

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

Variabilidad en las densidades, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos en tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas*

Variability in Densities, Ultrasound Speeds and Dynamic Modulus in Three Mexican and Three Japanese Woods

JAVIER RAMÓN SOTOMAYOR CASTELLANOS **

ISRAEL MACEDO ALQUICIRA ***

HUGO LUIS CHÁVEZ GARCÍA ****

* La investigación estuvo patrocinada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), México. El material experimental de maderas japonesas fue donado por Tomoyuki Hayashi y Koji Adachi, ambos profesores de la Universidad Prefectural de Akita, Japón, y por Ryuichi Iida, profesor de la Universidad Politécnica de Tokio, Japón. Las pruebas de ultrasonido se realizaron en el Laboratorio de Materiales Ing. Luis Silva Ruelas de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH. Ernesto Mendoza González, alumno de la Maestría de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la UMSNH colaboró en los trabajos de laboratorio.

** Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1527-8801>

Correspondencia: madera999@yahoo.com

*** Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6432-6574>

**** Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6114-4900>



Resumen

La variabilidad en los valores experimentales de la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico puede estar asociada al efecto de las propiedades intrínsecas de la madera y ser diferente entre especies y sus direcciones de anisotropía. Para verificar esta hipótesis, el objetivo de la investigación fue determinar estos parámetros en tres maderas mexicanas: *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus* spp., y en tres maderas japonesas: *Paulownia tomentosa*, *Cryptomeria japonica* y *Fagus crenata*. Se realizaron pruebas de ultrasonido en las direcciones radial, tangencial y longitudinal; igualmente, se determinaron las relaciones de anisotropía y las longitudes de onda. Los valores de las densidades, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos para las maderas de *P. pseudostrobus*, *T. rosea*, *Quercus* spp., *P. tomentosa*, *C. japonica* y *F. crenata* presentan una amplia diversidad entre especies y en una especie. Esta variabilidad se puede caracterizar con los coeficientes de variación y de determinación. Las pruebas de ultrasonido son útiles para confirmar el carácter anisotrópico de la velocidad del ultrasonido y del módulo de elasticidad de la madera. Para esto, es suficiente un tamaño de muestra de 35 probetas orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal.

Palabras clave: anisotropía, coeficiente de determinación, coeficiente de variación, longitud de onda, tamaño de muestra, variabilidad en la madera.

Abstract

The variability in the experimental values of the density, the speed of ultrasound, and the dynamic modulus may be associated with the effect of the intrinsic properties of wood, and they are different between species and their directions of anisotropy. To verify this hypothesis, the objective of the investigation was to determine these parameters in three Mexican woods: *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea*, and *Quercus* spp; and from three Japanese woods: *Paulownia tomentosa*, *Cryptomeria japonica*, and *Fagus crenata*. Ultrasound tests were performed in the radial, tangential, and longitudinal directions, and the anisotropy relationships and wavelengths were determined. The values of the densities, the speeds of ultrasound, and the dynamic modules for the woods of *P. pseudostrobus*, *T. rosea*, *Quercus* spp, *P. tomentosa*, *C. japonica*, and *F. crenata* present a wide and diverse range, both inter- and intra-species. This variability can be characterized with the coefficients of variation and determination. Ultrasound tests are useful for confirming the anisotropic character of ultrasound speed and modulus of elasticity of wood. For this, a sample size of 35 specimens oriented in the radial, tangential, and longitudinal directions is sufficient.

Keywords: anisotropy, coefficient of determination, coefficient of variation, sample size, variability in wood, wavelength.

I. INTRODUCCIÓN

La densidad de la madera, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico varían entre especies y en un árbol [1]-[3]. Sus magnitudes están relacionadas con las principales propiedades básicas del material:

1. La variabilidad en la extensión de los parámetros físicos entre especies, árboles y localización relativa en cada individuo [4], [5].
2. La heterogeneidad en su organización jerárquica: volumen mínimo representativo a escala macroscópica, capa de crecimiento a nivel meso y pared celular en escala microscópica [6], [7].
3. La anisotropía de sus características físicas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal [8], [9].
4. La higroscopía del tejido celular que modifica las propiedades físicas de la madera [10], [11].

Asimismo, las particularidades de cada configuración experimental y la calidad tecnológica de las probetas amplían las diferencias en los valores reportados en la literatura [12], [13]. De tal forma, el valor numérico del módulo de elasticidad de una especie reportado en la literatura se relaciona con una densidad y se asocia con etiquetas referentes al contenido de humedad, a la dirección de anisotropía o al método de determinación. Además, las cotas tabuladas representan valores promedio acompañados de su desviación estándar o del coeficiente de variación [14], [15].

Existe evidencia empírica de que la densidad de la madera es un buen predictor del módulo dinámico determinado con pruebas que miden la velocidad del ultrasonido [3], [16]. Sin embargo, subsisten discrepancias en las correlaciones reportadas entre la densidad y la velocidad del ultrasonido. Algunas investigaciones obtienen fuertes coeficientes de determinación entre estos parámetros [17]-[19]; en cambio, otras reportan coeficientes de determinación débiles [20]-[22]. Estos corolarios se refieren, principalmente, a mediciones de las velocidades en la dirección longitudinal y son independientes de las especies en estudio o de la técnica experimental. Para las direcciones radial y tangencial, existe poca información sobre las relaciones entre la densidad y la velocidad del ultrasonido [11], [23].

Para caracterizar especies maderables y promocionar su uso como productos de ingeniería, el paradigma vigente es proporcionar datos derivados de pruebas en especímenes con dimensiones de empleo [24], [25]. Otro enfoque es la realización de pruebas con protocolos experimentales *ad hoc* para investigar el efecto de tratamientos y tecnologías que modifican las propiedades naturales de la madera [26], [27]. Así, los reportes usual-

mente no detallan el tamaño y la normalidad estadística de las muestras analizadas, ni datos de verificación de su varianza. Los estudios estadísticos se concentran en el análisis de varianza y se complementan con correlaciones entre las variables estudiadas.

