

Módulo dinámico de la madera de cinco especies mexicanas expuestas al fuego

Javier Ramón Sotomayor Castellanos

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
madera999@yahoo.com

RESUMEN

*El objetivo de la investigación fue comparar la densidad aparente, la frecuencia de vibración y el módulo dinámico de la madera antes y después de ser expuesta al fuego. Se configuró un ensayo de resistencia al fuego y se realizaron pruebas de vibraciones transversales antes y después de exponer al fuego probetas de madera de cinco especies mexicanas. La densidad y el módulo dinámico de *T. rosea*, *A. inermis*, *J. pyriformis*, *Quercus spp.* y *C. elaeagnoides* disminuyeron después de ser sometidas al fuego. Los resultados se limitan al caso de estudio y en condiciones de laboratorio similares a los de esta investigación.*

PALABRAS CLAVE

Densidad de la madera, frecuencia de vibración, resistencia al fuego.

ABSTRACT

*The objective of the research was to compare the apparent density, the vibration frequency and the dynamic modulus of the wood before and after being exposed to fire. A fire resistance test was performed and transversal-vibration tests were performed before and after exposing to wood fire samples of five Mexican species. The density and dynamic modulus of *T. rosea*, *A. inermis*, *J. pyriformis*, *Quercus spp.* and *C. elaeagnoides* decreased after being subjected to fire. The results are limited to the case study and in laboratory conditions similar to those of this investigation.*

KEYWORDS

Density of wood, vibration frequency, fire resistance.

INTRODUCCIÓN

La madera es un material combustible. Debido a lo cual el diseño y la ingeniería de artículos y construcciones con madera necesitan proporcionar al usuario seguridad en cuanto a la respuesta del material cuando es expuesto al fuego.¹ La madera es inflamable en secciones delgadas pero, en espesores de sección mayores que 0.12 m, produce una capa de carbón que proporciona protección a la sección transversal de vigas y columnas en caso de incendios severos.²

No obstante que es difícil de aplicar resultados experimentales producidos en condiciones de laboratorio en la conformación de criterios de seguridad en caso de incendio, hay evidencia empírica que en los incendios de salas, la carbonización de los miembros de madera que no tienen huecos o juntas, es similar en magnitud a los valores obtenidos de los ensayos de resistencia al fuego.³

Este escenario se acompaña de dos circunstancias: por una parte, las pruebas de resistencia al fuego son onerosas y difíciles de implementar.⁴ Por otra, es difícil de predecir el comportamiento en condiciones reales de incendio a partir de resultados de experimentos realizados en laboratorio. Empero, estudios comparativos entre la respuesta de diferentes especies, ensayadas en condiciones controladas de laboratorio, son una alternativa para proporcionar información que oriente los criterios de diseño y cálculo ingenieril.⁵ Así, la evaluación del efecto del fuego en las características mecánicas en la madera es un tema que ha interesado a investigadores.^{6,7} Una perspectiva contemporánea de investigación en tecnología de la madera es la comparación de la respuesta de varias especies, manteniendo mínima la influencia de factores de variabilidad en los resultados. Igualmente, el diseño de experimentos originales y la configuración de pruebas *Ad-hoc* son una tendencia actual en ciencias de la madera.

Caso de interés para la caracterización mecánica de la madera son los métodos no destructivos que permiten evaluar probetas antes y después de ser sometidas a un tratamiento, en este caso, la exposición al fuego.⁸ Particularmente, las pruebas de vibraciones transversales han demostrado su vigencia para evaluar el módulo dinámico en muestras comunes de madera antes y después de tratamientos. En esta perspectiva, las principales variables a evaluar son la densidad aparente de la madera, la frecuencia de vibración y el módulo dinámico.⁹

La densidad de la madera es la característica empleada para predecir sus características mecánicas.¹⁰ La frecuencia natural de un sistema en vibración es el descriptor de la respuesta del movimiento lo que permite estimar sus propiedades dinámicas con una prueba de vibraciones.¹¹ Finalmente, el módulo dinámico derivado, es el parámetro que integra las características de resistencia elástica del material que conforma el sistema. En el caso del módulo dinámico de la madera, como componente principal de un sistema en movimiento, es además el parámetro necesario para el diseño y cálculo de estructuras sometidas a vibraciones cotidianas y acciones inusitadas como sismos.¹²

Estas propuestas son acotadas al idealizar la madera como un medio con densidad uniformemente repartida y macroscópicamente homogéneo. En el mismo contexto, es necesario considerar que el contenido de humedad de la madera está distribuido espacialmente de manera uniforme en la geometría de la probeta.

Al ser expuesta una pieza de madera al fuego, aparece como resultado del fenómeno de combustión una pérdida de masa.^{13,14} Lo cual redundará en la disminución de su densidad aparente. En el caso de que la pieza en cuestión sea sometida a vibraciones, su frecuencia disminuirá. Como consecuencia de la disminución de su masa y de su frecuencia, su módulo dinámico igualmente se reducirá. Esta hipótesis de trabajo puede ser verificada si se comparan estas características en probetas de madera con dimensiones similares, pero de diferentes especies. Así, los resultados de una prueba común de resistencia al

fuego permitirán tener una apreciación experimental y medible para comparar la respuesta del material.

El objetivo de la investigación fue comparar la densidad aparente, la frecuencia de vibración y el módulo dinámico de la madera antes y después de ser expuesta al fuego.

