



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS
FORESTALES

**Módulo de elasticidad con métodos no
destructivos en vigas estructurales de *Vitex
gaumeri* Greenm y *Matayba oppositifolia*
(A. Rich) Britton**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

CARLOS IVÁN UC SOSA

**Bajo la supervisión de: MA. AMPARO MÁXIMA BORJA DE LA ROSA,
Dra.**



APROBADA



Chapingo, Estado de México, mayo de 2022

MÓDULO DE ELASTICIDAD CON MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN VIGAS
ESTRUCTURALES DE *Vitex gaumeri* GREENM Y *Matayba oppositifolia* (A. RICH)
BRITTON

Tesis realizada por **Carlos Iván Uc Sosa** bajo la supervisión del Comité Asesor
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el
grado de:

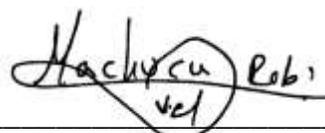
MAESTRO EN CIENCIAS

DIRECTORA



Dra. Ma. Amparo Máxima Borja de la Rosa

ASESOR



M.C. Roberto Machuca Velasco

ASESOR



Dr. Alejandro Corona Ambriz

ASESOR



Dr. Luis Acuña Rello

CONTENIDO

CONTENIDO.....	iii
LISTA DE CUADROS.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	v
DEDICATORIAS.....	vi
AGRADECIMIENTOS.....	vii
DATOS BIOGRÁFICOS	viii
Datos personales.....	viii
Desarrollo académico.....	viii
RESUMEN GENERAL	¡Error! Marcador no definido.
ABSTRACT.....	x
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
Antecedentes	1
Objetivo General	3
Objetivos Particulares	3
Literatura citada	4
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1. Marco teórico.....	6
Técnicas no destructivas	6
Propiedades mecánicas de la madera.....	9
Módulo de elasticidad.....	9
2.2. Marco de referencia.....	10
Métodos no destructivos en México.....	14
Literatura citada	17
CAPÍTULO 3. MÓDULO DE ELÁSTICIDAD CON MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN VIGAS ESTRUCTURALES DE <i>Vitex gaumeri</i> Greenm y <i>Matayba oppositifolia</i> (A.Rich.) Britton.....	20
RESUMEN	20
ABSTRACT	21
INTRODUCCIÓN.....	22
MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
Ubicación.....	26
Determinación del MOE Estático	30
MOE dinámico vibración inducida longitudinalmente.....	32

MOE dinámico ultrasonido	34
Análisis Estadístico	36
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
Análisis descriptivo.....	37
Análisis de Varianza.....	40
CONCLUSIONES	43
Literatura citada	44

LISTA DE CUADROS

Tabla 1. Módulo de elasticidad con los métodos: estático, vibraciones y ultrasonido (Fakopp).....	38
Tabla 2. Verificación de los supuestos de la especie <i>Matayba oppositifolia</i>	39
Tabla 3. Verificación de los supuestos de la especie <i>Vitex gaumeri</i>	39
Tabla 4. Análisis de varianza del Módulo de Elasticidad.....	41
Tabla 5. Comparación de medias.....	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localización del área de colecta de las muestras de madera.....	27
Figura 2 Medición del contenido de humedad.....	29
Figura 3. Obtención del peso de las probetas.....	30
Figura 4. Ensayo del módulo de elasticidad elástico.....	31
Figura 5. Ensayo del módulo de elasticidad por vibraciones longitudinales.....	33
Figura 6. Software FFT Analyzer.....	34
Figura 7. Fakopp & Sensor acoplado a un extremo de la viga.....	35
Figura 8: Ensayo del módulo de elasticidad por ultrasonido con Fakopp.....	36
Figura 9. Diagrama de caja de la distribución de los MOE's para <i>Matayba oppositifolia</i>	40
Figura 10. Diagrama de caja de la distribución de los MOE's para <i>Vitex gaumeri</i>	40

DEDICATORIAS

A mi pequeño **León Valentín** que me has colmado de dicha y amor, te amé y protegí desde que supe que llegarías a este mundo, te amé cuando escuche tu corazón por vez primera, te amé cuando sentí tus patadas desde el vientre de mamá, te amé cuando escuche tu primer llanto y mi amor sincero te acompañará por siempre.

AGRADECIMIENTOS

A Dios padre que me enfundes confianza en cada paso, que has guiado mi camino y detenido mis errores, que me has amado y bendecido, mi copa esta rebosante, ciertamente el bien y la misericordia me seguirán todos los días de mi vida.

A mi amada esposa Jaqueline Peña por ser mi mejor amiga y mi fortaleza incansable día con día.

A mi país “Estados Unidos Mexicanos” por las estructuras académicas y administrativas que han puesto a mi disposición educación gratuita y de calidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado para la realización de la presente investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo, por brindarme una casa de estudios en la cual me he desarrollado como profesional.

A la Dra. Amparo Borja de la Rosa por su confianza, amistad, apoyo, guía y enseñanzas a lo largo de toda mi formación académica y de investigación.

Al M.C. Roberto Machuca Velasco por su amistad, consejos, conocimiento compartido y seguridad que me ha infundido al momento de realizar mis metas.

Al Dr. Luis Acuña Rello por el conocimiento brindado a manos llenas, la asesoría y el seguimiento puntal de los procesos de investigación para la realización del presente estudio.

Al Dr. Alejandro Corona Ambriz por su amable asesoría y acompañamiento en el análisis estadístico.

A mi madre Leonor Sosa por todo el cariño y el apoyo económico y emocional para la realización de esta investigación.

A la comunidad Gustavo Diaz Ordaz por la confianza, los recorridos de campo y la madera puesta a disposición para la elaboración de las probetas del presente estudio.

