

## Velocidad de ondas de esfuerzo y módulos de elasticidad de 4 maderas mexicanas

SOTOMAYOR-CASTELLANOS, Javier\*† y VILLASEÑOR-AGUILAR, José

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Múgica S/N. Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.

Recibido Enero 22, 2015; Aceptado Junio 11, 2015

### Resumen

En ingeniería de la madera, el módulo de elasticidad es necesario para el cálculo de la rigidez de elementos estructurales. Igualmente, la densidad y la velocidad de onda son propiedades empleadas en el diseño de productos de madera con vocación para aplicaciones acústicas. El objetivo de la investigación fue determinar la velocidad de transmisión de onda y el módulo de elasticidad que caracterizan a la madera de *Swietenia humilis*, *Alnus acuminata*, *Fraxinus americana* y *Fraxinus uhdei*, empleando el método de evaluación no destructivo de ondas de esfuerzo. El experimento realizó un análisis de varianza de la densidad, de la velocidad de las ondas de esfuerzo y del módulo de elasticidad de la madera como las variables de respuesta. La especie fue considerada el factor de variación. Los resultados mostraron que existe una diferencia significativa entre las medias de las 4 variables con un nivel del 95% de confianza. Este resultado sugiere que las cuatro especies deben ser consideradas como diferentes para fines de diseño y cálculo estructural.

**Métodos no destructivos, *Swietenia humilis*, *Alnus acuminata*, *Fraxinus americana*, *Fraxinus uhdei***

### Abstract

In the wood engineering field, the modulus of elasticity is needed to calculate the rigidity of the structural elements. Similarly, the density and the wave speed are properties used in the design of wood products minded for acoustic applications. The goal of the research was to determine the wave transmission speed and the modulus of elasticity that characterize the *Swietenia humilis*, *Alnus acuminata*, *Fraxinus americana* and *Fraxinus uhdei* woods by means of using the non-destructive stress wave evaluation method. In the research it was performed an analysis of variance of the wood density, the stress wave speed and the wood modulus of elasticity as response variables. The wood species was considered to be the variation factor. Results showed that exist a statistically significant difference within the means of the four variables with a significant level of 95%. This result suggests that the four species must be considered as different for design purposes and structural calculations.

**Non-destructive methods, *Swietenia humilis*, *Alnus acuminata*, *Fraxinus americana*, *Fraxinus uhdei***

**Citación:** SOTOMAYOR-CASTELLANOS, Javier y VILLASEÑOR-AGUILAR, José. Velocidad de ondas de esfuerzo y módulos de elasticidad de 4 maderas mexicanas. Revista de Aplicación Científica y Técnica 2015, 1-1: 34-42

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: madera999@yahoo.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Para contribuir a la utilización correcta de la madera empleada en la industria que incorpora este material como elemento estructural, es deseable desarrollar métodos simples de caracterización de sus propiedades mecánicas.

En Ingeniería de la madera, el módulo de elasticidad de la madera es necesario para el cálculo de su rigidez estructural, independientemente de la especie y de las características tecnológicas de la madera que modifiquen su respuesta estructural, tales como el contenido de humedad y su distribución, así como la presencia y localización de nudos y de fisuras en el plano leñoso.

Entre las características mecánicas de la madera necesarias para el diseño de productos de madera, el módulo de elasticidad determinado en condiciones dinámicas es el parámetro de referencia (Íñiguez et al. 2007).

Igualmente, la densidad y la velocidad de onda son propiedades empleadas en el diseño de productos de madera con vocación para aplicaciones acústicas (Brémaud et al. 2011).

Una opción para la determinación del módulo de elasticidad de elementos estructurales es la aplicación de métodos de evaluación no destructivos. Los métodos de evaluación no destructivos se caracterizan principalmente por su rapidez, bajo costo y por no afectar la estructura física del material en estudio. Entre otros métodos, las ondas de esfuerzo han demostrado su habilidad para determinar la velocidad de onda y el módulo de elasticidad de la madera (Kawamoto y Williams, 2002).

Matthews et al. (1994) estudian el efecto del contenido de humedad en las ondas de esfuerzo en madera de *Araucaria angustifolia*.

