

Estudios de repetibilidad y reproducibilidad de métodos no destructivos en maderas angiospermas

Javier Ramón Sotomayor Castellanos, René Navarrete Padilla

Para citar este artículo: [Sotomayor Castellanos Ramón Javier, Navarrete Padilla René. 2021. Estudios de repetibilidad y reproducibilidad de métodos no destructivos en maderas angiospermas. Ciencia Nicolaita, número 82, 89-104. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi82.533>](#)

Ver material suplementario

Publicado en línea el 30 de septiembre de 2021

Envíe su artículo a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Estudios de repetibilidad y reproducibilidad de métodos no destructivos en maderas angiospermas

Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1*}, René Navarrete Padilla²

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera

²Universidad de Guanajuato, División de Arquitectura, Arte y Diseño

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 23 de octubre de 2020

Aceptado: 13 de marzo de 2021

RESUMEN

Los estudios de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) de las características mecánicas de la madera pueden garantizar la validez de los datos experimentales empleados en la caracterización y cálculo ingenieril. El objetivo de la investigación fue verificar que un estudio de R&R de la velocidad de onda, determinada con pruebas no destructivas, explica las interacciones entre los instrumentos, operadores y probetas. La primera etapa experimental consistió en el análisis de los resultados de las pruebas de ondas de esfuerzo y de ultrasonido realizadas en probetas de *Fraxinus americana* y *Albizia plurijuga*. En la segunda etapa se analizaron las variaciones de los resultados de la velocidad de onda. La investigación confirma la conveniencia de los estudios de R&R para la validación de las mediciones de velocidad de onda con los dos métodos citados. La variabilidad de la velocidad de onda es causada principalmente por el instrumento de medición, pero esta es pequeña en comparación con la variabilidad entre las especies analizadas. Las magnitudes de las interacciones son particulares a cada caso de estudio.

PALABRAS CLAVE: velocidad de onda, ondas de esfuerzo, ultrasonido, *Fraxinus americana*, *Albizia plurijuga*.

ABSTRACT

The repeatability and reproducibility (R&R) studies of the mechanical characteristics of wood can guarantee the validity of the experimental data used in the characterization and engineering calculation. The objective of the investigation was to verify that an R&R study of the wave velocity, determined with non-destructive tests, explains the interactions between the instruments, operators and specimens. The first experimental stage consisted of the analysis of the results of the stress wave and ultrasound tests carried out on specimens of *Fraxinus americana* and *Albizia plurijuga*. In the second stage, the variations of the wave velocity results were analyzed. The research confirms the suitability of R&R studies for the validation of wave velocity measurements with the two cited methods. The variability of the wave speed is caused mainly by the measuring instrument, but this is small compared to the variability between the analyzed species. The magnitudes of the interactions are particular to each case study.

KEYWORDS: wave velocity, stress waves, ultrasound, *Fraxinus americana*, *Albizia plurijuga*.

Introducción

Los estudios de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) son los más usados en el análisis de sistemas de medición (Gong *et al.*, 2015; Ha *et al.*, 2017). La repetibilidad se define como la variación en las mediciones obtenidas con un medidor utilizado varias veces por un operador, mientras se mide una característica en una parte. La reproducibilidad se define como la variación en el promedio de las mediciones realizadas por diferentes operadores que usan el mismo indicador al medir una característica en una parte (Wang y Chien, 2010; Saikaew, 2018). En otras palabras, la repetibilidad se refiere a la variación de mediciones repetidas en un mensurando por un operador que usa el mismo dispositivo de medición. Por su parte la reproducibilidad se relaciona con la variación de los promedios de medición entre varios dispositivos de medición, distintos procedimientos y/o diferentes operadores (Mohamed *et al.*, 2018; Mendes *et al.*, 2019). Los principales componentes de los estudios de R&R son muestras al azar de piezas del proceso, las cuales son medidas por operadores escogidos aleatoriamente varias veces con uno o varios dispositivos de medición (Li y Al-Refaie, 2008; Zanobini *et al.*, 2016).

Los estudios de R&R reportados en la literatura están encaminados al control estadístico de la calidad, así como al análisis de la estabilidad de sistemas de medición. Esta técnica tiene múltiples enfoques y amplias aplicaciones (Senvar y First, 2010; Gómez, 2013; Peruchi *et al.*, 2013; González y Falcón, 2015; Tiplica *et al.*, 2015; López *et al.*, 2018). En este sentido, los estudios de R&R se orientan a la evaluación de los sistemas de medición en ambientes industriales donde las características de los productos o piezas por evaluar pueden ser controlables. Las ventajas de los estudios de R&R por el método del análisis de varianza son su flexibilidad para estudiar cual-

quier arreglo o estructura experimental, el uso de varianzas como parámetros de comparación, el manejo de mayor información de los datos experimentales y la identificación de la interacción entre la repetibilidad y la reproducibilidad (González y Falcón, 2015; Botero *et al.*, 2007). De esta manera el análisis de varianza se aplica para detectar estas fuentes de variación.

Para estudiar procesos donde intervienen métodos no destructivos, se trabaja bajo los supuestos de estabilidad temporal de los mensurados y de la solidez entre mediciones. Es decir, las propiedades físicas de los objetos no se ven modificadas por el proceso de medición. En este contexto, la repetibilidad se puede definir como la varianza de las mediciones obtenidas al medir las características de un dispositivo de medición. Por su parte, la reproducibilidad es la varianza del medio de las mediciones obtenidas por diferentes operadores, al medir las mismas características de la misma pieza, con el mismo dispositivo de medición (Senol, 2004; De Mast y Trip, 2005). Así, los estudios de R&R proporcionan criterios para estimar dos componentes independientes de la varianza de medición.

