

# Comportamiento de cinco maderas mexicanas expuestas al fuego. Evaluación por ultrasonido

Javier Ramón, Sotomayor-Castellanos<sup>1\*</sup>

## Resumen

La madera es un material combustible. De tal forma que la industria fabricante de productos de madera requiere de información experimental sobre la resistencia al fuego de las diferentes especies empleadas en ingeniería. El objetivo de la investigación fue determinar y comparar la densidad aparente, la velocidad de onda y el módulo dinámico de cinco maderas mexicanas, antes y después de ser sometidas al fuego. La metodología consistió en estudiar cinco especies mexicanas: *Tabebuia rosea*, *Andira inermis*, *Juglans pyriformis*, *Quercus spp* y *Cordia elaeagnoides*. Para cada especie se prepararon 35 probetas de pequeñas dimensiones y se les realizaron pruebas de ultrasonido y de resistencia al fuego. Los resultados del análisis estadístico indicaron que cada especie se comporta de manera diferente. La densidad aparente de la madera correlaciona bien con la pérdida de masa. La densidad aparente de la madera después de la exposición al fuego, presenta una fuerte correlación con la densidad de la madera antes de ser expuesta al fuego. En cambio, la velocidad de onda y el módulo dinámico no se correlacionan bien. Los resultados de la investigación son particulares para las condiciones experimentales de este estudio de caso. Para sugerir de manera más general un comportamiento de la madera expuesta al fuego, son recomendables estudios intensivos con métodos normalizados.

**Palabras Clave:** Densidad aparente, material combustible, módulo dinámico, pruebas no destructivas, velocidad de onda.

## Behavior of five Mexican woods exposed to fire. Evaluation by ultrasound.

## Abstract

Wood is a combustible material. The industry of wood products requires experimental information on the fire resistance from the different species which are used in engineering. The objective of the research was to determine and compare the apparent density, wave velocity and dynamic modulus of five Mexican woods before and after being subjected to fire. The methodology consisted of studying five Mexican species: *Tabebuia rosea*, *Andira inermis*, *Juglans pyriformis*, *Quercus spp.* and *Cordia elaeagnoides*. For each species, 35 specimens of small dimensions were prepared and ultrasound and fire resistance tests were carried out.

The results of the statistical analysis indicated that each species behaves differently. The apparent density of the wood correlates well with the loss of mass. The apparent density of the wood after exposure to fire has a strong correlation with the density of the wood before being exposed to fire. In contrast, the wave velocity and the dynamic module do not correlate well. The results of the research are particular to the experimental conditions of this case study. In order to suggest wood fire behavior in a more general way, intensive studies with standard methods are recommended.

**Keywords:** Bulk density, dynamic modulus, fuel material, non-destructive tests, wave velocity.

**Recibido:** 24 de abril de 2018  
**Aceptado:** 16 de agosto de 2018

<sup>1</sup>Profesor Investigador de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Morelia, Michoacán, México; [madera999@yahoo.com](mailto:madera999@yahoo.com); <https://orcid.org/0000-0002-1527-8801>

\*Autor para correspondencia: [madera999@yahoo.com](mailto:madera999@yahoo.com)

## I. INTRODUCCIÓN

La madera es un material combustible. Se requiere información experimental sobre su resistencia al fuego, para cálculos de Ingeniería y para el diseño de productos de madera y sus derivados. A pesar de la combustibilidad de la madera, pueden plantearse soluciones constructivas con este material que permitan alcanzar condiciones suficientes de seguridad en caso de incendio. Respecto al proceso de combustión de la madera y su comportamiento al fuego en edificaciones, se puede encontrar información en Canadian Wood Council (1996), Babu (2008), Confemadera (2010), Ansell (2012) y Aseeva et al. (2014). Los investigadores han desarrollado ensayos específicos y modelos numéricos para estudiar el comportamiento al fuego de la madera y recomiendan estudiar caso por caso. Entre otros, los principales parámetros estudiados son el tiempo de ignición, la pérdida de masa y la velocidad de carbonizado. Es estos reportes, no se informa sobre mediciones directas de la disminución de los módulos dinámicos de probetas de madera.