Para eso, se configuró un ensayo original de resistencia al fuego y se realizaron pruebas de vibraciones transversales antes y después de exponer al fuego probetas de madera de cinco especies angiospermas. Las maderas en estudio fueron: *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC., *Andira inermis* (W. Wright) DC., *Juglans pyriformis* Liebm., *Quercus* spp. y *Cordia elaeagnoides* (Ruiz & Pav.). Estas especies son endémicas de México y Centroamérica. Información acerca de sus propiedades tecnológicas están reportadas en la literatura.¹⁵⁻¹⁷

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recolectaron piezas de madera aserrada de las especies: *T. rosea*, *A. inermis*, *J. pyriformis*, *Quercus* spp. y *C. elaeagnoides*, en el Estado de Michoacán (+19°10'07" -101°53'59"). De cada especie se recortaron dos grupos de probetas. El primero se destinó a la determinación de la densidad aparente de la madera y su contenido de humedad. Sus dimensiones fueron 0,02 m x 0,02 m x 0,06 m y sus aristas se orientaron en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. Para cada probeta de este primer grupo, la densidad aparente de la madera al momento del ensayo se determinó de acuerdo con la norma ISO 13061-2:2014.¹⁸ El contenido de humedad de la madera se calculó por el método de diferencia de pesos según la norma ISO 13061-1:2014.¹⁹

La densidad aparente de la madera al momento del ensayo se calculó con la fórmula (1)¹⁸

$$\rho_{CH} = \left(\frac{P_s}{V_h} \right) \quad (1)$$

Donde:

ρ_{CH} = Densidad aparente (kg m³)

P_s = Peso de la probeta (kg)

V_s = Volumen de la probeta (m³)

El contenido de humedad de la madera se calculó con la fórmula (2)²⁰

$$CH = \left(\frac{P_h - P_s}{P_h} \right) \times 100 \quad (2)$$

Donde:

CH = Contenido de humedad (%)

P_h = Peso de la probeta en estado húmedo (kg)

P_s = Peso de la probeta en estado seco (kg)

El segundo grupo de probetas se asignó a las pruebas de vibraciones y de resistencia al fuego, empleando probetas con dimensiones de 0.02 m x 0.02 m x 0.40 m. Estas pruebas fueron acondicionadas para medir la frecuencia

natural de las probetas, antes y después de su exposición al fuego, así como la variación de su masa. De cada especie se recortaron al azar 35 probetas siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 3129:201221. Las probetas fueron almacenadas durante 24 meses en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C y una humedad relativa del aire de 65 %, hasta lograr un peso constante.

La estrategia experimental consistió en efectuar una primera serie de mediciones de la frecuencia antes de la exposición de la madera al fuego. Después de ejecutar las pruebas de comportamiento al fuego, se realizó una segunda serie de mediciones en las mismas probetas ya ensayadas.

PRUEBAS DE RESISTENCIA AL FUEGO

Las pruebas de resistencia al fuego siguieron el protocolo reportado por Sotomayor y Carrillo⁸. Se preparó un dispositivo de ensayo que consistió en un mechero de gas y dos soportes para las probetas (figura 1). Entre los soportes se posicionó la probeta de tal forma que la llama del mechero impactara en la dirección transversal de la probeta.

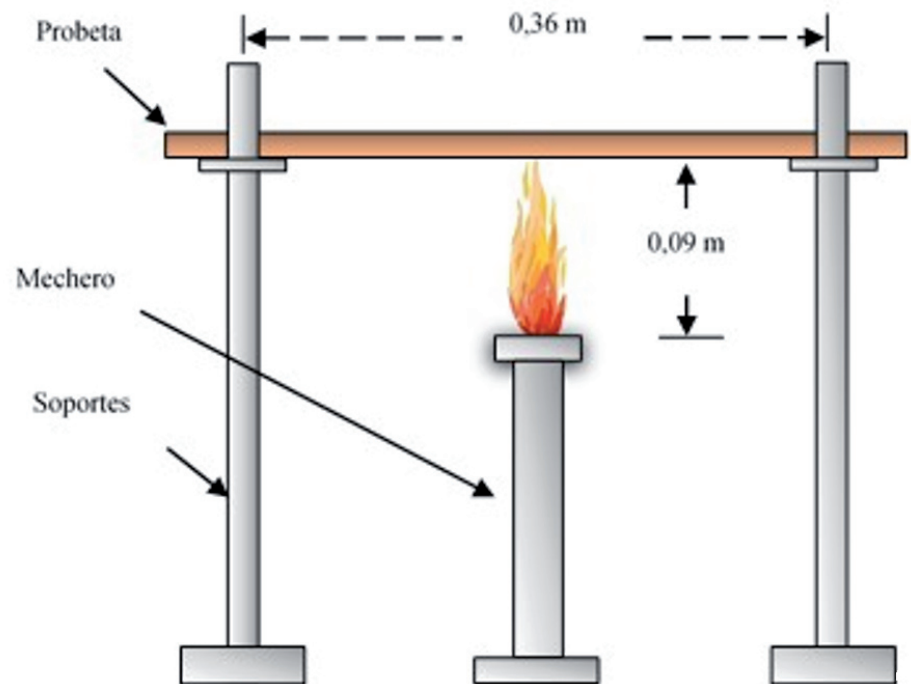


Fig.1 Dispositivo para las pruebas de comportamiento al fuego.⁸

La metodología implementada para las pruebas de comportamiento al fuego consistió en las siguientes etapas:

1. Se midieron el peso y las dimensiones de la probeta antes del tratamiento.
2. La probeta se posicionó en el dispositivo para las pruebas de comportamiento al fuego (figura 1). La orientación fue la dirección radial coincidiendo con el flujo vertical de la flama.

3. La probeta se expuso durante 2 minutos al fuego directo de la flama de un mechero de laboratorio tipo Meker-Fisher, con regulación de aire y de gas, quemador de 0.03 m de diámetro y temperatura máxima de 1300 °C.
4. Con un cronómetro, se midió el tiempo necesario para que apareciera la ignición en al menos las tres caras de la probeta expuestas a la flama.
5. La probeta se retiró de la flama y se paró su combustión en una cama de arena.
6. La masa de la zona carbonizada se retiró y se midió el peso de la probeta después del tratamiento.