La argumentación precedente sugiere que la variabilidad en los valores experimentales de la densidad, de la velocidad del ultrasonido y del módulo dinámico puede estar asociada al efecto de las propiedades intrínsecas de la madera. Tal interrogante guía esta investigación y se propone como hipótesis de trabajo que la variabilidad en las magnitudes de las densidades de la madera, de las velocidades del ultrasonido y de sus módulos dinámicos son diferentes entre especies y sus direcciones de anisotropía. Con todo, esta variación es cuantificable. Para verificar experimentalmente esta hipótesis, el objetivo de la investigación es determinar estos parámetros en muestras estadísticamente representativas de tres maderas mexicanas: *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus* spp., y de tres maderas japonesas: *Paulownia tomentosa*, *Cryptomeria japonica* y *Fagus crenata*. La propuesta está delimitada al estudio de la madera representada por probetas de pequeñas dimensiones y libres de anomalías de crecimiento.

II. METODOLOGÍA

La unidad experimental consistió en madera de *P. pseudostrobus*, *T. rosea*, *Quercus* spp., *P. tomentosa*, *C. japonica* y *F. crenata*. De cada especie se prepararon 35 probetas con dimensiones de 0,01 m en la dirección radial (R), de 0,15 m en la dirección tangencial (T) y 0,15 m en la dirección longitudinal (L). La madera se acondicionó a un contenido de humedad promedio del 11 % y se previó que no mostrara defectos de crecimiento.

Las densidades aparentes se calcularon con la relación peso-volumen. Las pruebas dinámicas consistieron en medir el tiempo de transmisión del ultrasonido en las direcciones radial, tangencial y longitudinal con el aparato V-Meter MK IV (Frecuencia (f) = 54 kHz, precisión = 0,1 μ s) marca James Instruments (figura 1). Las velocidades de propagación del ultrasonido se calcularon con las distancias de recorrido entre los intervalos de tiempo de transmisión (figura 2). Los módulos dinámicos se calcularon con la ecuación (1):

$$E_{us} = \rho_{CH} v_{us}^2 \quad (1)$$

Donde:

E_{us} = Módulo dinámico ($N\ m^{-2}$)

ρ_{CH} = Densidad ($kg\ m^{-3}$)

v_{us} = Velocidad del ultrasonido ($m\ s^{-1}$)

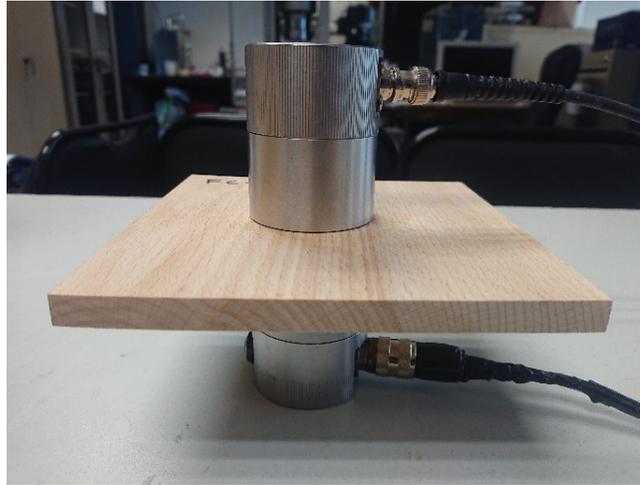


FIGURA 1. PRUEBAS DE ULTRASONIDO.

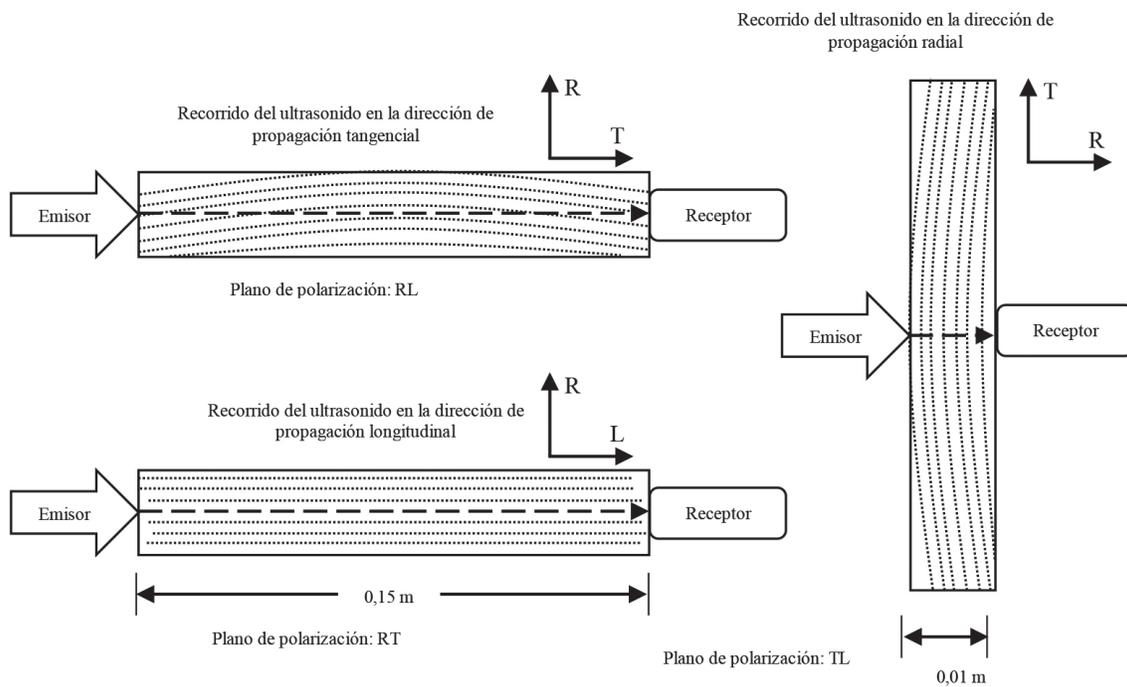


FIGURA 2. CONFIGURACIÓN DE LAS PRUEBAS DE ULTRASONIDO.