El ultrasonido es un método de carácter no destructivo, práctico y económico, empleado para caracterizar el comportamiento mecánico de la madera (Pellerin y Ross, 2002). El módulo dinámico, derivado de las pruebas de ultrasonido, puede ser utilizado como índice comparativo de la calidad en una especie particular; y como parámetro de ingeniería necesario para el análisis estructural probabilístico y sísmico de estructuras de madera (Joint Committee on Structural Safety, 2006) (Dietsch & Köhler, 2010).

En el diseño de estructuras de madera que resistan al fuego, el objetivo principal es evaluar la integridad estructural en la exposición al mismo y después del incendio. El módulo dinámico de la madera después de ser sometida al fuego, es un parámetro que permite cuantificar la capacidad portante remanente de los elementos de madera en caso de incendio. Sin embargo, se torna complejo aprovechar los resultados experimentales producidos en condiciones de laboratorio, los cuales permitan formular criterios de seguridad en caso de incendio, y que sean apropiados a la construcción con madera. No obstante, existe evidencia empírica en donde los valores obtenidos por medio de los ensayos de resistencia al fuego en condiciones de laboratorio, concuerdan con los resultados de los incendios a gran escala (Babrauskas, 2005) (Chung, 2010) (Xu et al., 2015).

Las especies *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC., *Andira inermis* (W. Wright) DC., *Juglans pyriformis* Liebm., *Quercus* spp. y *Cordia elaeagnoides* (Ruiz & Pav.) Oken, son endémicas de México y Centroamérica (Cordero y Boshier, 2003). Sus características físicas y mecánicas están reportadas por Tamarit Urias y López Torres (2007), Silva Guzmán et al. (2010) y Sotomayor Castellanos (2015). El comportamiento al fuego de estas especies ha sido estudiado por Sotomayor Castellanos y Carrillo Gómez (2017). Los autores reportan que el tiempo de ignición y la pérdida de masa son parámetros parciales del comportamiento de la madera al fuego; y que el comportamiento de la madera depende, entre otros factores, del contenido de humedad, las condiciones de exposición y la variabilidad inherente de la madera. No se encontraron antecedentes de otras investigaciones referentes a la respuesta de estas especies en su exposición al fuego, las cuales hayan sido evaluadas con ultrasonido.

El objetivo de la investigación fue determinar y comparar la densidad aparente, la velocidad de onda y el módulo dinámico de cinco maderas mexicanas, antes y después de ser sometidas al fuego.

## II. DESARROLLO

### 1. Metodología

Se recolectaron piezas de madera aserrada de las especies: *T. rosea*, *A. inermis*, *J. pyriformis*, *Quercus* spp y *C. elaeagnoides*, en aserraderos del Estado de Michoacán (19° 10' 07" latitud Norte - 101° 53' 59" longitud Oeste), México. A partir de las piezas aserradas, se prepararon dos grupos de probetas: un primer grupo de 35 probetas de cada especie para determinar el contenido de humedad; e igualmente un segundo grupo de 35 probetas por especie para determinar la densidad, y así realizar las pruebas de comportamiento al fuego y de ultrasonido. Todas las probetas se elaboraron solamente con madera de albura, se revisó que estuviesen libres de anomalías de crecimiento y de madera de duramen.

Para cada probeta del primer grupo, el contenido de humedad de la madera se calculó por el método de diferencia de pesos, según establece la norma ISO 13061-1: 2014 (International Organization for Standardization, 2014a). Las dimensiones de las probetas fueron de 0,02 m x 0,02 m de sección transversal, por 0,06 m de longitud; orientadas respectivamente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal con respecto al plano leñoso.

Para el segundo grupo, se recortaron 35 probetas de cada especie siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 3129:2012 (International Organization for Standardization, 2012). 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. Las dimensiones de estas probetas fueron de 0,02 m x 0,02 m de sección transversal, por 0,40 m de longitud; orientadas respectivamente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal. La densidad aparente de la madera al momento del ensayo se determinó de

acuerdo con la norma ISO 13061-2:2014 (International Organization for Standardization, 2014b).

#### Pruebas de resistencia al fuego

Las pruebas de resistencia al fuego siguieron el protocolo reportado por Sotomayor Castellanos y Carrillo Gómez (2017). Se preparó un dispositivo de ensayo que consistió en un mechero de gas y dos soportes para las probetas (Figura 1). Se posicionó la probeta entre los soportes, de tal forma que la llama del mechero impactara en la dirección transversal de la misma.