A mis hermanos Luis Enrique y Carlos Daniel por los largos y cansados pero divertidos días de trabajo en la toma de datos de las 42 probetas utilizadas para este trabajo.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Carlos Iván Uc Sosa
Fecha de nacimiento	31 de diciembre de 1992
Lugar de nacimiento	Santa María Zoquitlán, Oaxaca
No. Cartilla militar	D-1266916
CURP	UXSC921231HMCCSR03
Profesión	Ingeniero Forestal Industrial
Cédula profesional	11718891

Desarrollo académico

Bachillerato	Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo
Licenciatura	División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

MÓDULO DE ELASTICIDAD CON MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN VIGAS ESTRUCTURALES DE *Vitex gaumeri* GREENM Y *Matayba oppositifolia* (A. RICH) BRITTON

RESUMEN GENERAL

Los métodos no destructivos son de gran utilidad para evaluar y detectar defectos, determinando así las propiedades mecánicas de la madera, para poder garantizar su adecuado desempeño en su uso, sin la necesidad de someter a pruebas destructivas dicho material a evaluar. Estos métodos son de especial aplicación en la evaluación en piezas de madera que serán utilizadas como elementos estructurales en la construcción, con dichos métodos podemos determinar si la pieza cumplirá con los requerimientos propios de la construcción antes de ser instalados y durante su vida útil ya que los métodos no destructivos permiten realizar la evaluación de piezas ya instaladas abriendo la capacidad de determinar el deterioro de la madera antes de que esté falle o se encuentre comprometida. El propósito de esta investigación es calcular el módulo de elasticidad en vigas con uso estructural de la madera de *Vitex gaumeri* y *Matayba oppositifolia* con tres métodos distintos. Para lograrlo, se realizaron ensayos estáticos, ensayos de vibraciones longitudinales con la FFT Analyzer y ensayos de ultrasonidos con el equipo Fakopp en 25 vigas de *Matayba oppositifolia* y en 17 vigas de *Vitex gaumeri*, para ambas especies las vigas tuvieron dimensiones de 5cmx15cmx465cm y un contenido de humedad promedio del 13.5%. Los resultados de los módulos de elasticidad son, en todos los casos, mayores en *Matayba oppositifolia* que en *Vitex gaumeri* lo que se corroboró mediante un Análisis de la varianza y con la comparación múltiple de medias de Tukey se pudo afirmar que no existen diferencias estadísticas significativas entre los métodos Vibraciones longitudinales y ultrasonidos con el equipo Fakopp ($p>0.05$), mientras que ambos son diferentes al método estático.

Palabras clave: Fakopp, ultrasonido, vibraciones, estáticos, madera, FFT Analyzer, reloj comparador.

Tesis de Maestría en Ciencias, Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Carlos Ivan Uc Sosa
Director de Tesis: Dra. Ma- Amparo Máxima Borja de la Rosa

**ELASTICITY MODULE WITH NON-DESTRUCTIVE METHODS IN
STRUCTURAL BEAMS OF *Vitex gaumeri* Greenm and *Matayba oppositifolia*
(A. Rich) Britton**

ABSTRACT

Non-destructive methods are very useful for evaluating and detecting defects, thus determining the mechanical properties of the wood, in order to guarantee its adequate performance in its use, without the need to subject said material to be evaluated to destructive tests. These methods are of special application in the evaluation of wooden pieces that will be used as structural elements in construction, with these methods we can determine if the piece will meet the requirements of the construction before being installed and during its useful life since Non-destructive methods allow the evaluation of parts already installed, opening up the ability to determine the deterioration of the wood before it fails or is compromised. The objective of this research is to determine the modulus of elasticity of structural use beams of *Vitex gaumeri* and *Matayba oppositifolia* wood with three different methods. To achieve this, static tests, longitudinal vibration tests with the FFT Analyzer and ultrasound tests with the Fakopp equipment were carried out on 25 beams of *Matayba oppositifolia* and 17 beams of *Vitex gaumeri*, for both species the beams had dimensions of 5cmx15cmx465cm and a content humidity average 13.5%. The results of the modulus of elasticity are, in all cases, higher in *Matayba oppositifolia* than in *Vitex gaumeri*, which was corroborated by an Analysis of Variance and with the multiple comparison of Tukey's means, it was possible to affirm that there are no significant statistical differences between Longitudinal vibrations and ultrasound methods with the Fakopp equipment ($p > 0.05$), while both are different from the static method.

Keywords: Fakopp, ultrasound, vibrations, static, wood, FFT Analyzer, dial gauge.

Master of Science Thesis, Master of Science in Forestry Sciences, Universidad Autónoma Chapingo, Mexico.

Author: Carlos Ivan Uc Sosa

Advisor: Dra. Ma- Amparo Máxima Borja de la Rosa

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Antecedentes

La madera es una materia prima renovable, extremadamente valiosa, ampliamente distribuida, requiere de cantidades pequeñas de energía para convertirse en productos útiles. Así que la madera ha sido usada por siglos en la construcción (Ross, 2015).

Día con día la ampliación demográfica genera demanda de viviendas y con ello el uso de madera para la construcción, pero el desconocimiento de las características tecnológicas de ésta es una limitante para el uso adecuado de las especies maderables.

Las características tecnológicas de la madera son determinantes para su aprovechamiento y posterior aplicación específica en usos y procesos donde ciertas propiedades son decisivas para obtener un beneficio máximo desde el punto de vista económico y técnico (Zavala Z. D., 1976).

En la mayoría de los países desarrollados, es un requisito indispensable clasificar a las maderas de acuerdo a sus propiedades físicas y mecánicas para brindarles una óptima utilización (Robles & Echenique, 1983)

Por lo que es necesario contar con un sistema de clasificación de madera estructural de las especies maderables de interés económico, para lo cual se deben realizar análisis en el laboratorio con el fin de asignarle a cada especie sus valores de resistencia (Peniche, 1990).

La clasificación estructural, se deriva de las pruebas mecánicas, a las que son sometidas una serie de probetas de diferente confección y dimensiones, a las cuales se les aplica una fuerza mediante aparatos y aditamentos específicos, estos registran la carga y la magnitud de la misma (ASTM, 1992).

Los estudios sobre las propiedades mecánicas de la madera se realizan por medio de pruebas destructivas, las cuales requieren de grandes cantidades de madera, sin embargo, desde hace varios años atrás se inició la realización de estudios sobre ensayos no destructivos que permiten calcular dichas propiedades sin destruir el material (Torres, 2020).

Los métodos no destructivos (NDT - Nondestructive testing) son definidos como evaluaciones que permiten examinar determinados materiales y/o sus componentes sin la necesidad de dañar sus propiedades físicas ni mecánicas así mismo no se compromete el uso final. Los NDT son utilizados con el fin de buscar, ubicar, cuantificar y evaluar defectos, también es posible determinar las propiedades de los materiales, su composición o garantizar su buen desempeño en uso (Acuña, Diez, & Casado, 2006).

La tecnología de pruebas no destructivas de la madera puede predecir la condición interna de la madera sin su destrucción y ha sido utilizado para detectar las propiedades mecánicas de los árboles en pie, la descomposición y los defectos internos de la madera (Li et al. 2016).

Las técnicas de evaluación no destructivas son métodos rápidos, sencillos, que mantengan intacta las características del material original dando resultados, válidos y comparables con los obtenidos por ensayos destructivos, con la ventaja de preservar la integridad de la madera (Manavella, Guillaumet, Felipetti, & Meyer, 2019).