A. Diseño experimental

Las variables de respuesta fueron las densidades y las velocidades. Los módulos dinámicos se consideraron variables derivadas (ecuación 1). Las variables se agruparon

en muestras según las seis especies y las tres direcciones de medición. Para cada muestra, se calcularon las medias, las desviaciones estándar y los coeficientes de variación. Se realizaron pruebas de normalidad, y cuando las pruebas indicaron distribuciones anormales, se procedió a realizar análisis de medianas de Kruskal-Wallis. Para cada grupo de seis muestras correspondientes a las seis especies, se verificó la igualdad de varianzas con la hipótesis con un nivel de significancia del 95 % ($\alpha = 0,05$).

A continuación, se practicaron análisis de varianza con la hipótesis nula con un nivel de significancia del 95 % ($\alpha = 0,05$). El criterio de demarcación fue aceptar una diferencia estadísticamente significativa para valores $P_{(\alpha = 0,05)} \leq 0,05$. A fin de identificar cuáles niveles se diferenciaron en el análisis de varianza, se realizaron pruebas de rangos múltiples. Se calcularon las regresiones lineales y los coeficientes de determinación de las velocidades, así como los módulos dinámicos en función de las densidades. Las ponderaciones para calificar la intensidad de las correlaciones fueron los valores del coeficiente de determinación sugeridos por [22]: correlación muy alta: $1 \geq R^2 \geq 0,9$; correlación alta: $0,9 > R^2 \geq 0,7$; correlación media: $0,7 > R^2 \geq 0,4$; correlación baja: $0, > R^2 \geq 0,2$; y correlación nula: $R^2 < 0,2$. Se calcularon las relaciones de anisotropía entre las direcciones tangenciales y radiales. Los tamaños de las muestras se calcularon con la ecuación (2) y las longitudes de onda con la ecuación (3):

$$n = 2 \sigma^2 / e^2 \quad (2)$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra

σ = Desviación estándar

e = Error de estimación aceptable (0,05)

$$\lambda = v_{us} / f \quad (3)$$

Donde:

λ = Longitud de onda (m)

v_{us} = Velocidad del ultrasonido ($m s^{-1}$)

f = Frecuencia del emisor (54 kHz)

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Densidades

Los valores medios y los coeficientes de variación de las densidades se enumeran en la tabla 1. Sus magnitudes son similares a las reportadas en la literatura para maderas mexicanas [28] y para las especies japonesas [29]-[31]. Las pruebas de normalidad indican valores del sesgo y del apuntamiento en el intervalo que marca el criterio de demarcación del diseño experimental. De tal forma, el análisis de varianza señala que las seis especies se diferencian entre ellas por su densidad. Sin embargo, las pruebas de rangos múltiples indican grupos homogéneos para *P. pseudostrobus* y *F. crenata*.

TABLA 1. DENSIDADES, VELOCIDADES Y MÓDULOS DINÁMICOS

Especies	ρ_{CH} (kg m ⁻³)	$v_{us R}$ (m s ⁻¹)	$v_{us T}$ (m s ⁻¹)	$v_{us L}$ (m s ⁻¹)	$E_{us R}$ (MN m ⁻²)	$E_{us T}$ (MN m ⁻²)	$E_{us L}$ (MN m ⁻²)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	620 (17) [#]	2216 (5)	1355 (13)	6000 (4)	3043 (19)	1191 (38)	22 457 (21)
<i>Tabebuia rosea</i>	776 (10)	2127 (6)	1643 (11)	5183 (6)	3513 (13)	2141 (30)	20 943 (17)
<i>Quercus spp.</i>	976 (3)	2391 (7)	1583 (4)	5835 (3)	5603 (14)	2447 (8)	33 276 (8)
<i>Paulownia tomentosa</i>	266 (8)	2277 (9)	1203 (10)	4578 (8)	1389 (19)	390 (24)	5611 (17)
<i>Cryptomeria japonica</i>	421 (5)	2039 (9)	1377 (14)	5064 (12)	1768 (21)	818 (32)	10 934 (24)
<i>Fagus crenata</i>	629 (3)	2047 (7)	1757 (5)	4714 (4)	2644 (12)	1949 (12)	13 992 (9)

ρ_{CH} = densidad; v = velocidad del ultrasonido; E = módulo dinámico; us = ultrasonido; R = radial; T = tangencial; L = longitudinal; [#]Coefficiente de variación en por ciento.

El cálculo del número mínimo de probetas para asegurar un tamaño de muestra representativo (tabla 2) fue menor que los 35 ejemplares observados por especie; excepción hecha para *P. pseudostrobus* cuyo tamaño de la muestra mínimo requerido es de 46 probetas. El amplio intervalo de densidades medidas sugiere que la variabilidad en las magnitudes de las densidades es cuantitativamente diferente entre especies.

Además, los valores mínimos de los coeficientes de variación son para *Quercus* spp. y *F. crenata* (3 %) y alcanzan un máximo para *P. pseudostrobus* (17 %).