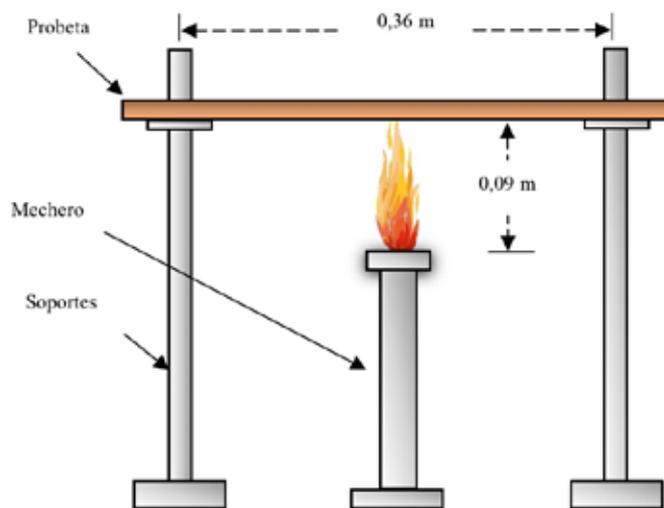


Figura 1. Dispositivo para las pruebas de comportamiento al fuego (Sotomayor Castellanos & Carrillo Gómez, 2017).

La metodología implementada para las pruebas de resistencia 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 por lo 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 de madera carbonizada se retiró y se midió el peso de la probeta después del tratamiento.

#### Cálculo de densidad aparente y del contenido de humedad

La densidad aparente de la madera al momento del ensayo se calculó con la ecuación (1) (International Organization for Standardization, 2014):

$$\rho_{CH} = \left( \frac{P}{V} \right) \quad (1)$$

Dónde:  $\rho_{CH}$  = Densidad aparente ( $\text{kg m}^{-3}$ ), P = Peso de la probeta (kg), V = Volumen de la probeta ( $\text{m}^3$ )  
El contenido de humedad de la madera se calculó con la ecuación (2) (International Organization for Standardization, 2014):

$$\rho_{CH} = \left( \frac{P}{V} \right) \quad (1)$$

Siendo CH = Contenido de humedad (%),  $P_h$  = Peso de la probeta en estado húmedo (kg),  $P_s$  = Peso de la probeta en estado seco (kg)

*Pruebas de ultrasonido*

Las pruebas de ultrasonido adecuaron el protocolo reportado por Sotomayor Castellanos y Villaseñor

Aguilar (2016). Las pruebas consistieron en suministrar un impulso ultrasónico en transmisión directa con la dirección longitudinal de la probeta. La velocidad del ultrasonido se calculó con el cociente entre la longitud de las probetas y el tiempo de transmisión medido con el aparato Sylvates, posicionado en un dispositivo para pruebas no destructivas (Figura 2). En lo sucesivo, a los parámetros determinados se les asoció el subíndice “us”, para identificarlos como derivados de pruebas de ultrasonido.



Figura 2. Dispositivo experimental para las pruebas de ultrasonido.

A partir de la ecuación de onda (3) (Meyers, 1994):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3)$$

$u$  = Vector desplazamiento,  $x$  = Coordenada espacial,  $t$  = Coordenada temporal,  $v$  = Velocidad de onda

Se calculó el módulo dinámico con la ecuación (4) (Pellerin & Ross, 2002):

$$E_{us} = v_{us}^2 \rho_{CH}$$

$E_{us}$  = Módulo dinámico ( $N\ m^{-2}$ ),  $v_{us}$  = Velocidad de onda del ultrasonido ( $m\ s^{-1}$ ),

$\rho_{CH}$  = Densidad aparente a un contenido de humedad CH ( $kg\ m^{-3}$ )

*Diseño experimental*

Para cada una de las cinco especies estudiadas, las variables de respuesta fueron la densidad aparente ( $\rho_{CH}$ ) y la velocidad de onda ( $v_{us}$ ). El

módulo dinámico ( $E_{us}$ ) se definió variable derivada (Ecuación 4). En el tratamiento de exposición al fuego se consideró el factor de variación, y se contrastaron dos grupos de muestras: 1) la madera antes del tratamiento (AT) y 2) la madera después del tratamiento (DT). Se calcularon los estadísticos descriptivos: media ( $\bar{x}$ ), desviación estándar ( $\sigma$ ) y coeficiente de variación porcentual (CV).