Los investigadores concluyen que el tiempo de transmisión de las ondas de esfuerzo en la madera se incrementa linealmente con el contenido de humedad del material. Es decir, la velocidad de las ondas de esfuerzo disminuye recíprocamente con el aumento del contenido de humedad. Además, los autores proponen que el módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo presenta un valor mínimo alrededor del punto de saturación de la fibra. De esta manera Matthews et al. Concluyen que el contenido de humedad en la madera influye significativamente en los parámetros derivados de la medición de ondas de esfuerzo en la madera.

Kang y Booker (2002) estudian la variación de la velocidad de ondas de esfuerzo en relación al contenido de humedad de la madera de *Pinus radiata*. Entre sus principales conclusiones los autores proponen que la velocidad de ondas de esfuerzo es independiente del largo de la probeta. Así mismo la velocidad disminuye fuertemente cuando el contenido de humedad de la madera se incrementa del estado anhidro al punto de saturación de la fibra y a partir de este punto la velocidad decrece a una tasa menor respecto al incremento de contenido de humedad.

Han et al. (2006) estudian el efecto de la humedad en la velocidad de las ondas de esfuerzo en tableros de madera y madera sólida de *Pinus palustris* usando la tecnología *Metriguard*®. Entre sus conclusiones los autores encuentran para compósitos de madera que la velocidad de las ondas de esfuerzo decrece cuando aumenta el contenido de humedad en la madera y proponen que un análisis de regresiones entre la velocidad y el módulo de elasticidad de los materiales puede ser útil para predecir sus propiedades de resistencia.

Grabianowski et al. (2006) estudian árboles, troncos y madera aserrada de *Pinus radiata* utilizando ondas de esfuerzo. Entre sus principales conclusiones los autores encuentran fuertes correlaciones entre los valores de la velocidad de transmisión de ondas de esfuerzo entre árboles, troncos y madera aserrada. De esta manera los investigadores muestran que es posible predecir características mecánicas de madera aserrada a partir del estudio de ondas de esfuerzo en árboles en pie. En el mismo contexto, Ross et al. (2005) utilizan ondas de esfuerzo longitudinales para evaluar las correlaciones entre las propiedades mecánicas de la madera y la de trozas de *Pseudotsuga menziesii*. Los investigadores encuentran que los resultados de pruebas de ondas de esfuerzo efectuados sobre trozas, son útiles para predecir los módulos de elasticidad dinámicos y estáticos de la madera aserrada.

El objetivo de la investigación fue determinar la velocidad de transmisión de onda y el módulo de elasticidad que caracterizan a la madera de *Swietenia humilis*, *Alnus acuminata*, *Fraxinus americana* y *Fraxinus uhdei*, empleando el método de evaluación no destructivo de ondas de esfuerzo.

### Materiales y métodos

El material experimental consistió en madera de *Swietenia humilis* Zucc., *Alnus acuminata* arguta (Schlecht.) Furlow, *Fraxinus americana* L. y *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh., recolectada en terrenos forestales de Estado de Michoacán, México. Las especies fueron identificadas en el Laboratorio de Mecánica de la Madera, de la Facultad de Ingeniería de la Madera, UMSNH.

A partir de varios árboles, para cada especie se prepararon 32 probetas con dimensiones de 0.02 m x 0.02 m x 0.32 m, orientadas respectivamente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso, de acuerdo a las recomendaciones de la norma de la Organización Internacional para la Estandarización (International Organization for Standardization, 2014). La madera se almacenó durante 6 meses en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C ( $\pm 1$  °C) y una humedad relativa de 60% ( $\pm 2$  %), hasta que alcanzó un peso constante.

Contenido de humedad y densidad.

El contenido de humedad se determinó por el método de diferencia de pesos con grupos complementarios de probetas. Para cada probeta se calculó la densidad correspondiente al contenido de humedad de la madera en el momento de las pruebas.