TABLA 2. TAMAÑOS NECESARIOS DE LAS MUESTRAS

	n	n	n
	<i>Pinus pseudostrobus</i>	<i>Tabebuia rosea</i>	<i>Quercus</i> spp.
ρ_{CH}	46	17	2
v_{us} R	4	5	8
v_{us} T	25	20	2
v_{us} L	3	5	1
	<i>Paulownia tomentosa</i>	<i>Cryptomeria japonica</i>	<i>Fagus crenata</i>
ρ_{CH}	10	4	1
v_{us} R	13	14	7
v_{us} T	16	32	4
v_{us} L	9	22	4

ρ_{CH} = densidad; v = velocidad del ultrasonido; us = ultrasonido; R = radial; T = tangencial; L = longitudinal; n = tamaño necesario de la muestra.

B. Velocidades del ultrasonido

Los valores medios y coeficientes de variación de las velocidades se enumeran en la tabla 1. Los coeficientes de variación son diferentes para cada especie y dirección de medida. No se distingue ninguna tendencia en la variación en cada muestra. Sus magnitudes son similares a las reportadas en la literatura para maderas mexicanas medidas con ultrasonido [28] y para las especies japonesas medidas con ondas de esfuerzo [32].

En las direcciones tangencial y longitudinal de la madera, las distancias de recorrido de la onda son de 0,15 m (figura 2). En estas direcciones, el área de contacto de las probetas es menor de la superficie de los sensores. En cambio, en la dirección radial, el tiempo de transmisión representa la medición de la superficie total de los sensores en contacto con la superficie de las probetas y la distancia de recorrido es de 0,01 m. Dado que la velocidad del ultrasonido está calculada a partir del tiempo de transmisión de un paquete de ondas delimitado por la superficie de contacto de los sensores emisor y receptor con diámetro de 0,05 m de diámetro, y debido a la forma de las probetas (figura 1), las distancias de recorrido son diferentes según la dirección de anisotropía y, posiblemente, influyen en la variación de los resultados.

Las regresiones entre las velocidades y las densidades, diferenciando especie por especie, indican coeficientes de determinación de nulos a muy bajos (tabla 3), con excepción de la velocidad longitudinal de *P. pseudostrobus* ($R^2 = 0,60$) que califica como medio. En el mismo tenor, considerando como una sola muestra el conjunto de velocidades de las seis especies (220 mediciones), los coeficientes de determinación entre las velocidades y las densidades van de correlación nula para las velocidades radiales a correlaciones bajas para las velocidades tangenciales y longitudinales. Dado que las regresiones se derivan de mediciones en muestras comunes, realizadas en semejantes condiciones experimentales y con el mismo aparato, el error de las mediciones, introducido en la predicción del parámetro dependiente y la precisión del parámetro medido para explicar el parámetro dependiente, está incluido en el valor de R^2 [33].

TABLA 3. COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN

	$v_{us} R$	$v_{us} T$	$v_{us} L$	$E_{us} R$	$E_{us} T$	$E_{us} L$
	(R^2)					
<i>Pinus pseudostrobus</i>	0,03	0,60	0,12	0,71	0,83	0,87
<i>Tabebuia rosea</i>	0,05	0,20	0,01	0,35	0,45	0,53
<i>Quercus spp.</i>	<0,01	0,04	0,31	0,03	0,05	0,64
<i>Paulownia tomentosa</i>	<0,01	0,04	0,01	0,15	0,28	0,29
<i>Cryptomeria japonica</i>	0,04	0,20	<0,01	0,18	0,31	0,03
<i>Fagus crenata</i>	0,07	0,31	0,08	0,01	0,47	<0,01
Promedio seis especies	0,04	0,38	0,29	0,84	0,82	0,86

v = velocidad del ultrasonido; E = módulo dinámico; us = ultrasonido; R = radial; T = tangencial; L = longitudinal; R^2 = coeficiente de determinación.

Estos resultados son similares a los reportados por [20] sobre coeficientes de determinación bajos ($R^2 = 0,15$) asociados a correlaciones entre las velocidades longitudinales y las densidades de cinco especies. Estos investigadores concluyen que la velocidad del ultrasonido en la madera probablemente es influenciada por la microestructura de cada especie en particular y no recomiendan predecir la velocidad basándose solo en la densidad. En el mismo sentido, [34] reporta coeficientes de determinación bajos ($R^2 = 0,13$) en correlaciones entre velocidades longitudinales y densidades para 53 especies.

El cálculo del número mínimo de probetas para asegurar un tamaño de muestra representativo (ecuación 2) fue menor que los 35 ejemplares observados por especie (tabla 2). No obstante, las pruebas de normalidad de las velocidades indican valores del sesgo y del apuntamiento fuera del intervalo que marca el criterio de demarca-

ción del diseño experimental. Las pruebas de Kruskal-Wallis indican que las seis especies se diferencian entre ellas por su velocidad. Sin embargo, las pruebas de rangos múltiples indican grupos homogéneos para diferentes pares de especies de acuerdo con las direcciones de anisotropía. Las velocidades radiales son homogéneas para *C. japonica* con *F. crenata* y para *P. pseudostrobus* con *P. tomentosa*. Las velocidades tangenciales son similares para *P. pseudostrobus* y *C. japónica* y para *Quercus spp* y *T. rosea*. Las velocidades longitudinales son homogéneas para *P. tomentosa* y *F. crenata*, así como para *C. japónica* y *T. rosea*.

Las anisotropías promedio calculadas (tabla 4) son $v_{us} T/R = 0,68$ y $v_{us} L/R = 2,4$. Estos valores son próximos a los reportados por [28] para maderas mexicanas: $v_{us} T/R = 0,45$ y $v_{us} L/R = 1,48$. Igualmente, las anisotropías son del mismo orden de las reportadas por [35] para *Eucalyptus globulus* ($\rho_{CH} = 854 \text{ kg m}^{-3}$): $v_{us} T/R = 0,67$ y $v_{us} L/R = 2,66$.