Los estudios de R&R de características mecánicas de la madera, son importantes para garantizar la validez de los datos experimentales empleados en cálculo ingenieril y son valiosos para contrastar los datos de diferentes investigaciones (Shi *et al.*, 2014). Sin embargo, con excepción de Yu *et al.* (2017), no se identificaron trabajos aplicados a la caracterización de maderas por métodos no destructivos. Existe evidencia empírica de variabilidad en las características físicas de la madera entre especies y al interior de una especie (De Oliveira y Sales, 2006). En este contexto, la evaluación de mediciones de velocidades de onda en la madera, aplicando un estudio de R&R, requiere un enfoque diferente, dado que las probetas o piezas de madera a observar son de origen natural y resultado de la

fisiología particular a cada especie y de las condiciones de crecimiento del árbol.

Pruebas de ondas de esfuerzo y ultrasonido

La velocidad de onda en la madera está documentada con pruebas de ondas de esfuerzo (Lin y Wu, 2013; Yu *et al.*, 2017; Nasir *et al.*, 2019) y de ultrasonido (De Oliveira y Sales, 2006; Del Menezzi *et al.*, 2014; Gonçalves *et al.*, 2014). La literatura acerca de la caracterización mecánica de la madera de especies mexicanas también informa sobre datos obtenidos con estos dos métodos no destructivos (Sotomayor, 2014; Sotomayor, 2015). Empero, no existen antecedentes de estudios de R&R comparando estos métodos y midiendo maderas mexicanas.

Las magnitudes de las velocidades de onda varían entre especies y según el método empleado para su caracterización (Hasegawa *et al.*, 2011; Del Menezzi *et al.*, 2014). De aquí surgen las siguientes interrogaciones: ¿es la variabilidad del instrumento de medición pequeña en comparación con la variabilidad de la especie? y ¿cuánto de la variabilidad de la velocidad de onda medida en una probeta es causada por el aparato y/o por el operador?

Para responder a estas preguntas se plantea la siguiente hipótesis de investigación: el estudio de R&R de las velocidades de onda determinadas con ondas de esfuerzo y con ultrasonido en una misma especie explica las fuentes de variabilidad y las interacciones entre los instrumentos, operadores y probetas. Esta hipótesis está restringida a los resultados experimentales de muestras homogéneas y estadísticamente representativas de las maderas estudiadas, así como a las condiciones particulares de la metodología empleada.

El objetivo de la investigación fue verificar experimentalmente la hipótesis de investigación efectuando estudios de R&R de las velocidades

de onda derivadas de pruebas no destructivas. Para esto se realizaron pruebas de ondas de esfuerzo y de ultrasonido en probetas de madera de *Fraxinus americana* y *Albizia plurijuga* y con las mediciones se realizaron sus análisis estadísticos. El alcance y límite de la investigación es informar sobre la conveniencia de los estudios R&R para la validación de las mediciones de velocidades de onda con los dos métodos citados. Los resultados pretenden contribuir en la aplicación de los estudios R&R en ciencias y tecnología de la madera.

Materiales y métodos

La estrategia experimental asume dos etapas: la primera es el análisis de los resultados de las velocidades de onda, derivados de pruebas de ondas de esfuerzo y de ultrasonido que se realizaron en dos especies angiospermas: *Fraxinus americana* L. y *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton y Rose. Esta etapa tiene como objetivo validar la homogeneidad y la representatividad de las muestras de las maderas en estudio. La segunda etapa se refiere a los estudios de R&R de las variaciones de los resultados de las velocidades de onda. Su objetivo es construir tablas de repetibilidad y reproducibilidad, así como de su análisis de varianza. Los cálculos y análisis estadísticos fueron realizados con el programa *Statgraphics*®, siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez y De la Vara (2009) y Gutiérrez y De la Vara (2013).

Se recolectaron piezas de madera aserrada de *F. americana* y *A. plurijuga* en empresas de transformación de productos forestales en el estado de Michoacán, México. La madera no contenía anomalías estructurales ni defectos de crecimiento y con ella se prepararon 40 probetas con una sección transversal de 0,02 m de ancho, 0,02 m de espesor y de 0,4 m de largo

de acuerdo con la norma ISO 3129: 2012 (International Organization for Standardization, 2012). Las probetas se almacenaron durante 24 meses en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C (± 1 °C) y una humedad relativa del aire de 65% ($\pm 5\%$), hasta que su peso fue constante y la madera alcanzó su contenido de humedad en equilibrio. El presente estudio forma parte de la línea de investigación de caracterización mecánica de maderas mexicanas, desarrollada en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, Michoacán, México. Por este motivo el material experimental y las velocidades de onda son los reportados por Sotomayor y Ávila (2020a) y Sotomayor y Ávila (2020b).

La densidad de la madera se determinó con la relación peso/volumen de acuerdo con la norma ISO 13061-2:2014 (International Organization for Standardization, 2014a). El contenido de humedad se determinó por el método de diferencia de pesos de acuerdo con la norma ISO 13061-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014b). Ambos parámetros se determinaron en 40 probetas adicionales obtenidas de los mismos lotes de madera para las pruebas de ondas de esfuerzo y ultrasonido, con dimensiones de 0,02 m \times 0,02 m de sección y 0,06 m de largo. Para que los errores aleatorios propios de estas mediciones no influyan en los resultados, los pesos fueron medidos por operadores capacitados con una balanza digital con precisión de 0,1 g y las dimensiones de las probetas fueron medidas con un calibrador con precisión de 0,00001 m.

Las pruebas de ondas de esfuerzo (Sotomayor *et al.*, 2020) consistieron en suministrar un impacto en la dirección longitudinal en un extremo de la probeta. Con un acelerómetro emisor, posicionado en el aparato *Metriguard*® con frecuencia de emisión de 44 kHz y precisión de

0,000001 s (Figura 1a), registrándose el tiempo inicial. En el otro extremo de la probeta, en un segundo acelerador receptor, se registró el tiempo de transmisión de las ondas de esfuerzo. Con este valor, dividido por la distancia entre los acelerómetros, se definió la velocidad de la onda de esfuerzo (v_{oe}).