Así mismo Iñiguez, Arriaga, Esteban & Arguelles (2007) mencionan que un método de ensayo no destructivo (NDT- Non Destructive Testing) no altera las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del material estudiado, este se puede basar en la aplicación de fenómenos físicos entre otros

Los métodos no destructivos utilizan la capacidad de la madera para almacenar y disipar energía, con el fin de caracterizar su comportamiento mecánico. Estos pueden predecir, entre otros parámetros mecánicos del material, su frecuencia natural de vibración y la velocidad de transmisión de una onda mecánica (Sotomayor& Bocanegra, 2011)

Las frecuencias ultrasónicas utilizadas por este tipo de equipos para trabajar con madera son utilizadas, generalmente entre 20 y 200 kHz, en estos rangos la heterogeneidad del material no representa una variable significativa además se logra un mayor alcance de los impulsos inducidos. (Acuña, Diez, & Casado, 2006).

Hipótesis

Los métodos de ultrasonido (Fakopp), vibración y estático permiten caracterizar a través de su módulo de elasticidad la madera estructural.

Objetivo General

Deducir el módulo de elasticidad en la madera de Ya´axnik (*Vitex gaumeri* Grenm) y Guaya cojolitera (*Matayba oppositifolia* A. Rich, Britton) por medio de métodos no destructivos.

Objetivos Particulares

- Determinar el módulo de elasticidad de la madera de ambas especies, a través de tres métodos no destructivos.
- Comparar los métodos de ultrasonido (Fakopp), vibración y estático

Literatura citada

- Acuña, L., Diez, M., & Casado, M. (2006). *Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a Pinus pinaster Ait.* Palencia, España: Boletín Informativo del CIDEU 2:7-26(ISSN: 1885-5237).
- Álvarez, H. N. (1982). *Determinación del módulo de elasticidad de la madera por métodos vibráticos.* Madrid, España: AITIM. Asociación de Investigaciones de las Industrias de la Madera.
- ASTM. (1992). *Standard methods of testing small clear specimens of timber.* Philadelphia, PA, USA: Book of ASTM Standard D 143. Vol. 04.09. Wood American Society for Testing and Materials.
- Honorato, S. J., & Fuentes, L. M. (2001). *Propiedades Físico-Mecánicas de la madera de cinco especies de encino del estado de Guanajuato.* Revista Ciencia Forestal en México. Vol. 26(90):5-28.
- Íñiguez, G. G., Arriaga, M. F., Esteban, H. M., & Argüelles, A. R. (2007). *Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural.* Informes de la construcción, 506(59),.
- Íñiguez, G. G., Arriaga, M. F., Esteban, H. M., & Argüelles, A. R. (2007). *Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural.* Informes de la construcción, 506(59),.
- IRAM 9542. (1965). *Maderas – Método de ensayo de flexión estática de maderas con peso específico aparente mayor de 0,5g/cm³.* Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Li J.; Fang Y.; Tang J.; Feng H., & Lou X. 2016. *Development of Testing Platform and Comparison Studies for Wood Nondestructive Testing.* Journal of Electrical and Computer Engineering. China.
<https://doi.org/10.1155/2016/6279869>
- Manavella, R., Guillaumet, A., Felippetti, M., & Meyer, L. (2019). *Determinación del módulo de elasticidad por ultrasonido y vibraciones en vigas de pino ponderosa.* Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina: 4° Congreso latinoamericano de estructuras de madera.

- Moreno, Z. F., & Martínez, C. J. (1984). *Estudio de trabajabilidad de cuatro especies de maderas mexicanas*. Texcoco, México.: Tesis de licenciatura. Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Bosques. Escuela Nacional de Agricultura. 8-10 p.
- Peniche, C. (1990). *La Madera y La Arquitectura*. CDMX: División de Ciencias y Artes para el Diseño. Departamento de Procesos y Técnicas de Realización. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Robles, F., & Echenique, M. (1983). *Estructuras de Madera*. CDMX: LIMUSA.
- Ross, R. J. (2015). *Nondestructive Evaluation of Wood*. Madison, Wisconsin: United States Department of Agriculture. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-238>
- Sotomayor, C. J., & Bocanegra, S. (2011). *Caracterización dinámica de la madera de Abies sp. por métodos no destructivos*. Morelia, Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Sotomayor, C. J., & Villaseñor, A. J. (2016). Módulo de elasticidad, factor de calidad e índice material de vigas de madera de *Enterolobium cyclocarpum* determinado por vibraciones transversales. *Ingeniería*, 26(2), 37-49. ISSN: 1409-2441. <http://dx.doi.org/10.15517/jte.v26i2.20136>
- Spavento, E. M. (2008). *Usos potenciales de la madera de roble europeo y fresno americano cultivados en la provincia de Buenos Aires, Argentina*. Talca, Chile.: 4to. Congreso Chileno de Ciencias Forestales. Universidad de Talca.
- Suirezs, T. M. (2010). *Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera*. Posadas, Misiones: 1a ed. Posadas: EdUNaM - Editorial Universitaria de la Universidad Nacional de Misiones.
- Torres, C. D. (2020). *ESTIMACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE 149 ESPECIES MEXICANAS DE IMPORTANCIA INDUSTRIAL CON MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS*. Chapingo, México: División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo.
- Zavala, C. (1989). *Identificación de Encinos de México*. Chapingo, México: División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.
- Zavala, Z. D. (1976). *Características de maquinado de seis especies maderables*. Texcoco, México: Tesis de licenciatura. Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Bosques. Escuela Nacional de Agricultura. 68 p.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

Técnicas no destructivas

Por definición, la evaluación no destructiva es la ciencia de identificar las propiedades físicas y mecánicas de una pieza de material sin alterar sus capacidades de uso final y luego utilizando esta información para tomar decisiones con respecto a las aplicaciones apropiadas. Tales evaluaciones se basan en métodos no destructivos tecnologías de prueba para proporcionar información precisa sobre las propiedades, el rendimiento o el estado del material en cuestión. (Ross, 2015).

Flexión estática

El ensayo de flexión estática mide la resistencia que ofrece una viga a una carga puntual aplicada en el centro de luz o distancia entre apoyos, en la cara tangencial más cercana a la médula de la probeta, (IRAM 9542, 1965).

Los métodos de flexión estática es un procedimiento relativamente simple que implica el uso de la relación carga-deflexión de una simple viga apoyada. El módulo de elasticidad se puede calcular directamente mediante el uso de ecuaciones derivadas de la mecánica fundamental de los materiales. (Ross, 2015)

Una madera está sometida a la flexión estática cuando sobre ella ejercen cargas en forma lenta que tienden a curvarla. Las maderas en uso generalmente están solicitadas por cargas o fuerzas que tienden a flexionarlas (Suirezs, 2010).

