg)

$V$  = Volumen de la probeta ( $\text{m}^3$ )

El contenido de humedad (H) de la madera se calculó como la proporción del peso de la probeta al momento del ensayo y el peso de la probeta en su estado anhidro, con la fórmula:

$$H = \frac{W_H - W_S}{W_S} \quad (2)$$

Donde:

H = Contenido de humedad de la madera (%)

$W_H$  = Peso de la probeta al momento del ensayo (kg)

$W_S$  = Peso de la probeta en estado anhidro (kg)

Las pruebas de vibraciones consistieron en poner en movimiento a la probeta en condición de apoyos libre-libre en sus puntos nodales correspondientes al primer modo de vibración y medir la frecuencia natural y el decremento logarítmico de las vibraciones. La condición libre-libre se logró sujetando la probeta a dos apoyos elásticos considerados con rigidez insignificante (Figura 2).

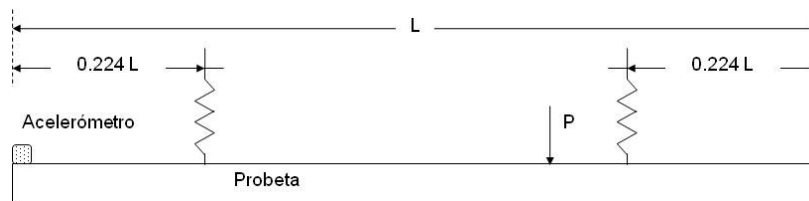


Figura 2. Configuración de las pruebas de vibraciones libre-libre.

Las vibraciones se lograron por medio de un impacto elástico (P) en dirección transversal a la dirección longitudinal (L) de la probeta empleando un martillo PCB Piezotronics®, modelo 086B05 SN 4160. Para medir el desplazamiento de la probeta, se colocó un acelerómetro marca PCB Piezotronics®, modelo 353B04 en un extremo de la pieza de madera (Figura 2).

Una vez la probeta en vibración, se midió la frecuencia natural a partir del diagrama del dominio de frecuencias calculado con un algoritmo de la transformada rápida de Fourier. Al mismo tiempo, se calculó el decremento logarítmico a partir de la señal del amortiguamiento de las vibraciones. La frecuencia y el decremento logarítmico fueron calculados por un analizador de señales dinámicas marca Brüel and Kjær®, modelo 986A0186, provisto con un programa de adquisición y tratamiento de datos marca Brüel and Kjær®, modelo DSA-104. La intensidad del impacto y la amplitud de las vibraciones fueron reguladas con ayuda del sistema de adquisición y tratamiento de datos. Un diagrama de la señal del amorti-

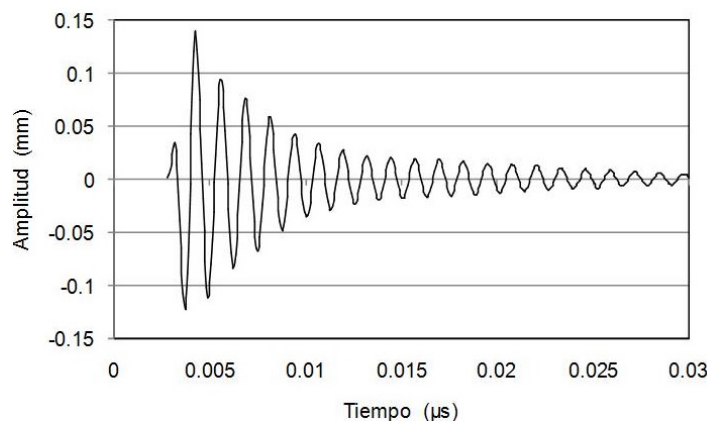


Figura 3. Señal del amortiguamiento de las vibraciones.

guamiento de las vibraciones de una probeta es presentado en la Figura 3 y un diagrama de la función respuesta en el dominio de frecuencias es presentado en la Figura 4.