Se calcularon el 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 las 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, para antes y después del tratamiento, las regresiones lineales

( $y = ax \pm b$ ) entre las variables  $\rho_{CH}$  y  $v_{us}$ , así como sus coeficientes de determinación ( $R^2$ ). Para estas correlaciones se utilizaron los 175 datos obtenidos de las cinco especies. Para el Eus se calculó la regresión lineal y su coeficiente de determinación empleando los valores promedio de cada una de las especies. Para cada una de las cinco especies se realizaron 35 réplicas (probetas) antes del tratamiento y 35 después del tratamiento, empleando y comparando una a una la misma probeta. El análisis estadístico se realizó con el programa estadístico Statgraphics.

## 2. Resultados y discusión

La Tabla 1 detalla los resultados de la densidad aparente, de la velocidad de onda y del módulo dinámico para las cinco especies estudiadas. La Tabla 2 muestra los resultados de las pruebas de normalidad, así como las de comparación de medias y de medianas para la densidad aparente y la velocidad de onda. La Figura 3 presenta cinco probetas después del tratamiento de exposición al fuego. En dicha figura, los números de las probetas corresponden a la numeración de las probetas de la Tabla 1.

La magnitud promedio del contenido de humedad de la madera antes del tratamiento fue de 12,2% y después del tratamiento disminuyó a 11,91%, lo que representa una variación de 2,5%. Por lo tanto, se consideró que el contenido de humedad en la madera no influyó en los resultados.

Después de la exposición al fuego, las probetas mostraron una zona de madera carbonizada cercana a la zona de propagación de la flama. Su aspecto fue similar en las cinco especies (Figura 3). Sin embargo, en el centro de las probetas, se observó una menor sección residual a medida que la densidad de la madera fue mayor. No se observaron hendiduras o desprendimientos de materia en ninguna de las probetas.

### Densidad aparente

Con excepción de la especie *Quercus spp.*, los valores de sesgo y curtosis de la densidad aparente confirmaron la distribución normal de las muestras (Tabla 2). De ello deriva que para *Quercus spp.*, el valor  $P < 0,5$  de la prueba de Kruskal-Wallis de diferencia de medianas, sugiere que no existió

una diferencia estadísticamente significativa en la densidad antes y después del tratamiento. Sin embargo, para las especies *T. rosea*, *A. inermis*, *J. pyriformis* y *C. elaeagnoides*, el valor  $P > 0,5$  de la prueba t de Student de diferencia de medias, indicó una desigualdad estadísticamente significativa de  $\rho_{CH}$  ocasionada por la exposición de la madera al fuego.

Después de la exposición al fuego, la densidad aparente disminuyó de manera inversamente proporcional a la densidad de la especie en el siguiente orden: *T. rosea* (5,2%), *A. inermis* (3,4%), *J. pyriformis* (3,5%), *Quercus spp.* (2,7%) y *C. elaeagnoides* (2,0%). Esta tendencia se ilustra en la Figura 4a, donde el coeficiente de determinación de la correlación  $\rho_{CH}$  DT en función de  $\rho_{CH}$  AT es muy alto ( $R^2 = 0,99$ ). Los puntos en las Figuras 4a y 4b representan 175 valores correspondientes a todas las probetas estudiadas. Debido a la escala empleada, no se visualizan los 175 datos analizados. Después del tratamiento el coeficiente de variación de la densidad aparente aumentó para todas las especies: *T. rosea* (6,3%), *A. inermis* (10,0%), *J. pyriformis* (5,2%), *Quercus spp.* (3,2%) y *C. elaeagnoides* (3,1%). Es decir, cada probeta y cada especie perdieron masa en cantidades diferentes. Los valores promedio de las densidades aparentes antes del tratamiento, se situaron al interior del intervalo reportado por Tamarit Urias y López Torres (2007), Silva Guzmán et al. (2010) y Sotomayor Castellanos (2015) para estas maderas ( $613 \text{ kg m}^{-3} < \rho_{CH} < 996 \text{ kg m}^{-3}$ ). Sin embargo, los valores particulares entre cada especie difieren entre sí.