TABLA 4. RELACIONES DE ANISOTROPÍA Y LONGITUDES DE ONDA

Especies	R/R	T/R	L/R	R/R	T/R	L/R	λ_R	λ_T	λ_L
	v_{us}	v_{us}	v_{us}	E_{us}	E_{us}	E_{us}	(m)	(m)	(m)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	1,0	0,61	2,7	1,0	0,4	7,4	0,044	0,031	0,116
<i>Tabebuia rosea</i>	1,0	0,77	2,4	1,0	0,6	6,0	0,043	0,039	0,107
<i>Quercus spp.</i>	1,0	0,66	2,4	1,0	0,4	5,9	0,052	0,033	0,113
<i>Paulownia tomentosa</i>	1,0	0,53	2,0	1,0	0,3	4,0	0,055	0,027	0,095
<i>Cryptomeria japonica</i>	1,0	0,68	2,5	1,0	0,5	6,2	0,046	0,037	0,125
<i>Fagus crenata</i>	1,0	0,86	2,3	1,0	0,7	5,3	0,044	0,036	0,094
Promedio seis especies	1,0	0,68	2,40	1,0	0,49	5,80	0,047	0,034	0,108

v = Velocidad del ultrasonido; E = módulo dinámico; us = ultrasonido; R = radial; T = tangencial; L = longitudinal ; λ = longitud de onda.

La variabilidad de las velocidades entre especies se comprueba por la comparación de los valores medios para cada una de sus direcciones de anisotropía. De igual modo, la variabilidad en cada especie se demuestra con los diferentes coeficientes de variación. Estos resultados verifican la hipótesis en lo concerniente a poder cuantificar la variación y la anisotropía de las velocidades.

La influencia de la variabilidad de la madera a nivel microanatómico (que comprende células, rayos y canales resiníferos), así como a nivel mesoanatómico (que se refiere a una capa de crecimiento, compuesta de una capa de madera temprana y otra de madera tardía), puede moderarse eligiendo la frecuencia del emisor para que las longitudes de onda en el material se encuentren en un rango entre la dimensión máxima de los elementos anatómicos y la dimensión mínima de la muestra [36]. En esta investigación, el diámetro máximo de las células/fibras o elementos de vaso en el plano radial-tangencial se estima en 0,001 m y en la dirección longitudinal el largo de las células/fibras o elementos de vaso en 0,005 m [6], [37], [38]. Estos datos son menores que las dimensiones de las aristas de las probetas en las direcciones tangencial y longitudinal en 0,15 m. Para la dirección radial, la arista es de 0,01 m.

Las longitudes de onda calculadas con la ecuación (3), utilizando las velocidades registradas en cada especie y dirección (tabla 4), son mayores que la longitud de onda prevista por la ecuación (4). En la figura 3, se esquematizan los valores del diámetro celular y del espesor máximo de una capa de crecimiento (0,01 m) considerado en esta investigación. Las escalas de estos parámetros no son proporcionales para fines ilustrativos. En este sentido, las longitudes de onda son mayores que los diámetros celulares y los espesores de las capas de crecimiento en las direcciones radial y tangencial (figura 3). Para la dirección longitudinal, las longitudes de onda son también mayores que el largo de las células. Así, se puede suponer que la onda no se dispersó ni atenuó de manera significativa [36], [39].

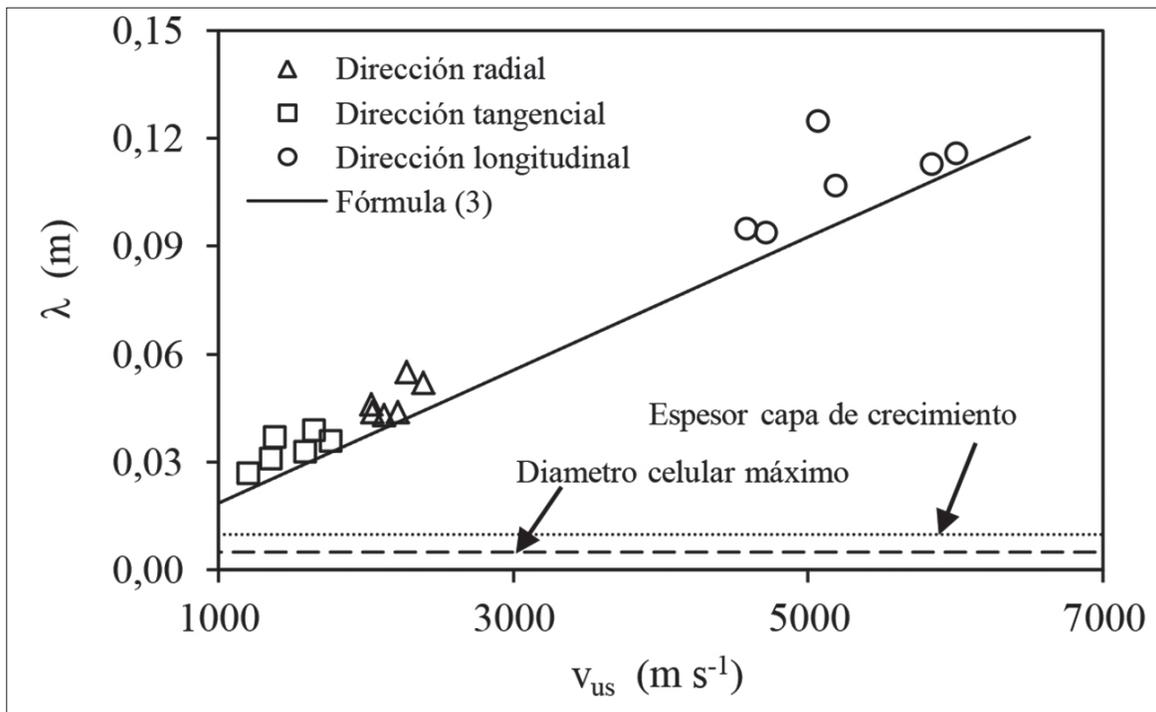


FIGURA 3. LONGITUDES DE ONDA EN FUNCIÓN DE LAS VELOCIDADES.