El esfuerzo de flexión ocurre en piezas de gran longitud respecto a su sección transversal, la acción de la carga normal a su eje longitudinal provoca una curvatura. Se producen tres esfuerzos fundamentales:

- 1) Esfuerzo de compresión que producen un acortamiento longitudinal en la parte superior;
- 2) Esfuerzo de tracción que producen un alargamiento en la parte inferior;
- 3) Esfuerzo de corte o cizalle en el centro. La combinación de los dos primeros esfuerzos origina en la viga una concavidad en la zona de compresión y convexidad en la zona de tracción (Suirezs, 2010).

La carga en el límite proporcional y la deformación se determina con la ayuda de las curvas de elasticidad para cada probeta ensayada. El módulo de elasticidad se calcula con la siguiente fórmula:

$$MOE = P'L^3/4bh^3f$$

Siendo:

MOE = Módulo de elasticidad, en kg/cm^2

P' = Carga en el límite proporcional elástico, en kg.

L = Longitud entre apoyos, en cm.

b = Base, en cm.

h = Altura, en cm.

f = Deformación, en cm.

(Suirezs, 2010)

Técnica vibración longitudinal

La forma de generar el movimiento vibratorio, el cual se induce golpeando la muestra sobre una superficie libre, tal como la testa. Lo que se mide es el tiempo de paso medido en microsegundos y junto con la longitud de la pieza se calcula la velocidad media (Álvarez, 1982).

Ultrasonido

Mide el tiempo de paso, sobre una distancia predeterminada de la madera, de la onda ultrasónica inducida en esta, calculándose la velocidad media de la onda (Álvarez, 1982).

Las microfisuras, la formación de fisuras, el movimiento del agua y la aspiración de puntuaciones son solo algunos fenómenos internos en la madera que pueden ser detectados por receptores externos. Este tipo de inspección se conoce como emisión acústica.

Las ondas ultrasónicas para la prueba son producidas comúnmente por transductores piezoeléctricos que convierten el voltaje en movimiento mecánico. Los inspectores pueden comprar transductores ultrasónicos con frecuencias centrales entre 20 kHz y hasta el rango de megahercios.

La tasa de descomposición de la vibración libre o la atenuación de las ondas se utilizan con frecuencia para observar las propiedades de disipación de energía de los materiales a base de madera (Pellerin y Ross 2002).

Propiedades mecánicas de la madera.

Las propiedades mecánicas de la madera son aquellas que definen la aptitud y capacidad para resistir cargas externas, excluyendo los esfuerzos debidos a las tensiones internas producto de los cambios de humedad (Spavento, 2008).

La madera es un material elástico, que al colocarle peso puede deformarse, una vez que se le quita el peso puede volver a su estado original.

Dentro de las propiedades mecánicas de la madera destaca la rigidez, que se mide en términos del denominado módulo de elasticidad, y que corresponde al esfuerzo por unidad de superficie en relación a la deformación por unidad de longitud (Navia 2006).

Módulo de elasticidad

(Suirezs, 2010) menciona que el módulo de elasticidad indica la rigidez de una madera, cuando el módulo de elasticidad es elevado son las maderas indicadas para la construcción.

La anisotropía de la madera provoca que el módulo de elasticidad en dirección paralela a la fibra tome valores diferentes dependiendo de las fuerzas actuando en la propia madera estas pueden ser de compresión o tracción. En la dirección perpendicular a la fibra el módulo de elasticidad llega a tener un valor de hasta 30 veces inferior al paralelo a la fibra.

2.2. Marco de referencia

Baettig, P. (2001). Realizo un estudio de evaluación de dos prototipos de fácil fabricación para realiza la END de las propiedades mecánicas de la madera. Midió la rigidez de la madera mediante el módulo de elasticidad (MOE) longitudinal, en piezas pequeñas de madera. Se realizaron 3 ensayos (IET piezoeléctrica e IET celda de carga y un equipo comercial basado en LSW), en 5 piezas de *Pinus radiata* D. Don con humedad de 10% medido con xilohigrómetro de púas. Los resultados mostraron que el MOE calculado en las piezas de madera realizadas por el mismo equipo no presentan diferencias significativas en ninguno de los ensayos, el análisis de resultados de MOE de los prototipos de IET no son significativamente distintos entre sí, pero si presentan diferencias significativas con el equipo comercial basado en LSW.

Díaz Méndez, (2005). Realizo estudios de la madera Hualo *Nothofagus glauca* midió propiedades físico-mecánicas en 100 probetas de 40 árboles de cuatro diámetros diferentes. El Hualo posee una madera de alta densidad semi-pesada, y con gran contracción, según la compresión paralela, de clase superior con calidad semi-pesada, y en flexión pertenece a la clase mediana y corresponde a una madera de gran calidad y muy tenaz. Evaluó la flexión estática, compresión paralela y compresión perpendicular y no se presentaron diferencia entre clases diamétricos, presenta características adecuadas para la construcción pesada, como pilares, vigas, durmientes, entre otros. Con respecto a la compresión perpendicular las clases diamétricos soportan carga similar antes de que se produzcan deformaciones permanentes y en la flexión, la tensión unitaria y el módulo de ruptura resultaron similares entre las clases diamétricos.

Acuña et al. (2006), estudiaron piezas de madera estructural de 5 especies: *Pinus radiata*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Milicia excelsa* y *Fagus sylvatica* las probetas alcanzaron el 12% de humedad. Los resultados muestran que la velocidad de propagación de los ultrasonidos se ve modificada por la distancia de medida y por el ángulo que forma la dirección de medida con la inclinación de las fibras. Tomando en cuenta los resultados obtenidos, esta prueba no destructiva es confiable para ser usada con *Pinus pinaster* a modo de realizar una clasificación resistente de la madera, generando un aprovechamiento superior a diferencia de la clasificación visual, UNE 56.544.

Crespo et al. (2008), realizaron estudios comparativos en madera de teca (*Tectona grandis* L.F.), de dos zonas diferentes para determinar propiedades físico-mecánicas fundamentadas en las normas. Los resultados mostraron que no existe diferencia significativa entre la madera de las dos zonas. El módulo de elasticidad (MOE) en la flexión estática fue mayor en la zona de Quevedo. El módulo de ruptura (MOR) en el corte paralelo a la tira, en la cara radial, fue mayor en la zona de Balzar. La madera de teca de Balzar presentó mejores propiedades físicas, en cambio la madera de teca de Quevedo presentó mejores propiedades mecánicas, por cuanto las condiciones ambientales son diferentes.