### Velocidad de onda

Para la velocidad de onda de las cinco especies, los valores de sesgo y curtosis confirmaron su distribución normal en las muestras (Tabla 2). Para *T. rosea*, *J. pyriformis*, *Quercus spp.* y *C. elaeagnoides* no se observó variación antes y después de la exposición al fuego. La especie *A. inermis* es la excepción, su valor  $P > 0,5$  de las pruebas de diferencia de medias confirmó una diferencia significativa de  $v_{us}$  entre la madera, antes y después del tratamiento.

Con excepción de *T. rosea*, especie para la cual la velocidad de onda disminuyó 6,7%, la  $v_{us}$  aumentó para *A. inermis* (0,4%), *J. pyriformis* (9,4%), *Quercus spp.* (15,2%) y *C. elaeagnoides* (4,5%).

Esta discontinuidad en los resultados se indica en la Figura 4b, donde el coeficiente de determinación de la correlación  $v_{us}$  DT en función de  $v_{us}$  AT es muy bajo. Por su parte, y después del tratamiento, el coeficiente de variación de la velocidad de onda aumentó para *T. rosea* (77,2%) y *A. inermis* (31,4%); pero disminuyó para *J. pyriformis* (26,4%), *Quercus spp.* (7,0%) y *C. elaeagnoides* (18,4%).

Las magnitudes de las velocidades de onda antes del tratamiento son similares a las determinadas con ultrasonido en la dirección longitudinal reportadas por Gonçalves et al. (2014): *Apuleia leiocarpa* ( $\rho_{CH} = 650 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $v_{us} = 4875 \text{ m s}^{-1}$ ), *Goupia glabra* ( $\rho_{CH} = 720 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $v_{us} = 4999 \text{ m s}^{-1}$ ) y *Eucalyptus saligna* ( $\rho_{CH} = 395 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $v_{us} = 5002 \text{ m s}^{-1}$ ).

#### Módulo dinámico

Los valores promedio de  $E_{us}$  disminuyeron después de la exposición de la madera al fuego (Tabla 1) en el siguiente orden: *T. rosea* (17,6%), *A. inermis* (2,5%), y *C. elaeagnoides* (10,7%). Por el contrario, las especies *J. pyriformis* y *Quercus spp.*, aumentaron sus módulos dinámicos en 15,4% y 29,1% respectivamente.

La magnitud del módulo dinámico antes del tratamiento de las cinco especies fue similar a los módulos obtenidos por ultrasonido, reportados por Bachtiar et al. (2017) para *Juglans regia* ( $E_{us} = 11190 \text{ MN m}^{-2}$ ,  $\rho_{CH} = 647 \text{ kg m}^{-3}$ ) y *Prunus*

*avium* ( $E_{us} = 8238 \text{ MN m}^{-2}$ ,  $\rho_{CH} = 560 \text{ kg m}^{-3}$ ). Son notorios los resultados para *J. pyriformis* y *Quercus spp.* Efectivamente, la expectativa del efecto en la exposición al fuego de una pieza de madera es la reducción en su resistencia mecánica, en este estudio de caso representada por su módulo dinámico.

Un análisis más detallado de las 175 probetas estudiadas, en cuanto a la dispersión de la velocidad de onda antes del tratamiento ( $v_{us}$  AT), y en función de la velocidad de onda después del tratamiento ( $v_{us}$  DT), resulta en una regresión con un coeficiente de determinación muy bajo (Figura 4b). La correlación del módulo dinámico calculado con la ecuación 4, representa la combinación de las correspondencias entre la densidad aparente y la velocidad de onda. Ello establece un coeficiente de determinación bajo (Figura 4c).

La correlación estadísticamente significativa, entre las densidades antes y después del tratamiento, contrasta con la dispersión importante entre las velocidades de onda correspondientes. Por lo tanto, es la velocidad de onda la variable que influye de manera preponderante en la estimación del módulo dinámico. Este resultado sugiere que la pérdida de masa, o su disminución en la densidad aparente, son previsible cuando se trata de una pieza de madera con las dimensiones empleadas en este estudio de caso; no así la velocidad de onda determinada con ultrasonido.