El contenido de humedad de la madera se calculó con la fórmula (Sotomayor-Castellanos y Ramírez-Pérez, 2013):

$$CH = \frac{P_H - P_A}{P_A} (100) \quad (1)$$

Dónde:

CH = Contenido de humedad de la madera al momento del ensayo (%)

$P_H$  = Peso de la probeta a un contenido de humedad H (kg)

$P_A$  = Peso de la probeta en estado anhidro:  
CH = 0% (kg)

La densidad de la madera se calculó con la fórmula (Fuentes-Salinas, 2000):

$$\rho_{CH} = \frac{P_{CH}}{V_{CH}} \quad (2)$$

Dónde:

$\rho_{CH}$  = Densidad de la madera a un contenido de humedad CH ( $\text{kg/m}^3$ )

$P_{CH}$  = Peso de la barra a un contenido de humedad CH (kg)

$V_{CH}$  = Volumen de la barra a un contenido de humedad CH ( $\text{m}^3$ )

#### Pruebas de ondas de esfuerzo

Las pruebas de ondas de esfuerzo consistieron en medir el tiempo de transmisión de una onda a través de la longitud de la probeta. Para las pruebas se empleó el aparato *Metriguard*<sup>®</sup> (Figura 1) posicionado en un dispositivo para pruebas no destructivas desarrollado por Sotomayor-Castellanos et al. (2011). Con la longitud de las probetas y el tiempo de transmisión de las ondas de esfuerzo, se calculó la velocidad de transmisión de las ondas de esfuerzo.



**Figura 1** Dispositivo para pruebas de ondas de esfuerzo y aparato *Metriguard*<sup>®</sup> (Sotomayor-Castellanos et al. 2011).

A partir de la ecuación de onda:

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

Dónde:

$u$  = Vector desplazamiento.

$x$  = Coordenada espacial.

$t$  = Coordenada temporal.

$v$  = Velocidad de onda.

Se determinó el módulo de elasticidad con la fórmula (Pellerin y Ross, 2002):

$$E_{oe} = V_{oe}^2 \rho_{CH} \quad (4)$$

Dónde:

$E_{oe}$  = Módulo de elasticidad de la madera en ondas de esfuerzo (Pa)

$V_{oe}$  = Velocidad de las ondas de esfuerzo (m/s)

$\rho_{CH}$  = Densidad de la madera a un contenido de humedad CH ( $\text{kg/m}^3$ )

#### Diseño experimental

Se diseñó un análisis siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez-Pulido y de la Vara-Salazar (2012). Los cálculos estadísticos fueron realizados con el programa *Statgraphics*<sup>®</sup>. El experimento realizó un análisis de varianza (ANOVA) de la densidad, de la velocidad de las ondas de esfuerzo y del módulo de elasticidad de la madera como las variables de respuesta evaluadas para cada una de las especies *S. humilis*, *A. acuminata*, *F. americana* y *F. uhdei*. La especie de madera fue considerada el factor de variación. El contenido de humedad de la madera se estima como una variable fija. Se efectuaron 3 pruebas con 32 réplicas en cada especie. El promedio de las 3 pruebas se consideró como valor particular para cada probeta.

#### Resultados y discusión

La Tabla 1 presenta la densidad, la velocidad de las ondas de esfuerzo y el módulo de elasticidad de la madera de *S. humilis*, *A. acuminata*, *F. americana* y *F. uhdei*.

Los valores promedio de los parámetros  $\rho_H$ ,  $V_{oe}$  y  $E_{oe}$  son congruentes con la magnitud de características físicas y mecánicas para maderas de densidades similares, propuestas por Sotomayor-Castellanos (2015). Los valores de los coeficientes de variación son próximos a los encontrados en investigaciones anteriores con maderas tropicales mexicanas (Tamarit-Urias y López-Torres, 2007).

La densidad resultó ser un predictor de la velocidad de onda con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.51, para un nivel de confianza de 95% (Figura 2). Para el módulo de elasticidad, en relación a la densidad, la Figura 3 explica que los resultados de *A. acuminata*, *F. americana* y *F. uhdei*, se agrupan y los de *S. humilis* se distinguen. En efecto, para fines de diseño de productos de madera, este resultado sugiere que las tres especies se pueden agrupar. En contraste, *S. humilis* debe considerarse como una madera diferente. Estos corolarios, deducidos a partir de la observación de la Figura 3 coinciden numéricamente, como se muestra en la Tabla 1. De tal forma, que pruebas estadísticas se hace necesarias para esclarecer el significado de los resultados.