Las longitudes de onda promedio de esta investigación fueron $\lambda_R = 0,047$ m, $\lambda_T = 0,034$ m y $\lambda_L = 0,108$ m (tabla 4), que son similares a las reportadas por [39] para *Picea abies* ($\rho_{CH} = 476$ kg m⁻³), las cuales se calcularon a partir de velocidades de ultrasonido utilizando sensores con frecuencia de 50 kHz, similares a los de esta investigación ($\lambda_R = 0,045$ m, $\lambda_T = 0,040$ m y $\lambda_L = 0,120$ m).

Para minimizar el efecto de la propagación del ultrasonido en un medio finito, la distancia entre los sensores, es decir, la distancia de recorrido (d), debe ser mayor de la longitud de onda (λ) [40]. En esta investigación, la distancia entre sensores para la dirección radial (d_R) es de 0,01 m, cantidad menor que la longitud de onda en esta dirección ($\lambda_R = 0,24$ m, tabla 4). En cambio, las distancias correspondientes a las direcciones tangencial y longitudinal satisfacen este requerimiento. Así, d_T (0,15 m) es mayor 4,4 veces que λ_T (0,034 m) y d_L (0,15 m) es 1,4 veces mayor que λ_L (0,108 m). De tal forma, las mediciones en las direcciones tangencial y longitudinal son suficientes para caracterizar el fenómeno del ultrasonido en las probetas de esta investigación. Sin embargo, en la dirección radial, no son necesariamente tan precisas como las mediciones reportadas en [11] y [15] con probetas recortadas específicamente para medir la anisotropía con aparatos más precisos que el utilizado en esta investigación, lo que puede incrementar la variabilidad de las velocidades del ultrasonido.

C. Módulos dinámicos

Los valores medios y los coeficientes de variación de los módulos dinámicos se enumeran en la tabla 1. Sus magnitudes son similares a las reportadas para maderas mexicanas en la bibliografía [16]. Para las maderas japonesas, no se encontraron datos para su comparación; sin embargo, las magnitudes de los módulos dinámicos son menores y proporcionales a los medidos con ondas de esfuerzo [32]. Los coeficientes de variación son diferentes para cada especie y dirección de medida. No se distingue ninguna tendencia en la variación en cada muestra.

Las pruebas de normalidad de las muestras de módulos dinámicos indican irregularidades en sus distribuciones. Sin embargo, las pruebas de Kruskal-Wallis muestran que las seis especies se diferencian entre ellas por su módulo dinámico. Además, las pruebas de rangos múltiples confirman diferencias de los módulos dinámicos entre las seis especies. El cálculo del número mínimo de probetas para asegurar un tamaño de muestra representativo (ecuación 2) fue menor que los 35 ejemplares observados por especie (tabla 2).

Las regresiones entre los módulos dinámicos y las densidades, diferenciando especie por especie, indican coeficientes de determinación desde nulos hasta altos (tabla 3). En el mismo tenor, considerando como una sola muestra el conjunto de velocidades de las seis especies (220 mediciones), los coeficientes de determinación entre los módulos dinámicos y las densidades son altos. Estos resultados son comparables con los reportados por [41] y [42] para modelos estadísticos de módulos dinámicos, determinados con ultrasonido, en función de las densidades.

Las anisotropías promedio calculadas (tabla 4) son $E_{us} T/R = 0,49$ y $E_{us} L/R = 5,80$. Estos valores son mayores de los reportados por [28] para maderas mexicanas $E_{us} T/R = 0,18$ y $E_{us} L/R = 1,8$, y parecidos a los reportados por [35] para *Eucalyptus globulus* ($\rho_{CH} = 854 \text{ kg m}^{-3}$): $E_{us} T/R = 0,48$ y $E_{us} L/R = 9,07$. Estos datos bibliográficos fueron determinados con ultrasonido.

Las magnitudes de los módulos dinámicos varían, entre otros factores, a causa del contenido de humedad de la madera [11], [24] y de la temperatura [36], [43]. En esta investigación, estas dos fuentes de variación se conservaron constantes durante las pruebas de laboratorio, de tal forma que no influyeron en los resultados. Otra fuente de variación es la diversidad del tamaño, la forma y el acomodo de los diferentes componentes estructurales del plano leñoso. Así, el ultrasonido viajó a velocidad diferente según el tipo y la orientación relativa de los elementos anatómicos de cada probeta representativa de una especie de madera [44]. Para verificar la influencia de la estructura anatómica en la variabilidad de las densidades, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos de las maderas en estudio, es necesario cuan-

tificar sus caracteres anatómicos y relacionarlos con los resultados experimentales, aspecto que va más allá de los alcances de esta investigación.

IV. Conclusiones

Los valores de las densidades, de las velocidades del ultrasonido y de los módulos dinámicos para las maderas de *P. pseudostrobus*, *T. rosea*, *Quercus* spp., *P. tomentosa*, *C. japonica* y *F. crenata* presentan una amplia diversidad entre especies y en una especie. Esta variabilidad se puede caracterizar con los coeficientes de variación y de determinación.