PRUEBAS DE VIBRACIONES

Las pruebas de vibraciones transversales adaptaron el protocolo reportado por ²² el ensayo de vibraciones transversales consistió en aplicar un impacto elástico en la dirección tangencial de la probeta en el centro geométrico de su portada. La probeta estuvo apoyada en soportes simples, situados en los puntos nodales correspondientes al primer modo de vibración (figura 2). De esta forma, la probeta fue solicitada en flexión transversal. Para el registro de la vibración de la probeta se utilizó un sensor de movimiento de tipo piezoeléctrico. El sensor fue colocado a la mitad de la altura de la probeta y sobre un punto nodal y conectado al aparato Grindosonic® MK5, con el cual fue medida la frecuencia natural de vibración.

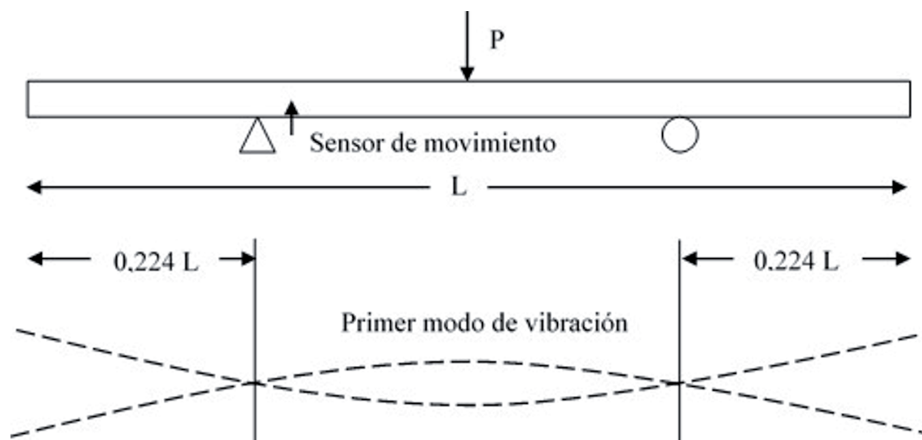


Fig 2. Prueba de vibraciones transversales y diagrama del movimiento de la probeta. P = Impacto dinámico; L = Longitud de la probeta²².

El módulo dinámico por vibraciones transversales se calculó con la fórmula (3)²³:

$$E_{vt} = \frac{4 \pi^2 L_{vt}^4 f_{vt}^2 \rho_{CH}}{m^4 r^2} \left(1 + \frac{r^2}{l_{vt}^2} K \right) \quad (3)$$

Donde:

E_{vt} = Módulo dinámico (MN m²)

L_{vt} = Largo de la probeta (m)

l_{vt} = Distancia entre apoyos (m)

f_{vt} = Frecuencia natural de la probeta (Hz)

ρ_{CH} = Densidad aparente de la madera a un contenido de humedad CH
(kg m³)

m, K = Constantes adimensionales (12,65, 49,48)

r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m²)

Con: “r = “ $\sqrt{(\frac{I}{A})}$ ”)

I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m⁴)

A = Área de la sección transversal de la probeta (m²)

La variación de la densidad se calculó con la fórmula (4):

$$\Delta\rho = \left(\frac{\rho_{CH_{at}} - \rho_{CH_{dt}}}{\rho_{CH_{at}}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Donde:

$\Delta\rho_{CH}$ = Variación de la densidad (%)

$\rho_{CH_{at}}$ = Densidad aparente de la probeta antes del tratamiento (kg m³)

$\rho_{CH_{dt}}$ = Densidad aparente de la probeta después del tratamiento (kg m³)

La variación de la frecuencia se calculó con la fórmula (5):

$$\Delta f_{vt} = \left(\frac{f_{vt_{at}} - f_{vt_{dt}}}{f_{vt_{at}}} \right) \times 100 \quad (5)$$

Donde:

Δf_{vt} = Variación de la frecuencia (%)

$f_{vt_{at}}$ = Frecuencia natural de la probeta antes del tratamiento (Hz)

$f_{vt_{dt}}$ = Frecuencia natural de la probeta después del tratamiento (Hz)

La variación del módulo dinámico se calculó con la fórmula (6):

$$\Delta E_{vt} = \left(\frac{E_{vt_{at}} - E_{vt_{dt}}}{E_{vt_{at}}} \right) \times 100 \quad (6)$$

Donde:

ΔE_{vt} = Variación del módulo dinámico (%)

$E_{vt_{at}}$ = Módulo dinámico antes del tratamiento (kg)

$E_{vt_{dt}}$ = Módulo dinámico después del tratamiento (kg)

DISEÑO EXPERIMENTAL

Para cada una de las cinco especies en estudio, las variables de respuesta fueron: la densidad aparente (ρ_{CH}), la frecuencia natural de vibración (f_{vt}) y el módulo dinámico (E_{vt}). Para cada probeta observada, el tratamiento de exposición al fuego se consideró el factor de variación y se contrastaron dos

grupos de muestras: la madera antes del tratamiento (AT) y la madera después del tratamiento (DT). Se calcularon los estadísticos descriptivos: media (\bar{x}), desviación estándar (σ) y coeficiente de variación en porciento (CV).

Se realizaron análisis de sesgo (S) y Curtosis (C). Una vez verificada la distribución normal de las muestras, se realizaron pruebas t de Student de diferencia de medias (\bar{x}) para un nivel de confiabilidad del 95%. Cuando no se confirmó la normalidad en la distribución de la muestras, se realizaron pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis de diferencia de medianas (\bar{x}) para un nivel de confiabilidad del 95%. La hipótesis nula $H_0: \bar{x}_{AT} - \bar{x}_{DT} = 0$ se contrastó con la hipótesis alterna $H_A: \bar{x}_{AT} \neq \bar{x}_{DT} = 0$ Para las pruebas no paramétricas las hipótesis fueron similares pero empleando las medianas.