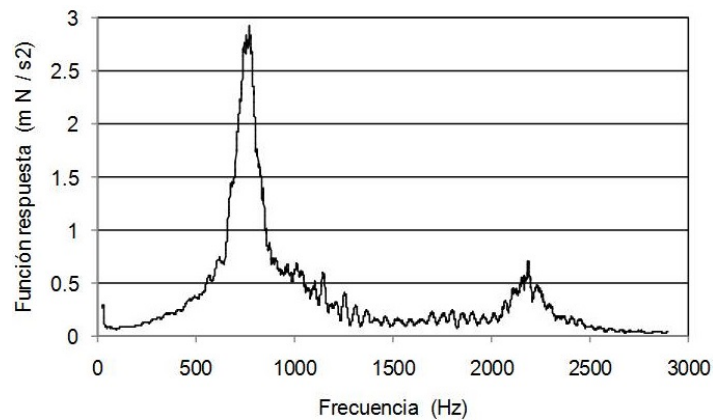


Figura 4. Función respuesta en el dominio de frecuencias.

El módulo de elasticidad en vibraciones se calculó con la fórmula (Pellerin y Ross, 2002):

$$E_{vt} = \frac{f_n^2 W_H L^3}{12.65 I g} \quad (3)$$

Donde:

$E_{vt}$  = Módulo de elasticidad de la madera (Pa)

$f_n$  = Frecuencia natural de la probeta (Hz)

$w_H$  = Peso de la probeta al momento del ensayo (N)

$L$  = Longitud de la probeta (m)

$I$  = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta ( $m^4$ )

$g$  = gravedad ( $m/s^2$ )

El módulo específico se calculó con la fórmula (Roohnia et al., 2011):

$$E_{\rho H} = \frac{E_{vt}}{\rho_H} \quad (4)$$

Donde:

$E_{\rho H}$  = Módulo específico ( $Pa \ m^3/kg$ )

$E_{vt}$  = Módulo de elasticidad (Pa)

$\rho_H$  = Densidad de la madera ( $kg/m^3$ )

El coeficiente acústico se calculó con la fórmula (Wegst, 2006):

$$K = \sqrt{\frac{E_{vt}}{\rho_H^3}} \quad (5)$$

Donde:

K = Coeficiente acústico (m<sup>4</sup>/s kg)

E<sub>vt</sub> = Módulo de elasticidad (Pa)

ρ<sub>H</sub> = Densidad de la madera (kg/m<sup>3</sup>)

<b>CUADRO 1</b>					
Características acústicas de la madera de <i>Pinus douglasiana</i> y <i>Quercus</i> spp.					
Parámetros	Símbolo	Unidades	$\bar{x}$	$\sigma$	CV
<i>Pinus douglasiana</i> sin Tratamiento					
Densidad	ρ <sub>H</sub>	(kg/cm <sup>3</sup> )	734	164	0.22
Contenido de humedad	H	(%)	13.17	0.40	0.03
Frecuencia natural	f <sub>n</sub>	(Hz)	931	46.19	0.05
Módulo de elasticidad	E <sub>vt</sub>	(MPa)	11,805	1421	0.12
Módulo específico	E <sub>ρH</sub>	(MPa)	22.26	2.14	0.10
Decremento logarítmico	δ	-	0.4395	0.1522	0.35
Coeficiente de amortiguamiento	Tan δ	X 10 <sup>-3</sup>	7.67	2.657	0.35
Coeficiente acústico	K	(M <sup>4</sup> /s kg)	6.06	2.502	0.41
<i>Pinus douglasiana</i> con Tratamiento					
Densidad	ρ <sub>H</sub>	(kg/cm <sup>3</sup> )	537	49.56	0.09
Contenido de humedad	H	(%)	12.59	0.44	0.03
Frecuencia natural	f <sub>n</sub>	(Hz)	903	56.07	0.06
Módulo de elasticidad	E <sub>vt</sub>	(MPa)	11,200	1,579	0.14
Módulo específico	E <sub>ρH</sub>	(MPa)	20.87	2.60	0.12
Decremento logarítmico	δ	-	0.4438	0.2509	0.57
Coeficiente de amortiguamiento	Tan δ	X 10 <sup>-3</sup>	7.75	4.38	0.57
Coeficiente acústico	K	(M <sup>4</sup> /s kg)	8.57	1.09	0.13

El decremento logarítmico se calculó con la fórmula (Raichel, 2006):



$$\delta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (6)$$

Donde:

$\delta$  = Decremento logarítmico

$A_n$  = Amplitud de la vibración en el ciclo n (m)

$A_{n+1}$  = Amplitud de la vibración en el ciclo n+1 (m)