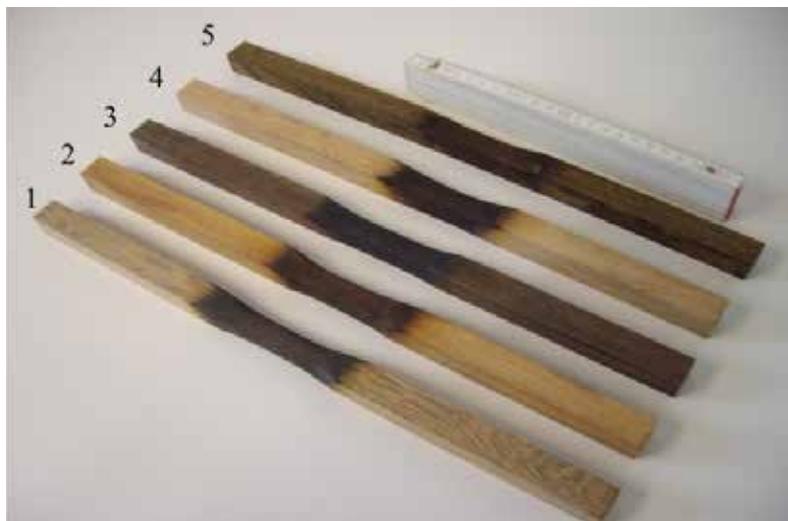


Figura 3. Probetas después del tratamiento. Los números de las probetas corresponden a la numeración de las que aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Densidad aparente, velocidad de onda y módulo dinámico.

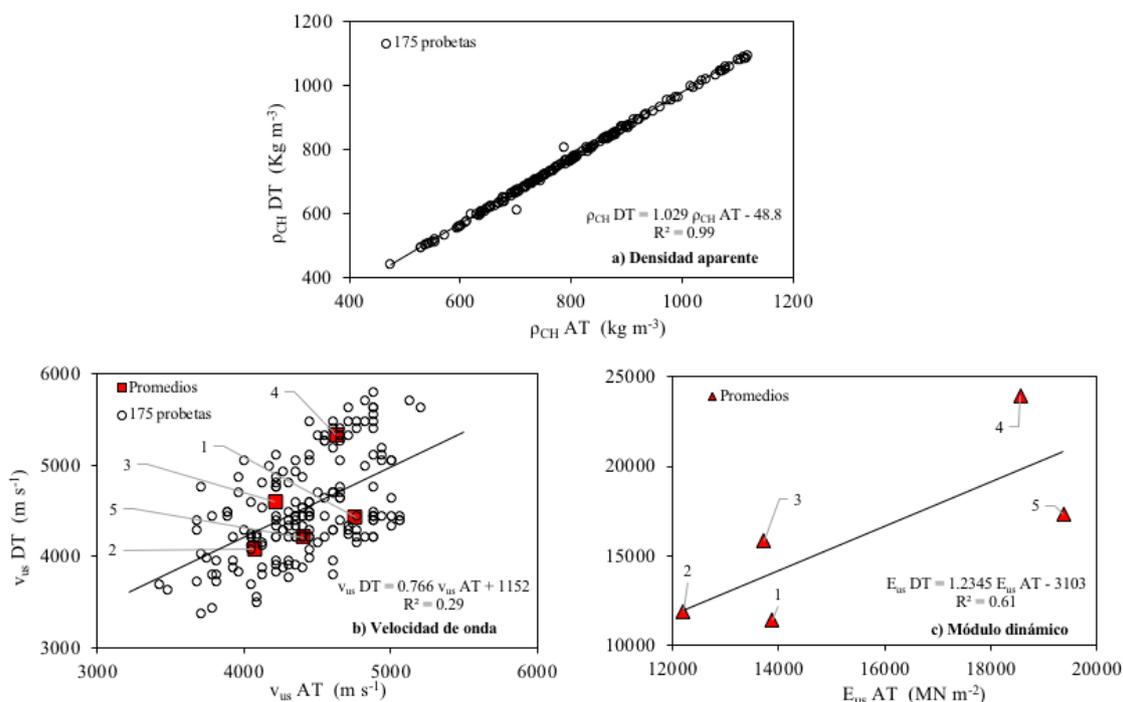
		$\rho_{CH}$	$v_{us}$	$E_{us}$
<i>1.- Tabebuia rosea</i>				
Antes del tratamiento	$\bar{x}$	613	4758	13877
	$\sigma$	59	240	-
	CV	9,6	5,05	-
Después del tratamiento	$\bar{x}$	581	4437	11438
	$\sigma$	59	398	-
	CV	10,2	8,98	-
<i>2.- Andira inermis</i>				
Antes del tratamiento	$\bar{x}$	737	4070	12208
	$\sigma$	37	270	-
	CV	5,0	6,63	-
Después del tratamiento	$\bar{x}$	712	4088	11899
	$\sigma$	39	356	-
	CV	5,5	8,71	-
<i>3.- Juglans pyriformis</i>				
Antes del tratamiento	$\bar{x}$	773	4213	13720
	$\sigma$	60	326	-
	CV	7,7	7,74	-
Después del tratamiento	$\bar{x}$	746	4608	15840
	$\sigma$	61	262	-
	CV	8,1	5,7	-
<i>4.- Quercus spp.</i>				
Antes del tratamiento	$\bar{x}$	866	4629	18556
	$\sigma$	54	259	-
	CV	6,3	5,59	-
Después del tratamiento	$\bar{x}$	843	5331	23958
	$\sigma$	55	277	-
	CV	6,5	5,2	-
<i>5.- Cordia elaeagnoides</i>				
Antes del tratamiento	$\bar{x}$	996	4410	19370
	$\sigma$	97	290	-
	CV	9,7	6,58	-
Después del tratamiento	$\bar{x}$	976	4211	17307
	$\sigma$	97	226	-
	CV	10,0	5,37	-