Las pruebas de ultrasonido (Sotomayor, 2020) consistieron en suministrar un impulso ultrasónico en transmisión directa a lo largo de la probeta con el aparato *Sylvatest*® con frecuencia de emisión de 22 kHz y precisión de 0,000001 s (Figura 1b). De esta forma se midió el tiempo de transmisión de la onda en la dirección longitudinal. Con la longitud de las probetas y el tiempo de transmisión del ultrasonido, se calculó la velocidad de onda del ultrasonido (v_{us}).

Diseño experimental

La unidad experimental consistió en dos grupos homogéneos de 40 probetas cada uno de maderas de *F. americana* y *A. pluriyuga* seleccionadas de manera aleatoria. El instrumento de medición (aparatos de ondas de esfuerzo *versus* ultrasonido) se considera el factor de variación. Los pesos, las dimensiones de las probetas, así como el contenido de humedad de la madera y su densidad, son factores fijos y controlables. Las variables de entrada son las velocidades de onda medidas con ondas de esfuerzo y las variables de salida son las medidas con ultrasonido. Se realizó un experimento de un solo factor de variación (tipo de prueba), el cual consistió en el análisis de las velocidades de onda (v_{oe} *versus* v_{us}) con dos niveles (*F. americana* y *A. pluriyuga*).

Para cada par de muestras independientes (ondas de esfuerzo *versus* ultrasonido) se calcularon las medias (μ), las desviaciones estándar (σ) y los coeficientes de variación ($CV = \sigma/\mu$). Se calcularon los sesgos (S) y apuntamientos (A)

derivados de pruebas de normalidad. El criterio de demarcación para considerar normal la distribución de una muestra fue: $[-2 < S < +2, -2 < A < +2]$. Se verificaron las igualdades de varianzas y se practicaron análisis de varianzas. Para todas las pruebas el nivel de confiabilidad fue de 95% ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, el criterio de demarcación fue aceptar una diferencia estadísticamente significativa para valores $P_{(\alpha = 0,05)} \leq 0,05$. Se verificó la hipótesis nula $H_0: \mu_1 = \mu_2$, donde: H_0 = Hipótesis nula (el tipo de prueba no influye en el parámetro calculado); μ_1 = Medias de las velocidades de onda con ondas de esfuerzo; μ_2 = Medias de las velocidades de onda por ultrasonido. Se calculó el tamaño de la muestra para un error aceptable de 0,05 de acuerdo con Gutiérrez y De la Vara (2009).

Estudios de repetibilidad y reproducibilidad

Se realizaron dos estudios cruzados incluyendo interacción de operador por probeta (repetibilidad y reproducibilidad), uno para cada especie estudiada (*F. americana* y *A. plurijuga*). Se analizaron datos empíricos de las velocidades de onda medidas con dos instrumentos (medidores de ondas de esfuerzo y de ultrasonido). Con cada instrumento dos operadores realizaron dos mediciones aleatorias en 20 probetas (partes) en la dirección longitudinal (Figuras 1a y 1b). Estas mediciones se analizaron como variables aleatorias e independientes. Se realizaron análisis de varianza (σ^2) entre los instrumentos y partes. El nivel de confiabilidad fue de 95%. Por lo tanto, el criterio de demarcación fue aceptar que no existe interacción significativa para valores de $P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$.

Las fuentes de variabilidad que se evaluaron en el estudio de R&R se definieron de acuerdo con Gutiérrez y De la Vara (2013):

$\sigma^2_{\text{probetas}}$ = Variabilidad atribuible a las probetas

$\sigma^2_{\text{instrumentos}}$ = Variabilidad de los instrumentos de medición

$\sigma^2_{\text{operadores}}$ = Variabilidad de los operadores

$\sigma^2_{\text{operadores} \times \text{probetas}}$ = Variabilidad por la interacción entre operadores y probetas

De tal forma que la variabilidad total observada fue:

$\sigma^2_{\text{total}} = \sigma^2_{\text{probetas}} + \sigma^2_{\text{operadores}} + \sigma^2_{\text{operadores} \times \text{probetas}} + \sigma^2_{\text{instrumentos}}$	(1)
--	-----

Considerando que:

$\sigma^2_{\text{repetibilidad}} = \sigma^2_{\text{instrumentos}}$	(2)
--	-----

$\sigma^2_{\text{reproducibilidad}} = \sigma^2_{\text{operadores}} + \sigma^2_{\text{operadores} \times \text{probetas}}$	(3)
---	-----

La variabilidad R&R se definió como:

$\sigma^2_{\text{R\&R}} = \sigma^2_{\text{repetibilidad}} + \sigma^2_{\text{reproducibilidad}}$	(4)
---	-----

De los datos del estudio de R&R se calcularon las sumas de cuadrados (SC) correspondientes a cada componente de variación dado en la ecuación (1), mismas que cumplen la relación:

$SC_{\text{total}} = SC_{\text{probetas}} + SC_{\text{operadores}} + SC_{\text{operadores} \times \text{probetas}} + SC_{\text{instrumentos}}$	(5)
--	-----

La suma de cuadrados $SC_{\text{instrumentos}}$ corresponde a la suma de cuadrados del error SC_{error} .

Al dividir cada suma de cuadrados por sus grados de libertad se obtuvieron los cuadrados medios (CM). Con estos parámetros se construyeron pruebas estadísticas para verificar diferencias entre las partes, entre los operadores y el efecto de interacción operadores \times probetas. Si se definen p = probetas, o = operadores y t = pruebas, los grados de libertad correspondientes a cada suma de cuadrados de la ecuación (5) fueron, respectivamente:

$GL_{\text{probetas}} = (p - 1)$	(6)
$GL_{\text{operadores}} = (o - 1)$	(7)
$GL_{\text{operadores} \times \text{probetas}} = [(o - 1) \times (p - 1)]$	(8)
$GL_{\text{instrumentos}} = [p \times o \times (t - 1)]$	(9)
$GL_{\text{total}} = (p - 1) + (o - 1) + [(o - 1) \times (p - 1)] + [p \times o \times (t - 1)]$	(10)

Además de los valores esperados de los cuadrados medios, se dedujo que los estimadores de los componentes de varianza para cada caso estuvieron dados por:

$\sigma^2_{\text{instrumentos}} = CM_{\text{error}}$	(11)
$\sigma^2_{\text{probetas}} = \frac{CM_{\text{probetas}} - CM_{\text{operadores} \times \text{probetas}}}{t \times o}$	(12)
$\sigma^2_{\text{operadores}} = \frac{CM_{\text{operadores}} - CM_{\text{operadores} \times \text{probetas}}}{t \times p}$	(13)
$\sigma^2_{\text{operadores} \times \text{partes}} = \frac{CM_{\text{operadores} \times \text{probetas}} - CM_{\text{error}}}{t}$	(14)

De esta manera se obtuvo la repetibilidad, la reproducibilidad y el error de medición, los cuales, para su interpretación, se expresan como porcentajes de la variación total.