Adicionalmente se calcularon las regresiones lineales ($y = ax \pm b$) y sus coeficientes de determinación (R^2) entre las frecuencias y los módulos dinámicos, todos para antes y después del tratamiento. Para cada una de las cinco especies, se realizaron 35 réplicas (probetas) antes del tratamiento y 35 réplicas después del tratamiento, empleando y comparando una a una la misma probeta.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Antes y después del tratamiento, la madera se acondicionó a un contenido de humedad de 11%. Se consideró que la variación en el contenido de humedad de la madera, no intervino de manera significativa en los resultados. La tabla I presenta los resultados para antes del tratamiento y después del tratamiento. La tabla II presenta los resultados de las pruebas de normalidad, de comparación de medias y de medianas.

Tabla I. Resultados para antes del tratamiento y después del tratamiento.							
		ρ_{CH} (kg m ³)		f_{vt} (Hz)	Δf_{vt} (%)	E_{vt} (MN m ²)	ΔE_{vt} (%)
<i>1 Tabebuia rosea</i>							
Antes del tratamiento	\bar{x}	613	-	578	-	11364	-
	σ	59	-	34	-	1617	-
	CV	9,6	-	5,9	-	14,2	-
Después del tratamiento	\bar{x}	581	5,2	475	17,8	7762	-32,6
	σ	59	-	22	-	937	-
	CV	10,2	-	4,6	-	12,2	-
<i>2 Andira inermis</i>							
Antes del tratamiento	\bar{x}	737	-	482	-	8528	-
	σ	37	-	39	-	1192	-
	CV	5,0	-	8,1	-	14,0	-
Después del tratamiento	\bar{x}	712	3,4	431	10,6	6816	-18,4
	σ	39	-	37	-	1022	-
	CV	5,5	-	8,6	-	15,0	-
<i>3 Juglans pyriformis</i>							
Antes del tratamiento	\bar{x}	773	-	516	-	9766	-

	σ	60	-	35	-	1729	-
	CV	7,7	-	6,8	-	17,7	-
Después del tratamiento	\bar{X}	746	3,4	466	9,7	7971	-18,4
	σ	61	-	32	-	1478	-
	CV	8,1	-	6,9	-	18,5	-
<i>4 Quercus spp.</i>							
Antes del tratamiento	\bar{X}	866	-	621	-	14023	-
	σ	54	-	40	-	2038	-
	CV	6,3	-	6,5	-	14,5	-
Después del tratamiento	\bar{X}	843	2,6	573	7,8	11908	-15,1
	σ	55	-	37	-	1641	-
	CV	6,5	-	6,4	-	13,8	-
<i>5 Cordia elaeagnoides</i>							
	\bar{X}	996	-	535	-	10337	-
	σ	97	-	35	-	1429	-
	CV	9,7	-	6,6	-	13,8	-
Después del tratamiento	\bar{X}	976	1,9	513	4,2	9479	-8,3
	σ	97	-	32	-	1217	-
	CV	10,0	-	6,3	-	12,8	-

ρ_{CH} = Densidad aparente; $\Delta\rho_{CH}$ = Variación de la densidad; f_{vt} = Frecuencia; Δf_{vt} = Variación de la frecuencia; E_{vt} = Módulo dinámico; ΔE_{vt} = Variación del módulo dinámico; \bar{X} = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento.

Tabla II. Resultados de las pruebas de normalidad, de comparación de medias y de medianas.

		Antes del tratamiento	Después del tratamiento	Valor P
<i>1 Tabebuia rosea</i>				
ρ_{CH}	S	-0,6289	-0,7100	-
	C	-0,2682	-0,4667	0,0269 * †
f_{vt}	S	-1,3998	-1,8862	-
	C	0,3885	0,5751	< 0,0001*†
E_{vt}	S	1,2611	1,8788	-
	C	-0,3311	-0,3909	< 0,0001*†
<i>2 Andira inermis</i>				
ρ_{CH}	S	-0,0998	-0,0439	-
	C	-1,0218	-0,1598	0,0061*†
f_{vt}	S	-3,3977	-2,3009	-
	C	2,9023	0,4170	< 0,0001*††
E_{vt}	S	-2,7338	-0,5593	-
	C	1,5726	0,5399	< 0,0001*††
<i>3 Juglans pyriformis</i>				

ρ_{CH}	S	-0,6014	-0,6630	-
	C	-0,4580	-0,5102	0,0686**†
f_{vt}	S	0,3648	0,0882	-
	C	-0,6938	-0,8921	<0,0001*†
E_{vt}	S	-0,1482	-0,0251	-
	C	-1,0586	-0,8925	<0,0001*†
<i>4 Quercus spp.</i>				
ρ_{CH}	S	-4,5993	-4,7229	-
	C	6,2573	6,4449	0,0188*††
f_{vt}	S	-1,5203	-1,2907	-
	C	0,9120	-0,0933	<0,0001*†
E_{vt}	S	0,3764	-0,2071	-
	C	-0,7949	-0,7586	<0,0001*†
<i>5 Cordia elaeagnoides</i>				
ρ_{CH}	S	-1,3709	-1,4006	-
	C	-0,9560	-0,9343	0,4082**†
f_{vt}	S	-1,7103	-1,7914	-
	C	-0,8042	-0,1393	0,0072*†
E_{vt}	S	-2,1611	-2,0454	-
	C	0,3829	0,1661	0,0002*††
S = Sesgo; C = Curtosis; * Existe una diferencia estadísticamente significativa; ** No existe una diferencia estadísticamente significativa; † = Prueba t de Student para medias; †† = Prueba de Kruskal-Wallis para medianas.				

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para *T. rosea* los valores del sesgo y curtosis para las variables ρ_{CH} , f_{vt} y E_{vt} se situaron al interior del intervalo -2 +2 confirmando la distribución normal de la distribución de estas muestras lo que permitió realizar pruebas de diferencia de medias. Así, los valores de $P < 0.05$ sugieren que si existió una diferencia estadísticamente significativa entre las tres variables para antes y después del tratamiento.