Spycher, et al., (2007). Realizaron estudios para conocer la calidad de la madera en la fabricación de instrumentos musicales; las propiedades físicas que se evaluaron son: densidad, módulo de elasticidad, velocidad del sonido, índice de radiación, índice de emisión e índice de sonoridad. Se realizó mediante el análisis de vibraciones y las propiedades se evaluaron en muestras de madera de resonancia de diferente calidad y en madera normal (control) de abeto noruego y sicomoro. Una muestra de madera de resonancia de abeto de Noruega de la mejor calidad mostró alta relación de radiación en la dirección axial, que se correlacionó con la presencia de pequeñas células de madera con paredes celulares delgadas.

Iñiguez González. (2007). Realizo estudios en un total de 395 piezas de madera aserrada estructural, con dimensiones transversales de 150 x 200 mm y 200 x 250 mm, y de las siguientes especies de coníferas Pino radiata (*Pinus radiata* D. Don), pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y pino laricio (*Pinus nigra* subsp. *salzmannii* (Dunal) Franco). Utilizo técnicas no destructivas (penetrómetro, arranque de tornillo, ultrasonidos y vibraciones inducidas), con resultados de estimación alcanzados con coeficientes de determinación, R², de: 0,64, para la densidad; 0,76, para el módulo de elasticidad; y 0,68, para la resistencia; validando el uso de herramientas no destructivas para la estimación de propiedades resistentes de la madera aserrada estructural.

Andreimi et al., (2013). Realizaron estudios en vigas de madera de *Populus deltoides* australiano 129/60 de sección 2"x3", en 47 vigas a flexión mediante ensayos no destructivos determinando el módulo de elasticidad (MOE) global y local. Se emplearon dos métodos no destructivos: la frecuencia de vibración utilizando el software FFT Analyzer y micrófono, y se calculó el MOE dinámico con el equipo de ultrasonidos Fakopp Microsecond Timer. Los resultados muestran el MOE calculado por ultrasonido, presenta una variación del 10% con respecto al MOE global y del 1% con respecto al MOE local, mientras que el MOE calculado por vibraciones, presenta una variación cercana al 6% con respecto al MOE global y del 2% con respecto al MOE local.

Igartua et al. (2015), realizaron estudios en madera de *Acacia melanoxylon* en la provincia de Buenos Aires, donde los ensayos mecánicos se realizaron sobre cuerpos de pruebas pequeñas, el comportamiento mecánico es congruente para una madera de densidad media y puede considerarse adecuado para su uso en la industria de la construcción, mueble y en aplicaciones como pisos.

Guillaumet et al, (2019), realizó estudios en 273 vigas de madera de pino (*Pinus ponderosa* Dougl. Ex Laws) en Argentina para determinar los valores del módulo de elasticidad mediante 3 técnicas: por flexión estática según norma UNE-EN 408, por ultrasonido mediante equipo Fakopp Microsecond Timer y por vibraciones longitudinales inducidas. Los resultados calculados de flexión según UNE-EN 408

comparados con los obtenidos por ultrasonido presentan una correlación de 0,90 ($R^2 = 0,81$), comparados con los determinados por vibraciones longitudinales inducidas muestran una correlación de 0,93 ($R^2=0,87$). Los resultados muestran que las técnicas de ultrasonido y de vibraciones longitudinales inducidas pueden usarse con suficiente exactitud y seguridad para la predicción del módulo de elasticidad en madera de *Pinus ponderosa*.

Llanas et al. (2019), Realiza un análisis de literatura de los diversos ensayos realizados en madera en España, mediante métodos no destructivos, identifica que si bien se han realizado las investigaciones estas han tenido mucha diversidad en especies, el uso de equipos y procedimientos por lo que los resultados son diversos; sugiere unificar criterios en los objetos a evaluar y así puedan establecerse estándares conforme a las características del producto.

Li et al. (2016) Propuso e implementó tres métodos de prueba no destructivos de madera, incluida la medición del intervalo de tiempo pico, la correlación cruzada y el análisis de espectro también se probaron en esta plataforma con una muestra de descomposición grave, una muestra de descomposición temprana y muestra sin defectos. Los resultados mostraron que con los nuevos métodos pueden verificar fácilmente y las investigaciones de las pruebas no destructivas de la madera y ser acelerado con la plataforma de evaluación diseñada.

Métodos no destructivos en México

(Sotomayor C. J., 2003) realizó un estudio en tableros de partículas de madera (TPM) de una fábrica de Michoacán. Los paneles fueron elaborados con una mezcla de especies de madera de *Pinus spp.*, *Abies spp.*, y *Quercus spp.*; donde evaluó el módulo de Elasticidad (MOE), utilizando Métodos de Evaluación No Destructivos (Vibraciones Transversales, Ondas de Esfuerzo y Flexión Estática). Los resultados demostraron ser útiles en la determinación del Módulo de Elasticidad. De acuerdo con la densidad, los TPM se clasifican como tableros de media densidad, conforme a la Standard ANSI A208.1. Según la Standard ANSI A208.1, y los valores de MOE, los TPM clasifican como tableros 1-M-3, resultados de la evaluación con métodos dinámicos y con el método de flexión estática, se clasifican como tableros 1-M-2. Finalmente, los MOEs están estadísticamente relacionados de manera importante entre sí.

Nájera et al. (2005), realizaron estudios físicos y mecánicos en madera de *Quercus laeta* Leimb, de el Salto Durango, de acuerdo con las normas COPANT. Los resultados mostraron que la densidad de la madera es de 0.68 gr/cm^3 , la contracción volumétrica de 18.1%. El PSF se estableció en 30.1% de contenido de humedad y la RAN fue de 1.74 indicando poca estabilidad dimensional de la madera. La máxima resistencia de la madera fue en el esfuerzo de tensión paralela a la fibra con 1214.04 kgf/cm^2 mientras que la menor resistencia la mostró la prueba de tensión perpendicular a la fibra con 65.55 kgf/cm^2 . En cuatro de los ocho ensayos mecánicos evaluados, la mayor resistencia fue observada en el plano tangencial de la madera, en tres, la mayor resistencia la presentó el plano radial y en uno la mayor resistencia se observó en el plano transversal.

La mayor variación en los ensayos mecánicos, fueron observados para el plano radial seco en el ensayo de desgarre con 63%, seguido por el plano tangencial seco en el ensayo de tensión paralela al grano con 42%; mientras que la menor variación la mostraron el plano radial verde en el ensayo de desgarre con 6% seguido por el plano tangencial verde en el ensayo de cizalla con 8%.