Resultados y discusión

El contenido de humedad para *F. americana* fue de 10% (CV = 6%) y para *A. plurijuga* de 12% (CV = 5%). La densidad de la madera fue para *F. americana* de 654 kg m⁻³ (CV = 6%) y para *A. plurijuga* fue de 830 kg m⁻³ (CV = 3%). Estos resultados coinciden con los reportados por Sotomayor y Ávila (2020a) y Sotomayor y Ávila (2020b) para ambas especies.

Pruebas de ondas de esfuerzo y de ultrasonido

La [Tabla 1](#) presenta los resultados de las pruebas de ondas de esfuerzo y ultrasonido. Las velocidades de onda del ultrasonido de *F. americana* son en promedio 13% mayores que las correspondientes a las de ondas de esfuerzo. Las correspondientes para *A. plurijuga* son también 17% mayores que las medidas por ondas de esfuerzo. Para *F. americana*, sus coeficientes de variación de ondas de esfuerzo y ultrasonido son en promedio 4,75%. Para *A. plurijuga* son mayores y en promedio 7,98%.

Para ambas especies, las pruebas de normalidad indican que las muestras están uniformemente repartidas. Asimismo, las varianzas verificaron su igualdad. Finalmente, los análisis de varianza indican diferencias estadísticamente significativas entre las velocidades de onda según el instrumento de medición. Empero, las velocidades de onda son grupos homogéneos al interior de cada especie según el tipo de instrumento de medición. Para cada grupo que se midió, el tamaño de muestra calculado es menor y suficiente respecto al número de pruebas medidas. Las [Figuras 2 y 3](#) presentan la convergencia del tamaño de la muestra (número de probetas necesarias) en función del error aceptable para *F. americana* y *A. plurijuga* respectivamente ([Tabla 1](#)). Los estudios de R&R de un sistema de medición (cruzados), igual que otros procedimientos de análisis de sistemas de medición, son experimentos diseñados. Para que los resultados sean válidos, la aleatorización y el muestreo representativo son esenciales.

Estos resultados verifican la homogeneidad de las muestras, la diferenciación de las velocidades de onda medidas con ondas de esfuerzo, especificadas como variables de entrada y las medidas con ultrasonido catalogadas como variables de salida, de tal forma que se pueden analizar como

Tabla 1. Resultados de las pruebas de ondas de esfuerzo y ultrasonido

Instrumento de medición	Ondas de esfuerzo		Ultrasonido	
Parámetro	v_{oe}	v_{oe}	v_{us}	v_{us}
Unidades	(m s ⁻¹)	(m s ⁻¹)	(m s ⁻¹)	(m s ⁻¹)
Operador	1	2	1	2
Especie	<i>Fraxinus americana</i>			
Media	4008	4025	4498	4601
Desviación estándar	183	197	205	231
Coefficiente de Variación	5	5	5	5
Mínimo	3704	3636	4124	4167
Máximo	4396	4396	4878	5000
Sesgo	0,425	-0,204	-0,149	0,187
Apuntamiento	-0,089	0,400	-0,777	-0,458
Tamaño de la muestra	3	4	3	4
	Valor $P_{(\alpha = 0,05)}$			
Verificación de varianza	0,672*			
Análisis de varianza	< 0,001 [#]			
Grupos homogéneos	X	X		
Grupos homogéneos			X	X
Especie	<i>Albizia plurijuga</i>			
Media	4071	4040	4775	4689
Desviación estándar	277	259	440	444
Coefficiente de Variación	7	6	9	10
Mínimo	3604	3509	4000	4211
Máximo	4545	4444	5556	5479
Sesgo	-0,026	-0,095	0,184	0,599
Apuntamiento	-1,279	-0,930	-0,447	-0,814
Tamaño de la muestra	7	10	15	18
	Valor $P_{(\alpha = 0,05)}$			
Verificación de varianza	0,115*			
Análisis de varianza	< 0,001 [#]			
Grupos homogéneos	X	X		
Grupos homogéneos			X	X

v = Velocidad de onda; oe = Ondas de esfuerzo; us = Ultrasonido; Coeficiente de variación en porcentaje; * $P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$ = No existe diferencia significativa; # $P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$ = Sí existe diferencia significativa; Filas compartiendo X son grupos homogéneos; Tamaño de la muestra para un error de 0,05%. Fuente: elaboración propia.

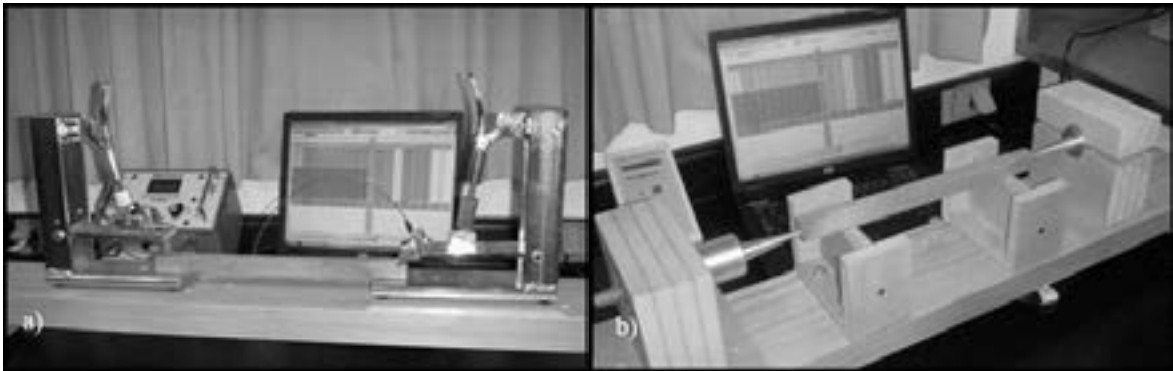


FIGURA 1. Pruebas de: a) ondas de esfuerzo; b) ultrasonido (Sotomayor *et al.*, 2011).