$\rho_{CH}$  = Densidad aparente;  $v_{us}$  = Velocidad de onda;  $E_{us}$  = Módulo dinámico;  $\bar{X}$  = Media;  $\sigma$  = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación porcentual.

**Tabla 2.** Resultados de las pruebas de normalidad, de comparación de medias y de medianas.

	$\rho_{CH}$		$P_{(\alpha=0.05)}$	$v_{us}$		$P_{(\alpha=0.05)}$
	S	C		S	C	
1 <i>Tabebuia rosea</i> AT	-0,7100	-0,4667	-	-1,927	-0,242	-
1 <i>Tabebuia rosea</i> DT	-0,6289	-0,2682	0,0269*†	0,850	-0,872	0,0001
2 <i>Andira inermis</i> AT	-0,0998	-0,1598	-	-1,471	-0,007	-
2 <i>Andira inermis</i> DT	-1,0218	-0,0998	0,0061*†	-0,479	-0,640	0,8188*
3 <i>Juglans pyriformis</i> AT	-0,6014	-0,4580	-	0,020	-0,570	-
3 <i>Juglans pyriformis</i> DT	-0,6630	-0,5102	0,0686**†	0,221	-0,129	0,0001
4 <i>Quercus spp.</i> AT	-4,5993	6,2573	-	-0,275	-0,215	-
4 <i>Quercus spp.</i> DT	-4,7229	6,4449	0,0188**††	-1,194	-0,655	0,0001
5 <i>Cordia elaeagnoides</i> AT	-1,3709	-0,9560	-	-0,464	-0,253	-
5 <i>Cordia elaeagnoides</i> DT	-1,4006	-0,9343	0,4082**†	-1,931	-0,632	0,0021

$\rho_{CH}$  = Densidad aparente;  $v_{us}$  = Velocidad de onda; 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.



**Figura 4.** Dispersión de: a) la densidad aparente ( $\rho_{CH}$ ) b) la velocidad de onda ( $v_{us}$ ) y c) el módulo dinámico ( $E_{us}$ ); sus regresiones  $y = ax \pm b$  y coeficientes de determinación ( $R^2$ ). Los números de los puntos corresponden a la numeración de las probetas mostradas en la Tabla 1.

### III. CONCLUSIONES

La presente investigación determinó la densidad aparente, la velocidad de onda y el módulo dinámico de cinco maderas mexicanas. El uso del ultrasonido permitió comparar, en una misma probeta, estos parámetros antes y después de ser sometida al fuego.

Cuando la madera es expuesta al fuego, cada especie se comporta de manera diferente. En consecuencia, las especies de madera con mayor densidad aparente pierden menos masa. La densidad aparente de la madera después de la exposición al fuego, presenta una fuerte correlación con la densidad de la madera antes de ser expuesta al mismo. En cambio, la velocidad de onda y el módulo dinámico no se correlacionan bien.

Los resultados de la investigación son particulares para las condiciones experimentales de este estudio de caso. Para sugerir un comportamiento más general de la madera expuesta al fuego, son recomendables estudios intensivos con métodos normalizados.