Sotomayor, et al., (2010). Estudiaron 152 especies mexicanas de madera en los tres planos considerando la velocidad de ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad, así como la densidad básica. Obtuvieron una base de datos conformada por pinos duros, pinos blandos, encinos rojos, encinos blancos, tropicales y templadas sin incluir los encinos. Donde se especifica los criterios botánicos y las estadísticas básicas, mostrando la densidad y el módulo de elasticidad una amplia variabilidad

Sotomayor, et al., (2014). Realizaron estudios en 70 vigas de madera de *Pinus spp.* con medidas de 0.10 m x 0.15 m, 35 vigas de 5 m y 35 de 6 m de longitud, para determinar las velocidades de onda y los módulos de elasticidad, empleando ultrasonido y ondas de esfuerzo. Se encontró que las técnicas de ultrasonido y ondas de esfuerzo pueden determinar la velocidad de onda y los módulos de elasticidad en vigas de madera de *Pinus spp.*

Telles et al. (2017), realizaron estudios físico-mecánicos en seis árboles de *Tectona grandis* según las normas COPANT (1972); obteniendo una densidad básica de 0.59 gr/cm³, (pesada), contracción volumétrica 5.15 %, (baja), la compresión de 326.1 kgf/cm² (alta), la compresión perpendicular de 33.6 kgf/cm² (baja), ensayo de clivaje de 44.3 kgf/cm² (media), la cizalla 63.2 kgf/cm², (media a baja) la dureza lateral de 545 kgf, (semidura).

(Sotomayor, 2019) determinó el módulo dinámico por ultrasonido en 35 probetas de madera sólida y 35 de madera laminada, en *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* y *Juglans pyriformis*. Mostraron que en *E. cyclocarpum* y *T. rosea* los módulos dinámicos de la madera laminada se incrementan en comparación con los de la madera sólida, pero disminuyen en *J. pyriformis*.

Torres (2020) Hizo una comparación de dos modelos como métodos no destructivos para la determinación de las propiedades mecánicas de 149 especies maderables para posteriormente compararlas con los resultados generados con un ensayo de ultrasonido. Las probetas que utilizó fueron de medidas: 0.13m x 0.7m x 0.01 m con un contenido de humedad promedio del 14%; las piezas a evaluar fueron separadas

en 3 grupos, 111 especies de latifoliadas, 23 de coníferas y 14 especies del género *Quercus*, el volumen y peso fueron obtenidos en estado de saturación, en equilibrio y anhidro, así mismo fueron determinadas la densidades básicas, normal y en equilibrio, posteriormente se describieron las propiedades mecánicas por medio de dos modelos de regresión; también se llevó a cabo el registro del tiempo de transmisión de la onda de ultrasonido en sentido longitudinal de las tabletas. Las velocidades fueron determinadas con los tiempos de ultrasonido mientras que con la densidad básica se estimaron los módulos de elasticidad. La comparación entre los modelos de regresión determinó que ambos son viables para estimar las propiedades mecánicas de la madera mientras que para la estimación de los módulos de elasticidad por ultrasonido se obtuvo un valor de 1.1432 MPa., para ajustar los valores obtenidos con el equipo Fakopp.

Sotomayor & Navarrete (2021) Realizaron un estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) de la velocidad de onda, determinada con pruebas no destructivas, explicando las interacciones entre los instrumentos, operadores y probetas; lo anterior tomando en cuenta que los estudios de R&R de las propiedades mecánicas de la madera garantizan la confiabilidad de los resultados experimentales usados en la determinación y cálculo ingenieril. La etapa inicial del experimento se llevó a cabo con el análisis de los datos obtenido de los ensayos de ondas de esfuerzo y ultrasonido aplicados en probetas de *Fraxinus americana* y *Albizia plurijugá*. Posteriormente se estudiaron las diferencias en los resultados de velocidad de onda. El trabajo experimental ratifica cuan conveniente son los estudios de R&R para la confirmación de las mediciones de velocidad de onda con los dos métodos antes mencionados. El instrumento de medición es el factor de variación de la velocidad de onda registrada, pero esta no es significativa en comparación con la variabilidad entre las especies estudiadas. Para cada de estudio las magnitudes de las interacciones son particulares.

Literatura citada

- Acuña, L., Diez, M., & Casado, M. (2006). *Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a Pinus pinaster Ait.* Palencia, España: Boletín Informativo del CIDEU 2:7-26(ISSN: 1885-5237).
- Andreini, V., Quiroga, M., & Rabolini, S. (2013). Determinación del módulo de elasticidad en vigas de álamo 2" x 3" mediante ensayos no destructivos. *Nota técnica N°4.*
- Baettig, P. R. (2001). Determinación del módulo de elasticidad de la madera mediante vibraciones transversales. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 3(1-2), 44-51. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2001000100005>
- Álvarez, H. N. (1982). *Determinación del módulo de elasticidad de la madera por métodos vibráticos.* Madrid, España: AITIM. Asociación de Investigaciones de las Industrias de la Madera.
- Alfredo A. Guillaumet, María C. Filippetti, Roberto D. Manavella, Lía C. Meyer, Gonzalo Caballé, Alejandro Martínez Meier. (2019). Resistencia en flexión del pino ponderosa de la Patagonia Norte, Argentina. 4to Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera. Montevideo, Uruguay.
- Crespo, G. R., Jiménez, R. E., Suatunce, C. P., Law, B. G., & Sánchez, F. C. (2008) Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis* L.F.) de Quevedo y Balzar. *Ciencia y Tecnología*, (1), 55-63. <https://doi.org/10.18779/cyt.v1i2.74>
- Díaz M. P. (2005) Evaluación de propiedades físicas y mecánicas de madera de *Nothofagus glauca* (hualo) proveniente de la zona de Cauquenes. Facultad de ciencias forestales. Universidad de Talca. Talca, Chile.
- Igartúa, Dora Virginia; Moreno, K.; Piter, J. C.; Monteoliva, Silvia Estelalcon. (2015). Densidad y propiedades mecánicas de la madera de *Acacia melanoxylon* implantada en Argentina. *Maderas. Ciencia y Tecnología*. Universidad del Bío-Bío. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000070>.
- Íñiguez, G. G., Arriaga, M. F., Esteban, H. M., & Argüelles, A. R. (2007). Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural. *Informes de la construcción*, 506(59),. <https://doi.org/10.3989/ic.2007.v59.i506.512>