	$\rho_{CH}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$V_{oe}$ (m/s)	$E_{oe}$ (MPa)
<i>Swietenia humilis</i>			
$\bar{x}$	807	3,433	9,556
$\Sigma$	33.40	331.12	1,710
CV	4.14	9.65	17.89
<i>Alnus acuminata</i>			
$\bar{x}$	589	4,240	10,607
$\Sigma$	23.57	214.43	1,071
CV	4.00	5.06	10.09
<i>Fraxinus americana</i>			
$\bar{x}$	656	4,132	11,212
$\Sigma$	35.49	198.05	1,172
CV	5.41	4.79	10.46
<i>Fraxinus uhdei</i>			
$\bar{x}$	651	3,939	10,122
$\sigma$	30.96	132.76	978.83
CV	4.76	3.37	9.67

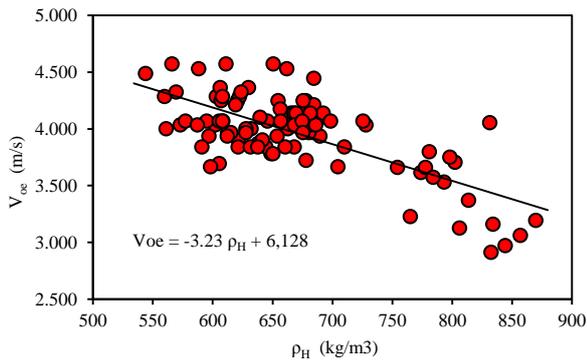
$\rho_{CH}$  = Densidad;  $V_{oe}$  = Velocidad de ondas de esfuerzo;  $E_{oe}$  = Módulo de elasticidad;  $\bar{x}$  = media aritmética;  $\sigma$  = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación (%).

**Tabla 1** Densidad, velocidad de ondas de esfuerzo y módulo de elasticidad.

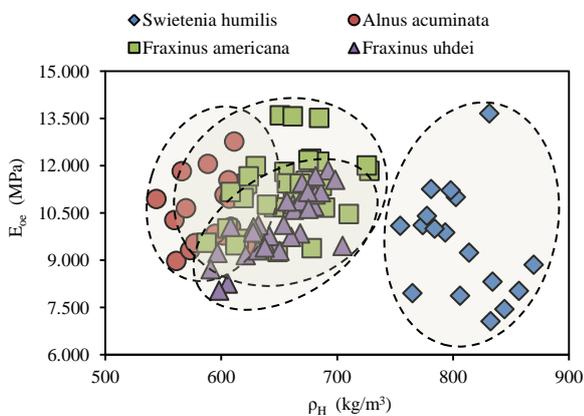
#### Análisis estadístico

Los resultados del análisis de varianza para cada una de las variables de respuesta se presentan en las Tablas de la 2 a la 7.

La Tabla 2 presenta los resultados ANOVA de los datos de la densidad en dos componentes: un componente entre grupos y un componente al interior de grupos. La razón  $F$ , es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado al interior de grupos. Puesto que el valor  $P$  del análisis de varianza es menor que 0.05, existe una diferencia significativa entre las medias de las 4 variables con un nivel del 95% de confianza.



**Figura 2** Dispersión y correlación de la velocidad de las ondas de esfuerzo ( $v_{oe}$ ) en función de la densidad ( $\rho_H$ ) de la madera de *Swietenia humilis*, *Alnus acuminata*, *Fraxinus americana* y *Fraxinus uhdei*.



**Figura 3** Dispersión del módulo de elasticidad ( $E_{oe}$ ) en función de la densidad ( $\rho_H$ ).

Densidad

El análisis de Pruebas de Múltiples Rangos (Tabla 3), determinó cuáles medias son significativamente diferentes de otras. El método empleado para discriminar entre las medias, fue el procedimiento de diferencia mínima significativa de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0. Este tipo de análisis estadístico se aplicó igualmente a las variables velocidad de ondas de esfuerzo y módulo de elasticidad.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P
Entre grupos	448,318	3	149,439	146.97	< 0.0
Intra grupos	95,581	94	1,017		
Total	543,899	97			

GL = Grados de libertad.