Las pruebas de ultrasonido son útiles para confirmar el carácter anisotrópico de la velocidad del ultrasonido y del módulo dinámico de la madera. Para esto, es suficiente un tamaño de muestra de 35 probetas orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal.

REFERENCIAS

- [1] R. Gonçalves, A. J. Trinca y G. C. dos Santos Ferreira, “Effect of coupling media on velocity and attenuation of ultrasonic waves in Brazilian Wood”, *Journal of Wood Science*, vol. 57, no. 4, pp. 282-287, 2011. Doi: 10.1007/s10086-011-1177-y
- [2] M. Hasegawa, M. Takata, J. Matsumura y K. Oda, “Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood”, *Ultrasonics*, vol. 51, no. 3, pp. 296-302, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2010.10.001>
- [3] K., de Borst, T. K. Bader y C. Wikete, “Microstructure-stiffness relationships of ten European and tropical hardwood species”, *Journal of Structural Biology*, 177(2), pp. 532-542, febr. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2011.10.010>
- [4] I. Brémaud, Y. El Kaïm, D. Guibal, K. Minato, B. Thibaut y J. Gril, “Characterisation and categorisation of the diversity in viscoelastic vibrational properties between 98 wood types”, *Annals of Forest Science*, vol. 69, no. 3, pp. 373-386, abr. 2012. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0166-z>
- [5] L. Wagner, T. K. Bader, D. Auty y K. de Borst, “Key parameters controlling stiffness variability within trees: a multiscale experimental-numerical approach”, *Trees*, vol. 27, no. 1, pp. 321-336, febr. 2013. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0801-9>
- [6] D. Guitard y C. Gachet, “Paramètres structuraux et/ou ultrastructuraux facteurs de la variabilité intra-arbre de l’anisotropie élastique du bois”, *Annals of Forest Science*, vol. 61, no. 2, pp. 129-139, 2004. <https://doi.org/10.1051/forest:2004004>

- [7] K. Hofstetter y E. K. “Gamstedt, Hierarchical modelling of microstructural effects on mechanical properties of wood: a review COST Action E35 2004-2008: wood machining-micromechanics and fracture. *Holzforschung*, vol. 63, no. 2, pp. 130-138, 2009. <https://doi.org/10.1515/HF.2009.018>
- [8] I. Brémaud, J. Gril y B. Thibaut, “Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data”, *Wood Science and Technology*, vol. 45, no. 4, pp. 735-754, nov. 2011. <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0393-8>
- [9] Z. Liu, Z. Zhang y R. O. Ritchie, “Structural orientation and anisotropy in biological materials: functional designs and mechanics”, *Advanced Functional Materials*, vol. 30, no. 10, p. 1908121, mzo. 2020. <https://doi.org/10.1002/adfm.201908121>
- [10] P. Dietsch, S. Franke, B. Franke, A. Gamper y S. Winter, “Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts”, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 5, no. 2, pp. 115-127, abr. 2015. <https://doi.org/10.1007/s13349-014-0082-7>
- [11] L. Cheng, J. Dai, Z. Yang, W. Qian, W. Wang, L. Chang, X. Li y Z. Wang, “Theoretical and experimental research on moisture content and wood property indexes based on nondestructive testing”, *BioResources*, vol. 15, no. 1, pp. 1600-1616, 2020.
- [12] U. Dackermann, R. Elsener, J. Li y K. Crews, “A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood”, *Construction and Building Materials*, vol. 102, pp. 963-976, en. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.195>
- [13] E. V. Bachtiar, S. J. Sanabria, J. P. Mittig y P. Niemz, “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*, vol. 51, no. 1, pp. 47-67, en. 2017. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0851-z>
- [14] C. S. Montes, J. C. Weber, R. A. García, D. A. Silva y G. I. Muñiz, “Variation in growth, wood stiffness and density, and correlations between growth and wood stiffness and density in five tree and shrub species in the Sahelian and Sudanian ecozones of Mali”, *Trees*, vol. 31, no. 3, pp. 833-849, en. 2017. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1508-0>
- [15] R. Viala, V. Placet y S. Cogan, “Simultaneous non-destructive identification of multiple elastic and damping properties of spruce tonewood to improve grading”, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 42, pp. 108-116, mzo.-abr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.09.004>
- [16] J. R. Sotomayor Castellanos, “Módulos de elasticidad e índices de calidad de maderas mexicanas: síntesis de datos del Laboratorio de Mecánica de la Madera”, *Investigación e Ingeniería de la Madera*, vol. 15, no. 1, pp. 4-64, 2019.