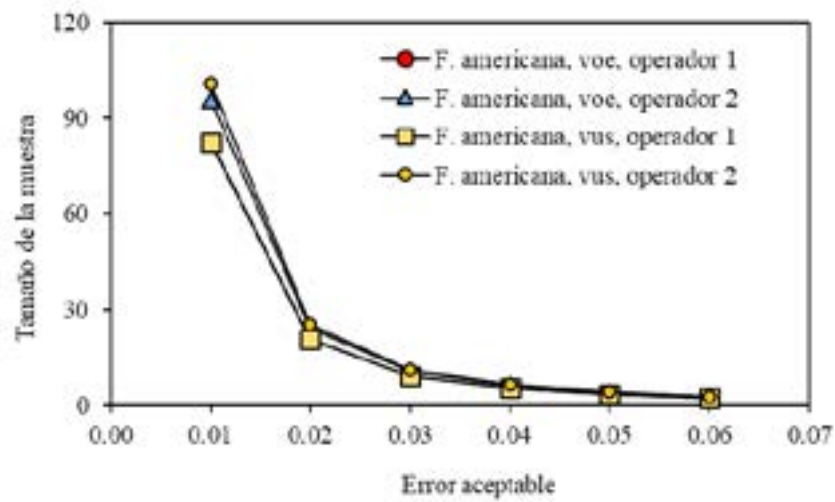


FIGURA 2. Tamaño de la muestra en función del error aceptable de *F. americana*.

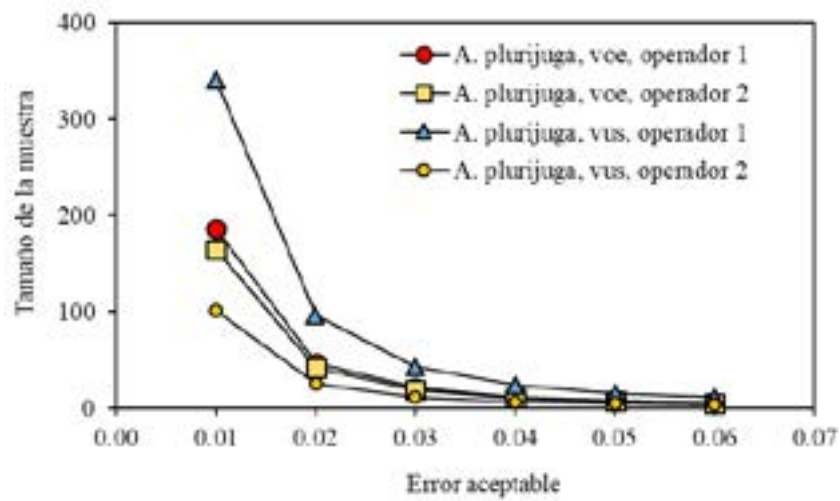


FIGURA 3. Tamaño de la muestra en función del error aceptable de *A. pluriyuga*.

variables aleatorias e independientes en los estudios de R&R. El alcance de este enfoque es limitado para cuantificar la exactitud de las mediciones. Esto sucede por el hecho de que no se puede determinar un valor medio para la velocidad de onda de una especie de madera y por consiguiente es difícil cuantificar la diferencia entre un valor experimental promedio y un valor de referencia. Caso particular son los valores de las características mecánicas tabuladas en los códigos y reglamentos de construcción con madera. En cambio, el coeficiente de variación puede ser un indicador de la precisión del sistema de medición cuando la misma probeta se mide repetidamente con el mismo instrumento. Además, la repetibilidad y reproducibilidad son componentes de un mismo sistema de medición.

En la investigación, la estrategia experimental se orientó hacia el análisis de resultados especie por especie. De acuerdo con el paradigma contemporáneo que rige en investigación e ingeniería de la madera, es necesario caracterizar el comportamiento mecánico de ésta con un enfoque de experimentación de caso por caso de una especie en particular. Cada procedimiento debe estar referido a las variables de referencia de las condiciones de ensayo, por ejemplo, la densidad y el contenido de humedad de la madera y con datos derivados de la observación de un tamaño de muestra estadísticamente representativo. Una vez que se tienen las observaciones integrantes y la estadística, se pueden proponer tendencias en el comportamiento general para una especie en específico y/o por agrupamiento de varias de ellas que denoten una tendencia similar (Sotomayor y Correa, 2016).

Estudios de repetibilidad y reproducibilidad

La [Tabla 2](#) presenta los resultados de los estudios de R&R y la [Tabla 3](#) presenta los resulta-

dos del análisis de varianza. Los resultados se presentan de manera independiente para cada una de las dos especies. Así, se consideran dos casos diferentes de estudio, pero con mediciones equivalentes para su comparación. Las tablas se construyeron utilizando las ecuaciones (1) a (14).

El estudio de R&R de *F. americana* indica que el 81% de la varianza se debe a la reproducibilidad que corresponde a diferencias entre operadores y probetas, en tanto que 16% se debe a la repetibilidad que corresponde a los instrumentos ([Tabla 2](#)) y el 3% corresponde a la fuente de variación R&R. Para esta misma especie, los resultados presentan la misma tendencia. Los datos de la [Tabla 3](#) indican que, entre instrumentos, sí existe contribución significativa al error de medición dado que su valor es $P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$. En cambio, las probetas y la interacción de instrumentos y probetas no contribuyen de manera significativa al error de medición dado su valor $P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$. Aquí la fuente residual corresponde a la repetibilidad.