- Li J.; Fang Y.; Tang J.; Feng H., & Lou X. 2016. *Development of Testing Platform and Comparison Studies for Wood Nondestructive Testing*. Journal of Electrical and Computer Engineering. China.
<https://doi.org/10.1155/2016/6279869>
- Nájera, L. J., Vargas, A. Z., Méndez, G. J., & Graciano, L. J. (2005) Propiedades físicas y mecánicas de la madera en *Quercus laeta* Liemb. de El Salto, Durango.
- Navia S.F. (2006). Comportamiento del módulo de elasticidad en madera juvenil de *Pinus radiata* D. Don en tres condiciones de sitio. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia.
- Pellerin, Roy F.; Ross, Robert J. (2002). *Transverse Vibration and Longitudinal Stress Wave Nondestructive Evaluation Methods*. United States Department of Agriculture.
- Ross, R. J. (2015). *Nondestructive Evaluation of Wood*. Madison, Wisconsin: United States Department of Agriculture.
- Sotomayor (2014). Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Sotomayor, C. J., Guridi, G. L., & García, M. T. (2010). Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Base de datos. *Investigación e ingeniería de la madera*, 1(6).
- Sotomayor C., J. (2019). *Módulo dinámico longitudinal determinado por ultrasonido en madera de tres angiospermas sólida y laminada*. CDMX: Entreciencias: Diálogos de la sociedad del conocimiento. Vol 7. No. 21. UNAM.
<https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2019.21.68151>
- Sotomayor C., J. & Navarrete P., R. (2021). *Estudios de repetibilidad y reproducibilidad de métodos no destructivos en maderas angiospermas*. Ciencia Nicolaita, número 82, 89-104. <https://doi.org/10.35830/cn.vi82.533>
- Spavento, E. M. (2008). *Usos potenciales de la madera de roble europeo y fresno americano cultivados en la provincia de Buenos Aires, Argentina*. Talca, Chile.: 4to. Congreso Chileno de Ciencias Forestales. Universidad de Talca.
- Spycher, M. (2007). The application of wood decay fungi to improve the acoustic properties of resonance wood for violins. Faculty of Forest and Environmental Sciences, Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg im Breisgau, Germany.

Suirezs, T. M. (2010). *Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera*. Posadas, Misiones: 1a ed. Posadas: EdUNaM - Editorial Universitaria de la Universidad Nacional de Misiones.

Telles A. R., Nájera L. J., Alanís R.E., Aguirre C. O., Jiménez P. J., Gómez C. M., y Muñoz F. H. (2017). Propiedades físico-mecánicas De La Madera *Tectona grandis* L. F. De Una plantación Comercial En El Estado De Michoacán. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales* 8 (40). México, ME:37-56.

Torres, C. D. (2020). *ESTIMACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE 149 ESPECIES MEXICANAS DE IMPORTANCIA INDUSTRIAL CON MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS*. Chapingo, México: División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo.

CAPÍTULO 3. MÓDULO DE ELÁSTICIDAD CON MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN VIGAS ESTRUCTURALES DE *Vitex gaumeri* Greenm y *Matayba oppositifolia* (A.Rich) Britton

ELASTICITY MODULE WITH NON-DESTRUCTIVE METHODS IN STRUCTURAL BEAMS OF *Vitex gaumeri* Greenm and *Matayba oppositifolia* (A. Rich) Britton

Carlos Iván Uc Sosa¹, Roberto Machuca Velasco¹, Alejandro Corona Ambriz¹, Luis Acuña Rello²,
Ma. Amparo Maxima Borja de la Rosa^{1*}

RESUMEN

La madera ha estado presente en la construcción siempre, la ampliación demográfica demanda vivienda, el uso y aplicación de ella depende del conocimiento de las características tecnológicas; una de ellas es el módulo de elasticidad. El desconocimiento de estas propiedades también limita su uso, por lo tanto, la demanda de algunas especies genere su extinción. Por ello se pretende estimar el módulo de elasticidad de *Vitex gaumeri* y *Matayaba oppositifolia* con tres métodos no destructivos: MOE estático, MOE dinámico mediante vibración y MOE ultrasonido mediante el equipo: Microsecond Timer (Fakopp) comparándolos entre sí. Los resultados mostraron que los valores de los módulos de elasticidad determinados con los tres métodos fueron mayores en *Matayba oppositifolia*. Se utilizó el test de Shapiro-Wilk, con un valor $p > 0.05$, se asumió la normalidad de todos los grupos. La homocedasticidad se comprobó con el test de Leven obteniéndose un valor de $p > 0.05$ ($p = 0.1057$), no rechazó la igualdad de varianzas.

La ANDEVA indica que existen diferencias significativas entre los grupos, el valor del Módulo de elasticidad tuvo una influencia significativa tanto la especie como el tipo de ensayo. Se encontró que no existe una interacción significativa entre los dos factores anteriores. Siendo los valores de las dos especies diferentes de forma significativa ($p < 0.05$). De acuerdo con la prueba Tukey no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los métodos Vibraciones longitudinales y ultrasonidos con el equipo Fakopp ($p > 0.05$), mientras que ambos son diferentes al método estático.

Palabras clave: Estructuras, madera, deformación, cargas puntuales, MOE, Fakopp, reloj comparador.

1 Universidad Autónoma Chapingo

2 Universidad de Valladolid España

* Autor de correspondencia: mborjad@chapingo.mx

ABSTRACT

ELASTICITY MODULE WITH NON-DESTRUCTIVE METHODS IN STRUCTURAL BEAMS OF *Vitex gaumeri* and *Matayba oppositifolia*

Wood has always been present in construction, the demographic increase demands housing, the use and application of it depends on the knowledge of the technological characteristics; one of them is the module of elasticity. Ignorance of these properties also limits their use, therefore, the demand for some species generates their extinction. Therefore, it is intended to estimate the module of elasticity of *Vitex gaumeri* and *Matayba oppositifolia* with three non-destructive methods: static MOE, dynamic MOE through vibration and ultrasound MOE using the equipment: Microsecond Timer (Fakopp) comparing them with each other. The results showed that the values of the module of elasticity determined through the three methods were higher in *Matayba oppositifolia*. The Shapiro-Wilk test was used, with a p value > 0.05, normality was assumed for all groups. Homoscedasticity was verified with the Leven test, obtaining a value of $p > 0.05$ ($p = 0.1057$), it did not reject the equality of variances.

The ANOVA indicates that there are significant differences between the groups, the value of the Module of elasticity had a significant influence on the species and the type of test. It was found that there is no significant interaction between the two previous factors. Being the values of the two species significantly different ($p < 0.05$). According to the Tukey test, no significant statistical differences were found between the longitudinal vibrations and ultrasound methods with the Fakopp equipment ($p > 0.05$), while both are different from the static method.

Keywords: Structures, wood, deformation, point loads, MOE, Fakopp, dial gauge,

INTRODUCCIÓN

La construcción con madera no es una práctica común en México ni en países latinoamericanos, a diferencia de los países de habla inglesa, que tienen esta cultura.

La madera es una materia prima importante, por las diversas cualidades que posee, “Junto con la piedra, la madera es el material más empleado desde la más remota antigüedad” Meli (1998); en la actualidad ha sido desplazada por el concreto, cuyo uso se ha popularizado a tal grado de ser el material de construcción por excelencia. Sin embargo, debido a la creciente demanda habitacional, sustituir el concreto o cualquier otro material no es una opción, pero sí, la madera como una materia prima más para la construcción, por lo que el conocimiento de sus características específicas es importante para utilizarla de manera más eficiente (Cedeño, 2013).