Para *A. inermis* los valores del sesgo y curtosis para ρ_{CH} se situaron al interior del intervalo -2 +2. No así para f_{vt} y E_{vt} lo que provocó analizar con pruebas de diferencia de medianas sus resultados. No obstante, los valores de $P < 0,05$ sugieren que no existió una diferencia significativa entre las tres variables para antes y después del tratamiento.

Para *J. pyriformis* las pruebas de normalidad fueron positivas. Sin embargo, el valor $P > 0.05$ para ρ_{CH} sugiere que no existió una diferencia significativa ocasionada por el tratamiento. Por otra parte, los valores de $P < 0.05$ para f_{vt} y E_{vt} sugieren que si existió una diferencia significativa para estas dos variables causadas por el tratamiento.

Para *Quercus spp.* los valores de sesgo y curtosis de ρ_{CH} se situaron fuera del intervalo -2 +2. Por lo tanto, las pruebas de diferencia de medianas proporcionaron un valor de $P < 0.05$ confirmando que no existió una diferencia

significativa a causa de la exposición de la madera al fuego. Ahora bien, para f_{vt} y E_{vt} el sesgo y la curtosis confirmaron la distribución normal de las muestras. Asimismo, los valores $P < 0.05$ para estas dos variables, sugieren que si existió una diferencia significativa.

Para *C. elaeagnoides* los valores de sesgo y curtosis de ρ_{CH} y f_{vt} se situaron al interior del intervalo $-2 +2$. En cambio, no lo fue así para E_{vt} . De aquí que los valores $P < 0.5$ lo fueron para f_{vt} y E_{vt} confirmando una diferencia significativa. Pero el valor $P > 0.5$ para ρ_{CH} sugiere que no existió una diferencia significativa originada por el tratamiento.

Estos resultados fortalecen uno de los paradigmas actuales en investigación en Ciencias, Tecnología e Ingeniería de la Madera. Debido a la diversidad en las propiedades intrínsecas del material, así como a la variación en su comportamiento cuando es estudiada experimentalmente, es necesario estudiar especie por especie, con un enfoque de caso por caso. Una vez teniendo observaciones integrantes y estadísticamente representativas, se pueden proponer tendencias en el comportamiento general para una especie en específico y/o por agrupamiento de varias de ellas que denoten una tendencia similar.²²

DENSIDAD

La densidad de la madera fue diferente para cada una de las cinco especies y sus magnitudes fueron similares a las reportadas en la bibliografía¹⁷. Así, la variación de la densidad, como resultado de su exposición al fuego, varió igualmente de manera particular a cada especie. Esta diferencia se describe en la figura 3 donde se muestran también las tendencias de las variaciones de la frecuencia (Δf_{vt}) y la del módulo dinámico (ΔE_{vt}) en función de la variación de la densidad ($\Delta \rho_{CH}$). En las figuras 3 y 4 los valores numéricos se repiten. De tal forma que por razones de escala, no se visualizan correctamente todos los puntos experimentales empleados en los cálculos

Para el caso de la densidad aparente, se observó que a mayor densidad, menor fue la disminución de la densidad. Es decir, a mayor densidad, menor pérdida de masa. Caso particular son *A. inermis* y *J. pyriformis*, especies que no obstante de tener una densidad diferente en 16,8%, convergieron en sus valores de Δf_{vt} y ΔE_{vt} . Esta tendencia es análoga a la de los resultados de Njankouo, Dotrepe y Franssen²⁴ quienes reportan para maderas tropicales, con una variación de densidades entre 500 kg m^{-3} y 1000 kg m^{-3} , que la velocidad de carbonizado de la madera disminuye proporcionalmente a su densidad.

FRECUENCIA

Para las cinco especies, la frecuencia aumentó proporcionalmente a la densidad (tabla I). Igualmente, su variación aumentó cuando se incrementó la variación de la densidad (figura 3). Estos resultados coinciden con los reportados por Wen, Kang y Park²⁵, quienes determinaron el módulo dinámico por vibraciones de *Cryptomeria* japónica, *Pinus koraiensis* y *Chamaecyparis obtusa* y observaron que la frecuencia natural de vibración disminuye a medida que la densidad de la madera aumenta.

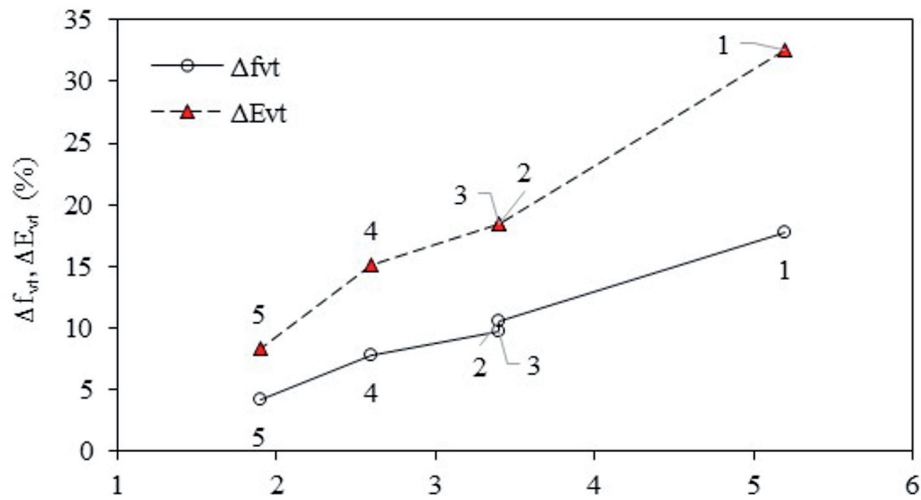


Fig 3. Tendencias de las variaciones de la frecuencia (Δf_{vt}) y del módulo dinámico (ΔE_{vt}) en función de la variación de la densidad ($\Delta \rho_{ch}$). La leyenda de los puntos corresponde a las especies listadas en la tabla I.