Para *A. plurijuga*, el estudio de R&R indica que el 44% de la varianza total se debe a la reproducibilidad que corresponde a diferencias entre los instrumentos, en tanto que 56% se debe a la repetibilidad que corresponde a operadores y probetas ([Tabla 2](#)). Como consecuencia, en este caso el factor R&R es nulo. Para esta misma especie, la [Tabla 3](#) indica que sí existe interacción significativa entre instrumentos y para las probetas ($P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$). En cambio para la combinación de instrumentos y probetas no existe interacciones significativas ($P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$). De manera análoga al estudio R&R de *F. americana*, la fuente residual corresponde a la repetibilidad.

La repetibilidad representa la variación causada por los instrumentos de medición. En esta investigación se trata de la medición de probetas de una misma especie (*F. americana* y solamente esta especie, o en su caso, las probetas de *A. plu-*

Tabla 2. Resultados de los estudios de repetibilidad y reproducibilidad

Fuente de variabilidad	Velocidad de onda en <i>F. americana</i>				
	σ	% _{var}	σ^2	% _{con}	%R&R
Repetibilidad	164	38	26987	15	16
Reproducibilidad	376	88	141070	77	81
Interacción	72	17	5202	3	3
R&R	416	97	173258	94	100
Probetas	102	24	10382	6	
Variación total	429	100	183640		
Fuente de variabilidad	Velocidad de onda en <i>A. plurijuga</i>				
	σ	% _{var}	σ^2	% _{con}	%R&R
Repetibilidad	422	64	178258	40	44
Reproducibilidad	478	72	228514	52	56
Interacción	0	0	0	0	0
R&R	638	96	406771	92	100
Probetas	184	28	33951	8	
Variación total	664	100	440723		

Dos operadores por instrumento efectuando dos mediciones en 20 partes (probetas). σ = Desviación estándar; %_{var} = Porcentaje variación total; σ^2 = Varianza; %_{con} = Porcentaje de contribución; %R&R = Contribución a la repetibilidad y reproducibilidad. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Resultados del análisis de varianza de los estudios de repetibilidad y reproducibilidad

Fuente de variabilidad	Velocidad de onda en <i>F. americana</i>				
	SC	GL	CM	Razón F	Valor P
Instrumentos (2)	5680180	1	5680180	152	<0.0001#
Probetas (20)	1499470	19	78919	2	0.0560*
Instrumentos \times probetas	710401	19	37390	1	0.1890*
Error residual	1079460	40	26987		
Total	8969510	79			
Fuente de variabilidad	Velocidad de onda en <i>A. plurijuga</i>				
	SC	GL	CM	Razón F	Valor P
Instrumentos (2)	9154400	1	9154400	661	<0.0001#
Probetas (20)	2843590	19	149663	11	<0.0001#
Instrumentos \times probetas	263284	19	13857	0	1.0000*
Error residual	7130320	40	178258		
Total	19391600	79			

Dos operadores por instrumento efectuando dos mediciones en 20 partes (probetas). SC = Suma de cuadrados; GL = Grados de libertad; CM = Cuadrado medio; * $P_{(\alpha=0,05)} > 0,05$ = No existe interacción significativa; # $P_{(\alpha=0,05)} < 0,05$ = Sí existe interacción significativa. Fuente: elaboración propia.

rijuga y solamente de esta especie) con un instrumento de medición (*Metriguard*® y solamente este aparato; o comparativamente, *Sylvatest*® y solamente este aparato). Por su parte, la repetitividad para *F. americana* contribuye a la variabilidad total un 15% y para *A. plurijuga* un 40%.

No obstante que las mediciones de las velocidades de onda son precisas con coeficientes de variación máximos de 10%, se observan diferencias entre especies. Una causa que provoca la variabilidad de la velocidad de onda en la madera son las diferentes configuraciones de las pruebas con que se miden (Bachtar *et al.*, 2017). Si bien los parámetros medidos son teóricamente equivalentes, no lo son sus solicitaciones. Una interpretación de estos resultados implica considerar que cada uno de los dos instrumentos mide el tiempo de transmisión de la onda en la dirección longitudinal de la probeta con diferentes tipos de solicitaciones. Las ondas de esfuerzo provocan la vibración de la masa de una sección transversal al sentido de la fuerza que origina el movimiento. En cambio, las ondas de ultrasonido viajan en paquete a través de la estructura material de la madera.

La reproducibilidad representa la variación causada por los operadores, más la combinación de operadores y probetas. En esta investigación se trata de mediciones en la misma especie (*F. americana* o *A. plurijuga*) pero con diferentes instrumentos (*Metriguard*® y *Sylvatest*® a la vez). La reproductibilidad contribuye a la variabilidad total para *F. americana* 77% y para *A. plurijuga* 52%. Este resultado es mayor a la contribución adjudicada a los instrumentos (repetibilidad). En efecto, los resultados sugieren que la variabilidad es específica a cada especie y, de esta manera, se distinguen sus características mecánicas para fines de diseño y cálculo ingenieril.

La interacción representa la variación causada por la combinación de operadores y pro-

betas. Para *F. americana*, la contribución de la interacción es de 3%. En cambio, para *A. plurijuga* el porcentaje de contribución a la variabilidad total es nulo (Tabla 2). Este resultado sugiere que los operadores midieron las probetas con precisión y exactitud. Particularmente en el caso de las velocidades de onda en la madera de *A. plurijuga*.

La contribución a la variabilidad total de R&R de *F. americana* es 94% y para *A. plurijuga* es 92% (Tabla 2). De acuerdo con Woodall y Borror (2008) y Yeh y Sun (2013), en los estudios de R&R enfocados al análisis de sistemas de medición, los valores superiores al 30% generalmente se consideran inaceptables y se recomienda hacer todo lo posible para mejorar el sistema de medición. Este criterio va más allá de los alcances de esta investigación. Empero, los resultados del diseño experimental en lo concerniente a las velocidades de onda indican normalidad de las distribuciones y suficiencia en el tamaño de las muestras estudiadas (Tabla 1). Asimismo, la verificación de varianzas indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las desviaciones estándar (con un nivel del 95% de confianza), mientras que el análisis de varianza distingue entre muestras de acuerdo con el instrumento de medición (*Metriguard*® versus *Sylvatest*®).