**Tabla 2** Resultados del análisis de varianza para la densidad.

$\rho_H$	Media	Grupos homogéneos		
<i>A. acuminata</i>	589	X		
<i>F. uhdei</i>	651		X	
<i>F. americana</i>	656		X	
<i>S. humilis</i>	807			X
Contraste	Sig.	Diferencia +/-	Límites	
<i>S. humilis</i> - <i>A. acuminata</i>	*	217.9	21.71	
<i>S. humilis</i> - <i>F. americana</i>	*	151.1	19.00	
<i>S. humilis</i> - <i>F. uhdei</i>	*	156.0	19.00	
<i>A. acuminata</i> - <i>F. americana</i>	*	-66.8	19.00	
<i>A. acuminata</i> - <i>F. uhdei</i>	*	-61.9	19.00	
<i>F. americana</i> - <i>F. uhdei</i>		4.9	15.83	

\* indica una diferencia significativa (Sig.) de 95%.

**Tabla 3** Pruebas de múltiple rangos para la densidad.

En la parte superior de la Tabla 3, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's, es decir se pueden agrupar los resultados de *F. uhdei* y *F. americana*. La mitad inferior de la Tabla 3, muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 5 pares indica que estos pares muestran diferencias significativas con un nivel del 95% de confianza, resultado que verifica la deducción anterior.

Velocidad de onda

La Tabla 4 presenta los resultados del ANOVA de los datos de la velocidad de onda en dos componentes: un componente entre grupos y un componente al interior de grupos.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P
Entre grupos	$7.02 \times 10^6$	3	$2.34 \times 10^6$	51.74	< 0.0
Intra grupos	$4.25 \times 10^6$	94	45,227		
Total	$1.13 \times 10^7$	97			

GL = Grados de libertad.

**Tabla 4** Resultados ANOVA para la velocidad de ondas de esfuerzo.

Para el caso de la variable de respuesta velocidad de ondas de esfuerzo, la Tabla 4 explica que el valor P del ANOVAF fue menor que 0.05, en consecuencia, existe una diferencia significativa entre las medias de las 4 variables con un nivel del 95% de confianza. Es decir, los valores de las velocidades de onda son diferentes para cada especie estudiada.

En la parte superior de la Tabla 5, se han identificado las especies *F. americana* y *A. acuminata* como grupos homogéneos, lo cual significa que no existen diferencias significativas entre estas maderas con lo que respecta a sus parámetros elásticos. Efectivamente, en la parte inferior de la Tabla 5, se identifican las especies *A. acuminata* - *F. americana* como maderas con módulos de elasticidad sin diferencias significativas.

$V_{oe}$	Media	Grupos Homogéneos		
<i>S. humilis</i>	3,432	X		
<i>F. uhdei</i>	3,939		X	
<i>F. americana</i>	4,132			X
<i>A. acuminata</i>	4,240			X
Contraste	Sig.	Diferencia	+/-	Límites
<i>S. humilis</i> - <i>A. acuminata</i>	*	-807.9	144.83	
<i>S. humilis</i> - <i>F. americana</i>	*	-699.2	126.73	
<i>S. humilis</i> - <i>F. uhdei</i>	*	-506.4	126.73	
<i>A. acuminata</i> - <i>F. americana</i>		108.7	126.73	
<i>A. acuminata</i> - <i>F. uhdei</i>	*	301.5	126.73	
<i>F. americana</i> - <i>F. uhdei</i>	*	192.8	105.56	

$V_{oe}$  = Velocidad de las ondas de esfuerzo; \* indica una diferencia significativa (Sig.) de 95%.

**Tabla 5** Pruebas de múltiples rangos para la velocidad de las ondas de esfuerzo.

### Módulos de elasticidad

La Tabla 6 presenta un valor P de del ANOVA que es menor que 0.05. De tal forma, que se puede proponer que existe una diferencia significativa entre las medias de los 4 módulos de elasticidad observados.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	$3.601 \times 10^7$	3	$1.200 \times 10^7$	8.21	0.0001
Intra grupos	$1.374 \times 10^8$	94	$1.462 \times 10^6$		
Total (Corr.)	$1.73 \times 10^8$	97			

GL = Grados de libertad.

**Tabla 6** Resultados ANOVA para el módulo de elasticidad.

En la parte superior de la Tabla 7, se han identificado 3 grupos homogéneos, identificados por las columnas que comparten las X's en las columnas. La mitad inferior de la Tabla 7, muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 3 pares indica que los pares *S. humilis* - *A. acuminata*, *S. humilis* - *F. americana* y *F. americana* - *F. uhdei* muestran diferencias significativas.