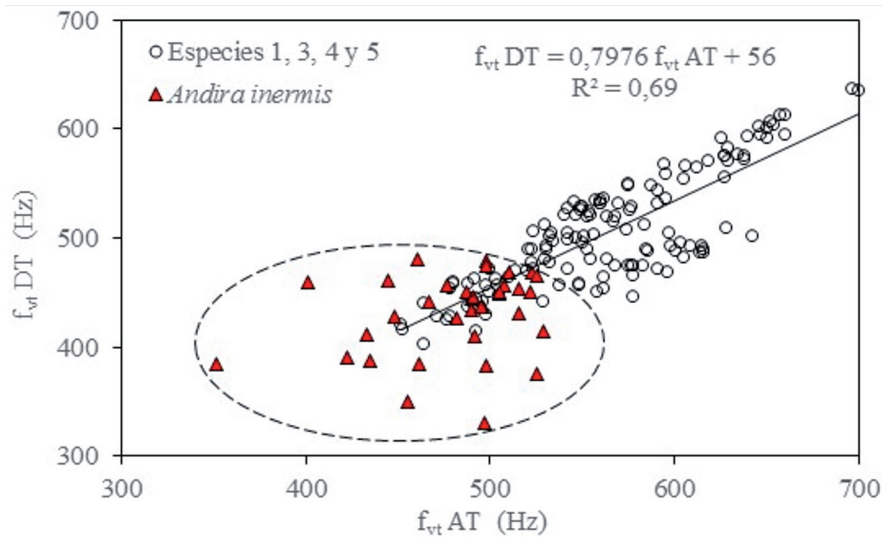


Fig 4. Regresión de las frecuencias después del tratamiento ($f_{vt} DT$) en función de las frecuencias antes del tratamiento ($f_{vt} AT$) y su coeficiente de determinación (R^2). La numeración de las especies se refiere a la tabla I.

Este resultado se explica por el hecho de que la frecuencia está implícitamente ligada al módulo dinámico de la madera, a la geometría de las probetas y a la cantidad de masa en vibración (Fórmula 3). Si se aumenta el largo de las probetas, manteniendo constante el módulo dinámico, la frecuencia aumentará.

La frecuencia antes del tratamiento presentó una fuerte correlación con la frecuencia después del tratamiento (figura 4). Resultado que sugiere que se puede predecir la frecuencia de una pieza de madera de pequeñas dimensiones y que ha sido modificada por el fuego, a partir de su frecuencia en estado íntegro.

Este resultado se observó para madera de *T. rosea*, *J. pyriformis*, *Quercus spp.* y *C. elaeagnoides*

Caso diferente fue *A. inermis*, especie que presentó una dispersión de variaciones de las frecuencias diferente (figura 4).

MÓDULO DINÁMICO

La figura 5 presenta las regresiones entre los módulos dinámicos después del tratamiento en función de los módulos dinámicos antes del tratamiento y sus coeficientes de determinación. Esto para *T. rosea*, *J. pyriformis*, *Quercus spp.* y *C. elaeagnoides* y con excepción de *A. inermis*, especie que mostró un comportamiento distinto.

Estas cuatro regresiones resultaron con valores altos del coeficiente de determinación. Proponiendo así que se puede predecir el módulo dinámico de una pieza de madera deteriorada por el fuego, a partir de su módulo dinámico antes de la exposición al fuego.

Para las cinco especies en estudio se observó una disminución del módulo dinámico después del tratamiento con respecto al módulo antes de la exposición al fuego. La variación del módulo dinámico (ΔE_{vt}) expresa esta reducción, la cual es proporcional a la densidad de la madera. A mayor densidad, menor la disminución del módulo dinámico después de la exposición al fuego.

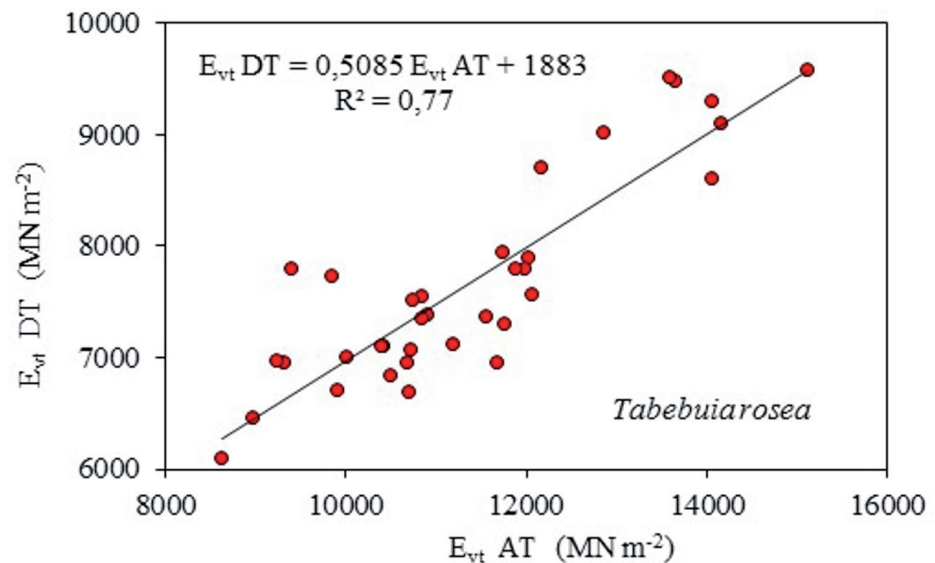


Fig 5a. Regresiones entre los módulos dinámicos (E_{vt}) después del tratamiento (DT) en función de los módulos dinámicos antes del tratamiento (AT), y sus coeficientes de determinación (R^2) (*Tabebuia rosea*).