La contribución a la variabilidad total adjudicada a las probetas para *F. americana* es de 6% y para *A. plurijuga* de 8% (Tabla 2). Estos resultados pueden compararse con los coeficientes de variación (Tabla 1) de ondas de esfuerzo y ultrasonido: para *F. americana* son en promedio de 5% y para *A. plurijuga* son en promedio de 8%, magnitudes prácticamente equivalentes. En el mismo contexto, los valores promedio de las velocidades de onda de ultrasonido para *F. americana* son 13% mayores con respecto a las de ultrasonido y para *A. plurijuga* este cálculo es de 17%. Estas diferencias, según la técnica em-

pleada, han sido observadas en otras especies y con los métodos aquí utilizados por Sotomayor (2014) y Sotomayor (2015). Estos resultados resaltan las ventajas de los estudios de R&R respecto al análisis tradicional que presenta la literatura en ciencias y tecnología de la madera. Mientras que la Tabla 1 provee únicamente los coeficientes de variación como medida para estimar la precisión de las mediciones, los datos de las Tablas 2 y 3 indican la variabilidad de los instrumentos, operadores y probetas, así como su interacción, que en este caso coincide con el promedio de los coeficientes de variación de cada muestra.

En síntesis, los resultados pueden explicarse por la variabilidad natural en la magnitud de las características físicas que existe entre especies y al interior de una especie (Perré *et al.*, 2016), por la heterogeneidad anatómica de las maderas (Schubert *et al.*, 2009), por la anisotropía material (Brémaud *et al.*, 2011) y por la higroscopicidad del tejido leñoso (Mvondo *et al.*, 2017). La diversidad en las propiedades mecánicas de la madera también depende de factores genéticos y ambientales y se encuentra en todos los niveles tanto entre especies gimnospermas y angiospermas, como entre árboles de climas tropicales y templados, entre poblaciones de una especie determinada, entre árboles de una población y finalmente, entre ubicaciones de muestreo dentro de un solo árbol (Zhang *et al.* 2011). Sin embargo, el diseño experimental y los estudios de R&R mostraron de manera explícita los diferentes componentes de la variabilidad total en las magnitudes de las velocidades de onda para *F. americana* y *A. plurijuga*.

Conclusiones

Los estudios de R&R de las velocidades de onda determinadas en maderas de *F. americana* y *A. plurijuga*, con instrumentos de ondas de esfuerzo y de ultrasonido, permiten cuantificar las

fuentes de variabilidad entre los instrumentos, los operadores y las probetas. La investigación informa sobre la conveniencia de los estudios de R&R para la validación de las mediciones de velocidades de onda con los dos métodos citados. La contribución a la variabilidad entre los dos instrumentos de medición es pequeña en comparación con la variabilidad entre las especies *F. americana* y *A. plurijuga*.

La variabilidad en la velocidad de onda medida en una probeta es causada principalmente por el instrumento de medición. Las magnitudes de las interacciones son particulares a cada caso de estudio. Los resultados están restringidos por la experimentación de muestras homogéneas y estadísticamente representativas de las maderas estudiadas y son válidos para las condiciones particulares de la metodología empleada.

Agradecimientos

La investigación estuvo patrocinada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) en Morelia, Michoacán, México. Se agradece la participación en las mediciones de laboratorio a los alumnos de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la UMSNH.

Referencias

- BACHTIAR, E. V., Sanabria, S. J., Mittig, J. P., y Nimes, 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.
- BOTERO, M., Arbeláez, O., y Mendoza, J. A. 2007. Método ANOVA utilizado para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad dentro del control de calidad de un sistema de medición. *Scientia et Technica*, 13 (37): 533-537.