### IV. REFERENCIAS

- Ansell, M. P. (2012). Wood: A 45th anniversary review of JMS papers, *Journal of Materials Science*, 47(2), 583-598. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/227284325\\_Wood\\_A\\_45th\\_anniversary\\_review\\_of\\_JMS\\_papers](https://www.researchgate.net/publication/227284325_Wood_A_45th_anniversary_review_of_JMS_papers)
- Aseeva, R., Serkov, B., & Sivenkov, A. (2014). *Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings*, Wien, Austria, Springer
- Babrauskas, V. (2005). Charring rate of wood as a tool for fire investigations, *Fire Safety Journal*, 40(6), 528-554. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/222913778\\_Charring\\_rate\\_of\\_wood\\_as\\_a\\_tool\\_for\\_fire\\_investigations](https://www.researchgate.net/publication/222913778_Charring_rate_of_wood_as_a_tool_for_fire_investigations)
- Babu, B. V. (2008). Biomass pyrolysis: a state-of-the-art review, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2(5), 393-414. Doi: 10.1002/bbb.92
- Bachtiar, E. V., Sanabria, S. J., Mittig, J. P., & Niemz, P. (2017). Moisture-dependent elastic characteristics of walnut and cherry wood by means of mechanical and ultrasonic test incorporating three different ultrasound data evaluation techniques, *Wood Science and Technology*, 51(1), 47-67. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-016-0851-z>
- Canadian Wood Council. (1996). *Fire Safety Design in Buildings*, Ottawa, Canada, Canadian Wood Council.
- Chung, Y. (2010). Comparison of combustion properties of native wood species used for fire pots in Korea, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 16(1), 15-19. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226086X10000328>
- Confemadera. (2010). *Construir con Madera*, Madrid, España, Confederación Española de Empresarios de la Madera.
- Cordero, J., & Boshier, D. H. (2003). Árboles de Centroamérica, Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Dietsch, P., & Köhler, J. (2010). Assessment of Timber Structures, *Modelling of the Performance of Timber Structures*, Aachen, Germany, Shaker Verlag.
- Gonçalves, R., Trinca, A. J., & Pellis, B. P. (2014). Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens, *Wood Science and Technology*, 48(2), 269-287. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-013-0598-8>
- International Organization for Standardization. (2012). ISO 3129:2012, Wood. *Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens*, Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2014a). ISO 13061-1:2014, Wood. *Determination of moisture content for physical and mechanical tests*, Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2014b). ISO 13061-2:2014, Wood. *Determination of density for physical and mechanical tests*, Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization.
- Joint Committee on Structural Safety. (2006). *Probabilistic model code*. Part 3.5-Timber, Lyngby, Denmark, Joint Committee on Structural Safety.
- Meyers, M.A. (1994). *Dynamic Behavior of Materials*, Hoboken, USA, John Wiley & Sons.
- Pellerin, R. F., & Ross, R. J. (2002). *Nondestructive Evaluation of Wood*, Peachtree Corners, USA, Forest Products Society.
- Silva Guzmán, J. A., Fuentes Talavera, F. J., Rodríguez Anda, R., Torres Andrade, P. A., Lomelí Ramírez, M. A., Ramos Quirarte J.,... Richter, H. G. (2010). *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas*

- nativas de México e importadas*, México, México, Comisión Nacional Forestal.
- Sotomayor Castellanos, J. R. (2015). *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*, Morelia, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Sotomayor Castellanos, J. R., & Carrillo Gómez, M. I. (2017). Comportamiento al fuego de cinco especies mexicanas. Estudio comparativo, *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 13(2), 4-38.
- Sotomayor Castellanos, J. R., & Villaseñor Aguilar J. M., (2016). Propiedades acústicas de madera de *Fraxinus americana* y *Fraxinus uhdei*, *Brazilian Journal of Wood Science*, 7(3), 147-155. Recuperado de <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/cienciadamadeira/article/view/8633>
- Tamarit Urias, J. C., & López Torres, J. L. (2007). *Xilotecología de los principales árboles tropicales de México*, San Martinito, México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agropecuarias y Pecuarias.
- Xu, Q. F., Chen, L. Z., Harries, K. A., Zhang, F. W., Liu, Q., & Feng, J. H. (2015). Combustion and charring properties of five common constructional wood species from cone calorimeter tests, *Construction and Building Materials*, 96, 416-427. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815302877>