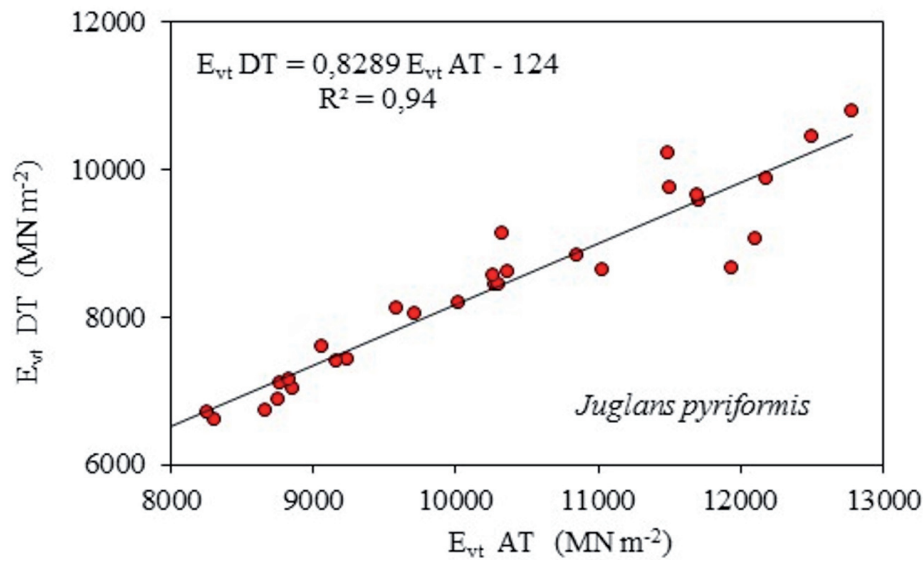


Fig 5b. Regresiones entre los módulos dinámicos (E_{vt}) después del tratamiento (DT) en función de los módulos dinámicos antes del tratamiento (AT), y sus coeficientes de determinación (R^2) (*Juglans pyriformis*).

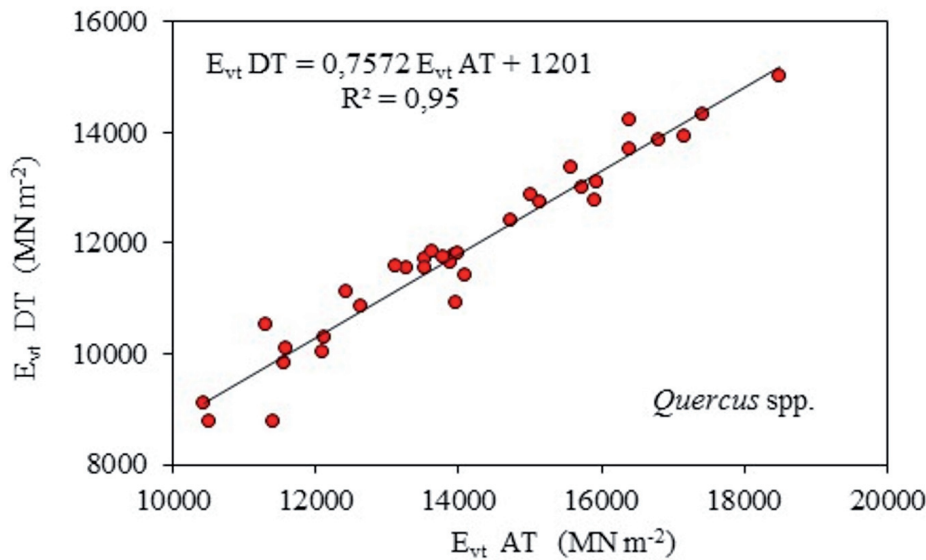


Fig 5c. Regresiones entre los módulos dinámicos (E_{vt}) después del tratamiento (DT) en función de los módulos dinámicos antes del tratamiento (AT), y sus coeficientes de determinación (R^2) (*Quercus spp.*).

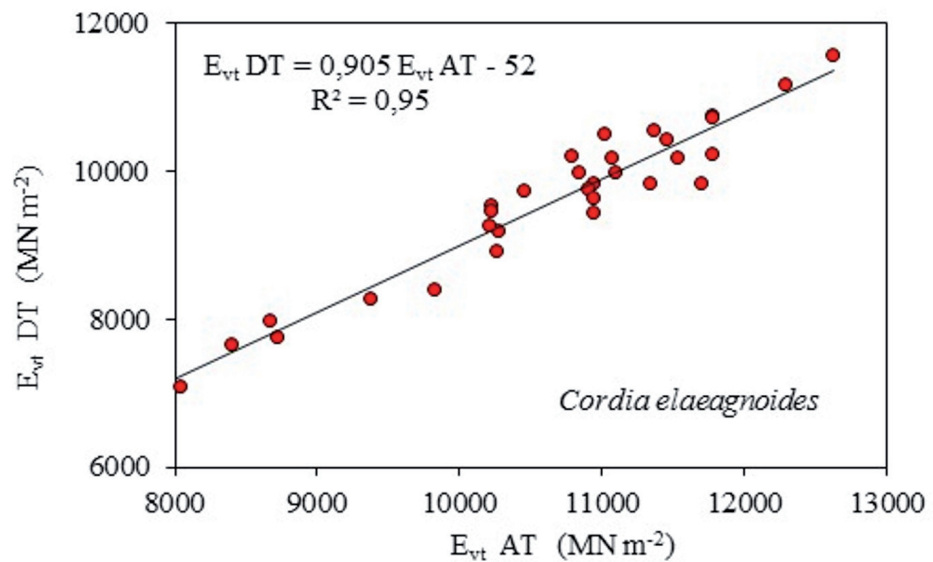


Fig 5d. Regresiones entre los módulos dinámicos (E_{vt}) después del tratamiento (DT) en función de los módulos dinámicos antes del tratamiento (AT), y sus coeficientes de determinación (R^2) (*Cordia elaeagnoides*).

CONCLUSIONES

Se determinaron la densidad aparente, la frecuencia natural y el módulo dinámico de madera antes y después de ser expuesta al fuego.