- BRÉMAUD, I., Gril, J., y Thibaut, B. (2011). Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Science and Technology*, 45 (4): 735-754.
- DE Mast, J., y Trip, A. 2005. Gauge R&R Studies for Destructive Measurements. *Journal of Quality Technology*, 37(1): 40-49.
- DE Oliveira, F. G. R., y Sales, A. 2006. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical Woods. *Bioresource Technology*, 97 (18): 2443-2446.
- DEL Menezzi, C. H. S., Amorim, M. R. S., Costa, M. A., y Garcez, L. R. O. 2014. Evaluation of Thermally Modified Wood by Means of Stress Wave and Ultrasound Nondestructive Methods. *Materials Science (Medziagotyra)*, 20 (1): 61-66.
- GÓMEZ, R. A. 2013. Modelo estadístico de medición R&R en el pesaje de productos de la preparación de pedidos en un centro de distribución. *Revista Soluciones de Postgrado EIA*, 5 (10): 45-64.
- GONÇALVES, R. A., Trinca, J., y Pellis, B. P. 2014. Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. *Wood Science and Technology*, 48 (2): 269-287.
- GONG, L., Burdick, R. K., y Quiroz, J. 2015. Confidence Intervals for Unbalanced Two-factor Gauge R&R Studies. *Quality and Reliability Engineering International*, 21: 727-741.
- GONZÁLEZ, G. y Falcón, C. F. 2015. Procedimiento para el análisis de repetibilidad y reproducibilidad en procesos de manufactura. *Revista Cubana de Ingeniería*, 6 (3): 53-59.
- GUTIÉRREZ, H., y De la Vara, R. 2009. *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGraw-Hill.
- GUTIÉRREZ, H., y De la Vara, R. 2013. *Control estadístico de la calidad y Seis Sigma*. México: Mc Graw Hill.
- HA, C., Kim, D. S., y Park, S. 2017. Assessment of the Adequacy of Gauge Repeatability and Reproducibility Study Using a Monte Carlo Simulation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017 (7237486): 1-15.
- HASEGAWA, M., Takata, M., Matsumura, J., y Oda, K. 2011. Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood. *Ultrasonics*, 51 (3): 296-302.
- 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: International Organization for Standardization.
- INTERNATIONAL Organization for Standardization. 2014a. ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. Geneva: International Organization for Standardization.
- INTERNATIONAL Organization for Standardization. 2014b. ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical. Geneva: International Organization for Standardization.
- LI, M. C., y Al-Refaie, A. 2008. Improving Wooden Parts' Quality by Adopting DMAIC Procedure. *Quality and Reliability Engineering International*, 24: 351-360.
- LIN, W. y Wu, J. 2013. Nondestructive Testing of Wood Defects based on Stress Wave Technology. *Telkomnika*, 11 (11): 6802-6807.
- LÓPEZ, G., Mazaira, Z., Hernández, I. A., y Cabrera, H. R. 2018. Análisis de la calidad de las mediciones en el proceso de laboratorio. *Revista Espacios*, 39 (6): 1-18.
- MOHAMED, O. A., Masood, S. H., y Bhowmik, J. L. 2018. Investigation of dimensional variation in parts manufactured by fused deposition modeling using Gauge Repeatability and Reproducibility. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 310: 012090.
- MENDES, L. M., Gomes, R., Santana, R., Rotela, P., y De Freitas, J. H. 2019. New indicators for measurement error detection in GR&R studies. *Measurement*, 140: 557-564.
- MVONDO, R. R. N., Meukam, P., Jeong, J., Meneses, D. D., y Nkeng, E.G. 2017. Influence of water content on the mechanical and chemical properties of tropical wood species. *Results in Physics*, 7: 2096-2103.
- NASIR, V., Nourian, S., Avramidis, S., y Cool, J. 2019. Stress wave evaluation by accelerometer and acoustic emission sensor for thermally modified wood classification using three types of neural networks. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77 (1): 45-55.
- PERRÉ, P., Almeida, G., Ayouz, M., y Frank, X. 2016. New modelling approaches to predict wood properties from its cellular structure: image-based representation and meshless methods. *Annals of Forest Science*, 73 (1): 147-162.
- PERUCHI, R. S., Balestrassi, P. P., De Paiva, A. P., Ferreira, J. R., y Carmelossi, M. S. 2013. A new multivariate gage R&R method for correlated characteristics. *International Journal of Production Economics*, 144 (1): 301-315.
- SAIKAEW, C. 2018. An implementation of measurement system analysis for assessment of machine and part

- variations in turning operation. *Measurement*, 118: 246-252.
- SCHUBERT, S., Gsell, D., Dual, J., Motavalli, M., y Niemz, P. 2009. Acoustic wood tomography on trees and the challenge of wood heterogeneity. *Holzforchung*, 63 (1): 107-112.
- SENOL, S. 2004. Measurement system analysis using designed experiments with minimum α - β risks and n. *Measurement*, 36: 131-141.
- SENVAR, O. y First, S. U. K. 2010. An overview of capability evaluation of Measurement Systems and Gauge Repeatability and Reproducibility Studies. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 1 (2): 121-127.
- SHI, L., Chen, W., y Lu, L. F. 2014. An Approach for Simple Linear Profile Gauge R&R Studies. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2014(816980): 1-7.
- SOTOMAYOR, J. R. 2014. Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- SOTOMAYOR, J. R. 2015. Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- SOTOMAYOR, J. R. 2020. Efecto del preservado de la madera con boro sobre el módulo dinámico. *Evaluación por medio de ultrasonido*. Científica, 24 (1): 67-76.
- SOTOMAYOR, J. R., y Ávila, L. E. A. 2020a. Efecto de la impregnación con boro sobre las densidades y módulos dinámicos de tres maderas angiospermas. *Revista Ingeniería al Día*, en prensa.
- SOTOMAYOR, J. R., y Ávila, L. E. A. 2020b. Impregnación con sales de boro de la madera de *Spathodea campanulata* P. Beauv, *Fraxinus americana* L. y *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton y Rose. *Evaluación con ultrasonido de la velocidad de onda y del módulo dinámico*. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 8 (45): 40-50.
- SOTOMAYOR, J. R. y Correa, S. 2016. Retención de sales de boro en la madera y su efecto en el módulo de elasticidad dinámico. *Revista Científica*, 24 (1): 1-19.
- SOTOMAYOR, J. R., Adachi, K., Iida, R., y Hayashi, T. 2020. Aumento del módulo dinámico en madera densificada. *Evaluación con ondas de esfuerzo en ocho especies*. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 24 (1): 7-20.
- SOTOMAYOR, J. R., García, L. J., Hernández, S. A., Moya, C. E., y Olguín, 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.
- TÍPLICA, T., Verron, S., Grémy-Gros, C., Vandewalle, P., y Mehinagic, E. 2015. On the quality of acoustical measures when evaluating fruits quality. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 6 (201): 1-8.
- WANG, F. K. y Chien, T. W. 2010. Process-oriented basis representation for a multivariate gauge study. *Computers y Industrial Engineering*, 58: 143-150.
- WOODALL, W. H. y Borror, C. M. 2008. Some Relationships between Gage R&R Criteria. *Quality and Reliability Engineering International*, 24: 99-106.
- YEH, T., y Sun, J. 2013. Using the Monte Carlo Simulation Methods in Gauge Repeatability and Reproducibility of Measurement System Analysis. *Journal of Applied Research and Technology*, 11 (5): 780-796.
- YU, Y., Liu, Y., Gong, M., Xu, Z., y Fang, Y. 2017. R&R study of using a stress wave timer to measure the elastic modulus of structural dimension lumber. *Measurement*, 95: 293-296.
- ZANOBINI, A., Sereni, B., Catelani, M., y Ciani, L. 2016. Repeatability and Reproducibility techniques for the analysis of measurement systems. *Measurement*, 86: 125-132.
- ZHANG, T., Bai, S. L., Bardet, S., Alméras, T., Thibaut, B., y Beauchêne, J. 2011. Radial variations of vibrational properties of three tropical woods. *Journal of Wood Science*, 57 (5): 377-386.