- [17] F. G. Rosa de Oliveira y A. Sales, "Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods", *Bioresource Technology*, vol. 97, no. 18, pp. 2443-2446, dic. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.050>
- [18] Z. R. Zhou, M. C. Zhao, M. Gong y Z. Wang, "Variation of density and dynamic modulus of elasticity of poplar veneer and its impact on grade yield", *BioResources*, vol. 12, no. 1, pp. 1344-1357, 2017.
- [19] T. Y. Aydin y M. Aydin, "Effect of density and propagation length on ultrasonic longitudinal wave velocity in some important wood species grown in Turkey", *Türkiye Ormanlık Dergisi*, vol. 19, no. 4, pp. 413-418, 2018. Doi: 10.18182/tjf.459005
- [20] J. Baar, J. Tippner y V. Gryc, "The influence of wood density on longitudinal wave velocity determined by the ultrasound method in comparison to the resonance longitudinal method", *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 70, no. 5, pp. 767-769, sep. 2012. <https://doi.org/10.1007/s00107-011-0550-2>
- [21] D. Ponneth, A. E. Vasu, J. C. Easwaran, A. Mohandass y S. S. Chauhan, "Destructive and non-destructive evaluation of seven hardwoods and analysis of data correlation", *Holzforschung*, vol. 68, no. 8, pp. 951-956, 2014. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0193>
- [22] J. Tippner, J. Hrivnák y M. Kloiber, "Experimental evaluation of mechanical properties of softwood using acoustic methods", *BioResources*, vol. 11, no. 1, pp. 503-518, 2016.
- [23] R. Gonçalves, A. J. Trinca y B. P. Pellis, "Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens", *Wood Science and Technology*, vol. 48, no. 2, pp. 269-287, mzo. 2014. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0598-8>
- [24] H. Unterwieser y G. Schickhofer, "Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency-and ultrasonic runtime measurement", *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 69, no. 2, pp. 171-181, my. 2011. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0417-y>
- [25] F. Arriaga, D. F. Llana, M. Esteban y G. Íñiguez-González, "Influence of length and sensor positioning on acoustic time-of-flight (ToF) measurement in structural timber", *Holzforschung*, vol. 71, no. 9, pp. 713-723, 2017. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0214>
- [26] O. Perçin, S. D. Sofuoglu y O. Uzun, "Effects of boron impregnation and heat treatment on some mechanical properties of oak (*Quercus petraea* Liebl.) wood", *BioResources*, vol. 10, no. 3, pp. 3963-3978, 2015.
- [27] S. A. Ahmed y S. Adamopoulos, "Acoustic properties of modified wood under different humid conditions and their relevance for musical instruments", *Applied Acoustics*, vol. 140, pp. 92-99, nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.05.017>
- [28] J. R. Sotomayor Castellanos, L. I. Guridi Gómez y T. García Moreno, "Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas: velocidad del ultrasonido, módulo de

- elasticidad, índice material y factor de calidad: base de datos”, *Investigación e Ingeniería de la Madera*, vol. 6, no. 1, pp. 3-32, 2010.
- [29] B. Anshari, Z. W. Guan, A. Kitamori, K. Jung, I. Hassel y K. Komatsu, “Mechanical and moisture-dependent swelling properties of compressed Japanese cedar”, *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 4, pp. 1718-1725, abr. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.095>
- [30] Y. Miyoshi, K. Kojiro y Y. Furuta, “Effects of density and anatomical feature on mechanical properties of various wood species in lateral tensión”, *Journal of Wood Science*, vol. 64, no. 5, pp. 509-514, oct. 2018. <https://doi.org/10.1007/s10086-018-1730-z>
- [31] W. Hidayat, Y. Qi, J. H. Jang, F. Febrianto y N. H. Kim, “Effect of mechanical restraint on the properties of heat-treated *Pinus koraiensis* and *Paulownia tomentosa* Woods”, *BioResources*, vol. 12, no. 4, pp. 7539-7551, 2017.
- [32] J. R. Sotomayor Castellanos, K. Adachi, R. Iida y T. Hayashi, “Anisotropía en velocidades de onda y módulos dinámicos determinados con ondas de esfuerzo en maderas mexicanas y japonesas”, *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 2020.
- [33] A. Hanhijärvi, A. Ranta-Maunus y G. Turk. (2005). *Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques* [En línea]. Disponible en: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/2005/P568.pdf>
- [34] J. Ilic, “Dynamic MOE of 55 species using small wood beams”, *Holz als Roh-und Werkstoff*, vol. 61, no. 3, pp. 167-172, jun. 2003. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0367-8>
- [35] J. Crespo, J. R. Aira, C. Vázquez y M. Guaita, “Comparative analysis of the elastic constants measured via conventional, ultrasound, and 3-D digital image correlation methods in *Eucalyptus globulus* Labill. *BioResources*, vol. 12, no. 2, pp. 3728-3743, 2017.
- [36] V. Bucur y N. F. Declercq, “The anisotropy of biological composites studied with ultrasonic technique”, *Ultrasonics*, vol. 44, pp. e829-e831, dic. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.203>
- [37] H. G. Richter, D. Grosser, I. Heinz y P. E. Gasson, “IAWA list of microscopic features for softwood identification”, *Iawa Journal*, vol. 25, no. 1, pp. 1-70, en. 2004. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000349>
- [38] E. A. Wheeler, P. Baas y P. E. Gasson, “IAWA list of microscopic features for hardwoods identification”, *IAWA Bulletin*, vol. 10, no. 3, pp. 219-332, 2007.
- [39] C. Kohlhauser y C. Hellmich, “Determination of Poisson’s ratios in isotropic, transversely isotropic, and orthotropic materials by means of combined ultrasonic-mechanical testing of normal stiffnesses: application to metals and wood”, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, vol. 33, pp. 82-98, my.-jun. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2011.11.009>

- [40] A. Bartholomeu, R. Gonçalves y V. Bucur, “Dispersion of ultrasonic waves in *Eucalyptus* lumber as a function of the geometry of boards”, *Scientia Forestalis*, vol. 63, pp. 235-240, 2003.
- [41] I. Brémaud, “Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones: biological and cultural diversity”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, no. 1, pp. 807-818, en. 2012. <https://doi.org/10.1121/1.3651233>
- [42] U. G. Wegst, “Wood for sound”, *American Journal of Botany*, vol. 93, no. 10, pp. 1439-1448, oct. 2006. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1439>
- [43] S. Gao, X. Wang y L. Wang, “Modeling temperature effect on dynamic modulus of elasticity of red pine (*Pinus resinosa*) in frozen and non-frozen states”, *Holzforschung*, vol. 69, no. 2, pp. 233-240, 2015. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0048>
- [44] K. Ziemińska, M. Westoby y I. J. Wright, “Broad anatomical variation within a narrow wood density range: a study of twig wood across 69 Australian angiosperms”, *PLoS One*, vol. 10, no. 4, p. e0124892, abr. 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124892>