La investigación demuestra que la densidad y el módulo dinámico de las maderas de *T. rosea*, *A. inermis*, *J. pyriformis*, *Quercus spp.* y *C. elaeagnoides* disminuyeron después de ser sometidas al fuego. Igualmente, la frecuencia disminuyó para *T. rosea*, *A. inermis* y *Quercus spp.* pero no para *J. pyriformis* y *C. elaeagnoides*.

Los resultados deben ser interpretados especie por especie y parámetro por parámetro. Sin embargo, se puede concluir que si aumenta la densidad de la madera, cuando es expuesta al fuego, la disminución de la densidad, la frecuencia y de módulo dinámico disminuyen proporcionalmente.

Con excepción de *A. inermis*, las frecuencias y los módulos dinámicos, antes y después del tratamiento, de las maderas de *T. rosea*, *A. inermis*, *J. pyriformis*, *Quercus spp.* y *C. elaeagnoides* correlacionan bien.

Los resultados se limitan al caso de estudio de las cinco especies observadas y en condiciones de laboratorio similares a las definidas en esta investigación.

REFERENCIAS

1. White, R. H., y Dietsberger, M. A. Fire Safety of Wood Construction. In: Wood handbook. Wood as an engineering material. Madison. Forest Products Laboratory. (2010).
2. Ansell, M. P. Wood: A 45th anniversary review of JMS papers. Part 2. Wood modification, fire resistance, carbonization, wood-cement and wood-polymer composites. Journal of Materials Science. (2012). Vol. 47, No. 2, pp. 583-598.

3. Babrauskas, V. Charring rate of wood as a tool for fire investigations. *Fire Safety Journal*. (2005). Vol. 40, No. 6, pp. 528-554.
4. White, H. R. Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Timber Members. Chapter 13. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Quincy. Society of Fire Protection Engineers. (2008).
5. Young, S. A., y Clancy, P. Compression mechanical properties of wood at temperatures simulating fire conditions. *Fire and Materials*. (2001). Vol. 25, No. 3, pp. 83-93.
6. Chung, Y. Comparison of combustion properties of native wood species used for fire pots in Korea, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. (2010). Vol. 16, No. 1, pp. 15-19.
7. Xu, Q. F., Chen, L. Z., Harries, K. A., Zhang, F. W., Liu, Q., y Feng, J. H. Combustion and charring properties of five common constructional wood species from cone calorimeter tests. *Construction and Building Materials*. (2015). Vol. 96, pp. 416-427.
8. Sotomayor Castellanos, J. R., y Carrillo Gómez, M. I. Comportamiento al fuego de cinco especies mexicanas. Estudio comparativo. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. (2017). Vol. 13, No. 2, pp. 4-38.
9. Pellerin, R. F., y Ross, R. J. *Nondestructive Evaluation of Wood*. Madison. Forest Products Society. (2002).
10. Niklas, K. J., y Spatz, H. C. Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. *American Journal of Botany*. (2010). Vol. 97, No. 10, pp. 1587-1594.
11. Bremaud, I., Gril, J., y Thibaut, B. Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Science and Technology*. (2001). Vol. 45, No. 4, pp. 735-754.
12. Iñiguez González, G., Arriaga Martitegui, F., Esteban Herrero, M., y Arguelles Álvarez, R. (2007). Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural. *Informes de la Construcción*, Vol. 59, No. 506, pp. 97-105.
13. Friquin, K. Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber. *Fire and Materials*. (2011). Vol. 35, No. 5, pp. 303-327.
14. Rocha, M. A., y Landesmann, A. Combustion properties of Brazilian natural wood species. *Fire and Materials*. (2016). Vol. 40, No. 2, pp. 219-228.
15. Tamarit Urias, J. C., y López Torres, J. L. *Xilotecología de los principales árboles tropicales de México*. San Martinito Tlahuapan. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (2007).
16. Silva Guzmán, J. A., Fuentes Talavera, F. J., Rodríguez Anda R., Torres Andrade, P. A., Lomelí Ramírez, M. A., Ramos Quirarte, J., Waitkus, C., y Richter, H. G. *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*. México. Comisión Nacional Forestal. (2010).
17. Sotomayor Castellanos, J. R. *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. Morelia. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. (2015).

18. International Organization for Standardization. ISO 13061-2:2014. Wood. Determination of density for physical and mechanical tests. Geneva. International Organization for Standardization. 2014a.
19. International Organization for Standardization. ISO 13061-1:2014. Wood. Determination of moisture content for physical and mechanical tests. Geneva. International Organization for Standardization. 2014b.
20. Dietsch, P., Franke, S., Franke, B., Gamper, A., y Winter, S. Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. (2015). Vol. 5, No. 2, pp. 115-127.
21. International Organization for Standardization. ISO 3129:2012. Wood. Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens. Geneva. International Organization for Standardization. (2012).
22. Sotomayor Castellanos J. R., y Villaseñor Aguilar, J. M. Retención de Sales de boro en Tres Maderas Mexicanas. *Evaluación Mecánica por Vibraciones. Revista de Ciencia y Tecnología*. (2016). Vol. 26, No. S1, pp. 40-46.
23. Machek, L., Militz, H., y Sierra-Alvarez, R. The influence of wood moisture content on dynamic modulus of elasticity measurements in durability testing. *Forschung verwertung*. (2001). Vol. 53, No. 5, pp. 97-100.
24. Njankouo, J. M., Dotreppe, J. C., y Franssen, J. CM. Fire resistance of timbers from tropical countries and comparison of experimental charring rates with various models. *Construction and Building Materials*. (2005). Vol. 19, No. 5, pp. 376-386.
25. Wen, M. Y., Kang, C. W., y Park, H. J. Impregnation and mechanical properties of three softwoods treated with a new fire retardant chemical. *Journal of Wood Science*. (2014). Vol. 60, No. 5, pp. 367-375.



<https://www.mrs-mexico.org.mx/imrc2018/>