<b>CUADRO 1 (cont.)</b> Características acústicas de la madera de <i>Pinus douglasiana</i> y <i>Quercus</i> spp.					
Parámetros	Símbolo	Unidades	$\bar{x}$	$\sigma$	CV
<i>Quercus</i> spp. Sin Tratamiento					
Densidad	$\rho_H$	(kg/cm <sup>3</sup> )	841	53	0.06
Contenido de humedad	H	(%)	11.09	0.36	0.03
Frecuencia natural	$f_n$	(Hz)	806	56	0.07
Módulo de elasticidad	$E_{vt}$	(MPa)	13,922	1,505	0.11
Módulo específico	$E_{\rho H}$	(MPa)	16.33	1.73	0.11
Decremento logarítmico	$\delta$	-	0.2522	0.1107	0.44
Coefficiente de amortiguamiento	Tan $\delta$	$\times 10^{-3}$	5.45	1.83	0.34
Coefficiente acústico	K	(M <sup>4</sup> /s kg)	6.10	2.55	0.42
<i>Quercus</i> spp. Con Tratamiento					
Densidad	$\rho_H$	(kg/cm <sup>3</sup> )	1008	322	0.32
Contenido de humedad	H	(%)	12.23	0.46	0.04
Frecuencia natural	$f_n$	(Hz)	786	65	0
Módulo de elasticidad	$E_{vt}$	(MPa)	14,246	2,856	0.20
Módulo específico	$E_{\rho H}$	(MPa)	17.58	2.87	0.16
Decremento logarítmico	$\delta$	-	0.3368	0.1133	0.34
Coefficiente de amortiguamiento	Tan $\delta$	$\times 10^{-3}$	5.88	1.98	0.34
Coefficiente acústico	K	(M <sup>4</sup> /s kg)	4.61	2.74	0.60

El coeficiente de amortiguamiento se calculó con la fórmula:

$$\tan \delta = \tan(\delta) \quad (7)$$

Donde:

$\tan \delta$  = Coeficiente de amortiguamiento

$\delta$  = Decremento logarítmico

## Resultados y discusión

El Cuadro 1 presenta para los dos grupos de probetas sin tratamiento (PST) y probetas con tratamiento (PCT), los valores de la media aritmética ( $\bar{x}$ ), la desviación estándar ( $\sigma$ ) y el coeficiente de variación (CV), para los parámetros densidad ( $\rho$ ), contenido de humedad (H), frecuencia natural ( $f_n$ ), módulo de elasticidad en vibraciones transversales ( $E_{vt}$ ), módulo específico ( $E_{\rho H}$ ), decremento logarítmico ( $\delta$ ), coeficiente de amortiguamiento ( $\tan \delta$ ) y coeficiente acústico (K).

Los valores promedio de los parámetros estudiados de *P. douglasiana* y *Quercus* spp (Cuadro 1) se situaron en rangos similares a los determinados por otros autores para especies diferentes y recopilados por Brémaud et al. (2011).

De acuerdo con la clasificación de propiedades mecánicas de maderas mexicanas propuesta por la TABLA FITECMA (Sotomayor-Castellanos, 2008), la densidad de la madera sin tratamiento de *P. douglasiana*, calificó como alta, y la densidad de *Quercus* spp como muy alta. Es importante hacer notar que las densidades presentadas en el Cuadro 1 y calculadas con la fórmula (1), son específicas para un contenido de humedad de entre 11 y 13 %, cuando la clasificación de la TABLA FITECMA se refiere a la densidad básica de la madera, la cual se define como la relación del peso de la madera en una condición de humedad anhidra y un volumen en condición saturada. Como consecuencia, la clasificación aquí propuesta puede ser mayor a la de la densidad básica de la madera.

Durante el tratamiento, la densidad y su CV de *P. douglasiana* disminuyeron. Además, durante el tratamiento de fatiga, se observó que el contenido de humedad de la madera o la cantidad de agua absorbida en cada ciclo disminuyó paulatinamente después de cada ciclo higo-térmico (Figura 1). En contraste, para la madera de *Quercus* spp la densidad y su CV aumentaron y durante el tratamiento, el contenido de humedad se acrecentó. De tal forma, que las densidades entre los grupos de probetas con tratamiento (CT) y sin tratamiento (ST), para ambas especies, presentaron una diferencia estadísticamente significativa (Cuadro 2). Estos resultados pueden ser también ocasionados por el hecho de que el grupo de probetas con tratamiento es comparado con un grupo independiente de madera, es decir, el grupo de probetas sin tratamiento. De aquí, que la variabilidad natural de la madera al interior de estas especies puede jugar un papel importante en los resultados.