$E_{oe}$	Media	Grupos Homogéneos		
<i>S. humilis</i>	9,556	X		
<i>F. uhdei</i>	10,122	X	X	
<i>A. acuminata</i>	10,607		X	X
<i>F. americana</i>	11,212			X
Contraste	Sig.	Diferencia	+/-	Límites
<i>S. humilis</i> - <i>A. acuminata</i>	*	-1,051	823.49	
<i>S. humilis</i> - <i>F. americana</i>	*	-1,656	720.56	
<i>S. humilis</i> - <i>F. uhdei</i>		-566	720.56	
<i>A. acuminata</i> - <i>F. americana</i>		-604	720.56	
<i>A. acuminata</i> - <i>F. uhdei</i>		485	720.56	
<i>F. americana</i> - <i>F. uhdei</i>	*	1,089	600.22	

$E_{oe}$  = Módulo de elasticidad; \* indica una diferencia significativa (Sig.) de 95%.

**Tabla 7** Pruebas de múltiples rangos para el módulo de elasticidad.

**Conclusiones**

Las ondas de esfuerzo, fueron de utilidad en la caracterización mecánica de la madera.

La densidad, la velocidad de onda y el módulo de elasticidad de las especies de *S. humilis*, *A. acuminata*, *F. americana* y *F. uhdei*, son diferentes. Particularmente, el módulo de elasticidad de *S. humilis*, se distingue de las otras especies.

Las cuatro especies deben ser consideradas como diferentes para fines de diseño y cálculo estructural.

**Referencias**

- 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.
- Fuentes-Salinas, M. (2000). Estimación del Punto de Saturación de la Fibra (PSF) de las maderas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 6(1), 79-81.
- Grabianowski, M., Manley, B., & Walker, J.C.F. (2006). Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber. *Wood Science and Technology*, 40, 205-216.
- Gutiérrez-Pulido, H., & de la Vara-Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México. McGraw Hill. 564 p.
- Han, G., Wu, Q., & Wang, X. (2006). Stress-wave velocity of wood-based panels: Effect of moisture, product type, and material direction. *Forest Products Journal*, 56(1), 28-33.
- International Organization for Standardization. (ISO). (2014). ISO 13061-1:2014. Wood - Determination of moisture content for physical and mechanical tests. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland.
- Íñiguez, G., Arriaga, F., Barrett, J.D., & Esteban, M. (2007). Visual grading of large structural coniferous sawn timber according to Spanish Standard UNE 56544. *Forest Products Journal*, 57, 45-50.
- Kang, H., & Booker, R.E. (2002). Variation of stress wave velocity with MC and temperature. *Wood Science and Technology*, 36, 41-54.
- Kawamoto, S., & Williams, R.S. (2002). Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Techniques for Wood and Wood-Based Composites – A Review. Gen. Tech. Rep. FPL-GRT-134. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. USA. 16 p.
- Matthews, B., Zombori, B., & Divós, F. (1994). The effect of moisture content and temperature on the stress wave parameters. In: Proceedings of the first European symposium on nondestructive evaluation of wood. Hungary. pp: 261-269.
- Pellerin, R.F., & Ross, R.J. Editors. (2002). *Nondestructive Evaluation of Wood*. Forest Products Society. USA. 210 p.
- Ross, R.J., Zerbe, J.I., Wang, X., Green, D.W., & Pellerin, R.F. (2005). Stress wave nondestructive evaluation of Douglas-fir peeler cores. *Forest Products Journal*, 55(3), 90-94.
- Sotomayor-Castellanos, J.R. (2015). *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 65 p.
- Sotomayor-Castellanos, J.R., & M. Ramírez-Pérez. (2013). Densidad y características higroscópicas de maderas mexicanas. Base de datos y criterios de clasificación. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 9(3), 3-32.

Sotomayor-Castellanos, J.R., García-Mariscal, L.J., Hernández-Maldonado, S.A., Moya-Lara, C.E., & Olgún-Cerón, J.B. (2011). Dispositivo de usos múltiples para pruebas no destructivas en madera y materiales compuestos de madera. Ultrasonido, Ondas de esfuerzo y Vibraciones transversales. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 7(3), 20-33.

Tamarit-Urias, J.C., & López-Torres, J.L. (2007). *Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México*. Libro técnico No. 3. INIFAP-CIR Golfo Centro, Campo experimental San Martinito. Tlahuapan, Puebla, México. 264 p.