Dado que el cálculo de los módulos de elasticidad depende del valor de la densidad correspondiente, la variación de la densidad ocasionada por el tratamiento de fatiga higo-térmica se reflejó en las diferencias numéricas y estadísticas entre los módulos de elas-

tividad y específicos de los grupos CT y ST, para las dos especies estudiadas (Cuadros 1 y 2).

<b>CUADRO 2</b>							
Diferencias entre medias de las características acústicas de la madera de <i>Pinus douglasiana</i> y <i>Quercus</i> spp.							
	$\rho_H$ CT	$f_n$ CT	$E_{vt}$ CT	$E_{\rho H}$ CT	$\delta$ ST	Tan $\delta$ ST	K CT
<i>Pinus douglasiana</i>							
$\rho_H$ ST	*						
$f_n$ ST		NS					
$E_{vt}$ ST			NS				
$E_{\rho H}$ ST				NS			
$\delta$ ST					NS		
Tan $\delta$ ST						NS	
K ST							*
<i>Quercus</i> spp							
$\rho_H$ ST	*						
$f_n$ ST		NS					
$E_{vt}$ ST			*				
$E_{\rho H}$ ST				*			
$\delta$ ST					NS		
Tan $\delta$ ST						NS	
K ST							NS
* Diferencia significativa para un 95 % de significancia; NS: Diferencia no significativa para un 95 % de significancia; CT: Con tratamiento; ST: Sin tratamiento.							

Los módulos de elasticidad correlacionaron con las frecuencias naturales con coeficientes  $R^2$  de 0.46 y 0.66 para *P. douglasiana*, CT y ST respectivamente, y para *Quercus* spp, los  $R^2$  fueron para CT: 0.83 y para ST: 0.75. Estos valores se incrementaron en las correlaciones entre los módulos específicos y las frecuencias naturales respectivas: para *P. douglasiana* CT: 0.94 y ST: 0.93, y para *Quercus* spp CT: 0.97 y ST: 0.96.

En el mismo contexto, los módulos de elasticidad y específicos de *P. douglasiana* no mostraron diferencias estadísticas significativas (Cuadro 2). De particular interés, entre los grupos de probetas CT y ST de *Quercus* spp, estos parámetros si mostraron diferencias es-

tadísticamente significativas (Cuadro 2), lo que demuestra que el tratamiento de fatiga higo-térmica modificó estas características acústicas.

Las propiedades acústicas de disipación de energía de la madera, representadas por el decremento logarítmico y el coeficiente de amortiguamiento, no mostraron diferencias estadísticamente significativas ocasionadas por el tratamiento aplicado (Cuadro 2). Sin embargo, el proceso higo-térmico modificó los valores promedio del decremento logarítmico y del coeficiente de amortiguamiento de la madera de *Quercus* spp (Cuadro 1). Para el caso de las frecuencias naturales medidas, estas no correlacionaron con los parámetros de amortiguamiento para los grupos CT y ST de *P. douglasiana* y *Quercus* spp.

El coeficiente acústico no varió significativamente para *Quercus* spp (Cuadro 2). Sin embargo, para *P. douglasiana*, este parámetro mostró una diferencia significativa, pues disminuyó 130 %, revelando así la influencia del tratamiento.

## Conclusiones

Los valores de la densidad, del módulo de elasticidad y del módulo específico de la madera de *P. douglasiana* y *Quercus* spp, fueron modificados por el tratamiento de fatiga higo-térmica. Para el caso de *P. douglasiana*, el coeficiente acústico fue alterado por el tratamiento. Para *Quercus* spp, no se observó un efecto importante. Asimismo, los parámetros decremento logarítmico y coeficiente de amortiguamiento no mostraron variación estadísticamente significativa por el tratamiento en ambas maderas.

La modificación de la densidad de la madera mostró ser el efecto más importante en el efecto del tratamiento de fatiga higo-térmica. Sin embargo, las diferencias observadas pueden ser atribuidas a la variabilidad natural de las características tecnológicas al interior de una misma especie. Igualmente, la frecuencia natural fue el parámetro que mejor correlacionó con los módulos de elasticidad en vibraciones y específico de ambas especies estudiadas.

En el contexto del efecto del tratamiento de higo-termo-fatiga en la madera de *P. douglasiana* y *Quercus* spp, la frecuencia natural se identificó como un parámetro independiente de las características decremento logarítmico y coeficiente de amortiguamiento.

## Agradecimientos

Al Dr. Ying Hei Chui Profesor de la Universidad de New Brunswick de Canadá, por facilitar el equipo para las pruebas de vibraciones. Al M.C. Saúl Antonio Hernández Maldonado estudiante de Doctorado en la Universidad de New Brunswick de Canadá, por la capacitación en el uso del equipo de vibraciones. A la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

## Referencias

- Brancheriau, L.; Baillères, H.; Dètienne, P.; Gril, J.; Kronland, R. 2006a. Key signal and wood anatomy parameters related to the acoustic quality of wood for xylophone-type percussion instruments. *Journal of Wood Science*. 52:270-273.
- Brancheriau, L.; Baillères, H.; Dètienne, P.; Kronland, R.; Metzger, B. 2006b. Classifying xylophone bar materials by perceptual, signal processing and wood anatomy analysis. *Annales of Forest Sciences*. 63:73-81.
- Brancheriau, L.; Kouchade, C.; Brémaud. 2010. Internal friction measurement of tropical species by various acoustic methods. *Journal of Wood Science*. 56:371-379.
- Brémaud, I.; Gril, J.; Thibaut, B. 2011. Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Science and Technology*. 45:735-754.
- Brémaud, I.; Minato, K.; Langbour, P.; Thibaut, B. 2010. Physico-chemical indicators of inter-specific variability in vibration damping of wood. *Annals of Forest Sciences*. 67:707, pp 1-8.
- Estevez, B.M.; Pereira, H.M. 2009. Wood Modification by Heat Treatment: A Review. *Bioresources*. 4(1):370-404.
- International Organization for Standardization. 1975. Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO). Disponible en: <http://www.iso.org/iso/home.html> (Consultado en Febrero, 2013).
- Minato, K.; Konaka, Y.; Bremaud, I.; Suzuki, S.; Obataya, E. 2010. Extractives of muirapiranga (*Brosimum* sp.) and its effects on the vibrational properties of wood. *Journal of Wood Science*. 56:41-46.
- Obataya, E.; Norimoto, M.; Gril, J. 1998. The effects of adsorbed water on dynamic mechanical properties of wood. *Polymer*. 39(14):3059-3064.
- Oltean, L.; Teischinger, A.; Hansmann, C. 2007. Influence of Temperature on Cracking and Mechanical Properties of Wood during Wood Drying – A Review. *Bioresources*. 2(4):789-811.
- Pellerin, R.F.; Ross, R.J. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA. 210 pp.
- Raichel, D.R. 2006. (Second edition). The science and applications of acoustics. Springer, USA. 660 pp.
- Roohnia, M.; Tajdini, A.; Manouchehri, N. 2011. Assessing wood in sounding boards considering the ratio of acoustical anisotropy. *NDT&E International*. 44:13-20.
- Sedik, Y.; Hamdan, S.; Jusoh, I.; Hasan, M. 2010. Acoustic Properties of Selected Tropical Wood Species. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 29:38-42.

- Sotomayor-Castellanos, J.R.; Suárez-Bejar, G. 2012. Tratamiento higro-térmico y pruebas de ultrasonido en la madera de *Pinus douglasiana* y de *Quercus* spp. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 8(1):23-32.
- Sotomayor-Castellanos, J.R. 2008. TABLA FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
- Tamarit-Urias, J.C.; López-Torres, J.L. 2007. Xilotecología de los principales árboles tropicales de México. Libro Técnico No. 3. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México. 261 pp.
- Villaseñor Aguilar, J.M. 2007. Comportamiento higroelástico de la madera de *Pinus douglasiana*. Evaluado mediante ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y flexión estática. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
- Wegst, U.G.K. 2006. Wood for sound. *American Journal of Botany*. 93(10):1439-48.
- Williams, R.S. 2005. Weathering of Wood. In: Rowell, R.M. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. CRC Press. USA.
- Zhang, T.; Bai, S-L.; Bardet, S.; Alméras, T.; Thibaut, B.; Beauchêne, J. 2011. Radial variations of vibrational properties of three tropical woods. *Journal of Wood Science*. 57:377-386.