El daño mecánico en los materiales se produce cuando se somete a la acción de esfuerzos y deformaciones. En las pruebas de laboratorio, una carga de tracción suministra continuamente energía a una muestra de material y está la almacena continuamente, cuando se alcanza la capacidad máxima de almacenamiento se produce la liberación de la misma (Fukun *et. al.*, 2019).

Los estudios sobre las propiedades mecánicas de la madera eran realizados por medio de pruebas destructivas en las que se requería el empleo de grandes cantidades de madera; sin embargo, desde hace años se han empezado a realizar estudios sobre ensayos no destructivos que permiten calcular dichas propiedades sin destruir el material (Torres, 2020).

Los métodos no destructivos basados en ondas mecánicas y ondas electromagnéticas se han utilizado para evaluar los defectos en el fuste de los árboles con los cuales se lograr una detección más precisa y confiable de los defectos internos. Qiu, Q., et al. (2018). Empleando Sondas de metal se obtiene muestras con la finalidad de caracterizar las estructuras anatómicas microscópicas en arbolado enfermo; así mismo para identificación de especies maderables. Estas

técnicas no destructivas mostraron el potencial para la aplicación en el análisis fisiológico de árboles (Santini, L., et al. 2019; Sharma,V., et al.2020).

Igualmente, las técnicas no destructivas se han utilizado para evaluar estructuras de edificios del siglo XVIII, considerando el MOE y con este conocer el estado de las mismas (Osuna-Sequera,C., et al. 2019; (Osuna-Sequera,C., et al. 2020; Sequera,C., et al. 2021; Arriaga,F., et al.2021; Arriaga,F., et al. 2022).

En la construcción, se busca la calidad de los materiales en relación con la durabilidad y resistencia, características cuantificables gracias a las propiedades mecánicas de la madera, por esto la importancia de generar investigación de nuevos métodos de ensayos que sean, rápidos, fiables y no destructivos.

El conocimiento de las características de elasticidad y resistencia variables determinadas por métodos no destructivos explican entre el 40 y 70% de las propiedades mecánicas de la madera Carballo (2009).

Los métodos no destructivos es una alternativa eficiente, pero sobre todo no compromete el uso futuro de las piezas a evaluar, estas evaluaciones actualmente se utilizan con el fin de evitar el desperdicio de material; estos métodos están basados en las propiedades vibráticas de la madera que permiten principalmente determinar el módulo de elasticidad de piezas de madera, de medidas, comerciales con una gran exactitud y rapidez, utilizando para tal fin aparatos pequeños y fáciles de transportar (Álvarez, 1982).

La definición para los ensayos no destructivos (NDT - Nondestructive testing) pueden definirse de la siguiente manera: técnicas las cuales permiten examinar los materiales o sus componentes sin afectar sus propiedades, su integridad y su utilidad final. (Acuña, 2006).

La utilización de la técnica de ultrasonido se inició desde hace más de 50 años (Iñiguez, 2007). A partir del cálculo de la velocidad de las ondas ultrasónicas y acústicas se pueden caracterizar un determinado material, el módulo de elasticidad de la madera, presenta una relación aceptable entre las características obtenidas

por el ensayo ultrasónico y las pruebas de flexión estática. James (1961), Gerhards (1975), James et al., (1982), Bucur (1995), Beall (2002), Kawamoto y Williams (2002) y Pellerin y Ross (2002), Acuña et al., (2006) Carballo (2009).

Así mismo, la velocidad de propagación de los ultrasonidos se ve modificada por la distancia de medida, y el ángulo formado con la dirección de la medida y la inclinación de las fibras, es importante hacer correcciones cuando se trabaje madera de tamaño estructural. Acuña et al., (2006).

El movimiento sónico se encuentra dentro del método de ondas longitudinales, de acuerdo con la frecuencia del movimiento vibratorio inducido en la madera este es perceptible al oído humano, esta se sitúa entre los 16 y 20,000 Hz (Álvarez, 1982); se basa en el fundamento del diapasón que es el estudio y análisis de las vibraciones producidas en el material y la frecuencia propia del mismo. La mecánica del ensayo consiste en impactar con un martillo sobre la pieza estudiada para producir esas vibraciones según la metodología utilizada por Muhammad et. al. (2016).

Es importante señalar que la pieza a evaluar no debe estar empotrada por lo cual esta técnica se ciñe a la utilización en laboratorio e industria de producción de madera o en control de material a la recepción en obra (Carballo, 2009)

Finalmente, el método de flexión estática consiste en un ensayo a flexión con apoyos idénticos en los extremos de la pieza, sometiéndola a cargas conocidas durante el tramo de comportamiento elástico del material. A partir del diagrama fuerza-deformación el módulo de elasticidad se calcula, de acuerdo a las fórmulas clásicas de la mecánica. (Carballo 2009)

Existen fuertes correlaciones entre el módulo de elasticidad dinámico obtenido a partir de la velocidad de una onda de esfuerzo y el módulo estático resultante de ensayos de flexión (Ross y Pellerin, 1991).

Se han realizado ensayos de flexión en vibraciones transversales y estáticas en probetas normalizadas Görlacher (1984), Nakai et al., (1991), Haines et al., (1996)

e Ilic (2001) y (Sotomayor, 2007). Sin embargo, es escasa la investigación referente al módulo de ruptura y de su resistencia en el límite elástico (Sotomayor y Villaseñor, 2005; Sotomayor, 2014; Bucur, 1995 y Prelenia y Ross, 2002).

(Andreini, *et al.*, 2013) uso métodos no destructivos para determinar el MOE en vigas de álamo y encontró que los valores de los MOE local y global son diferentes entre sí en menos del 8%, así mismo determino que el método de vibraciones presentó valores más aproximados a los obtenidos por ensayos destructivos, que por el método de ultrasonido.

Por lo tanto, en esta investigación el objetivo es estimar el módulo de elasticidad en las especies: *Vitex gaumeri* Greenm y *Matayaba oppositifolia*(A.Rich) Britton con tres métodos no destructivos: MOE estático, MOE dinámico mediante vibración y MOE ultrasonido mediante el equipo: Microsecond Timer (Fakopp).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación

La madera se obtuvo de árboles representativos de la selva subperennifolia del ejido de Gustavo Díaz Ordaz de la región de Calakmul, Campeche, situado entre las siguientes coordenadas geográficas: Longitud: 18° 25' 09", Latitud: 89° 08' 10", y 161 msnm. (Figura 1)

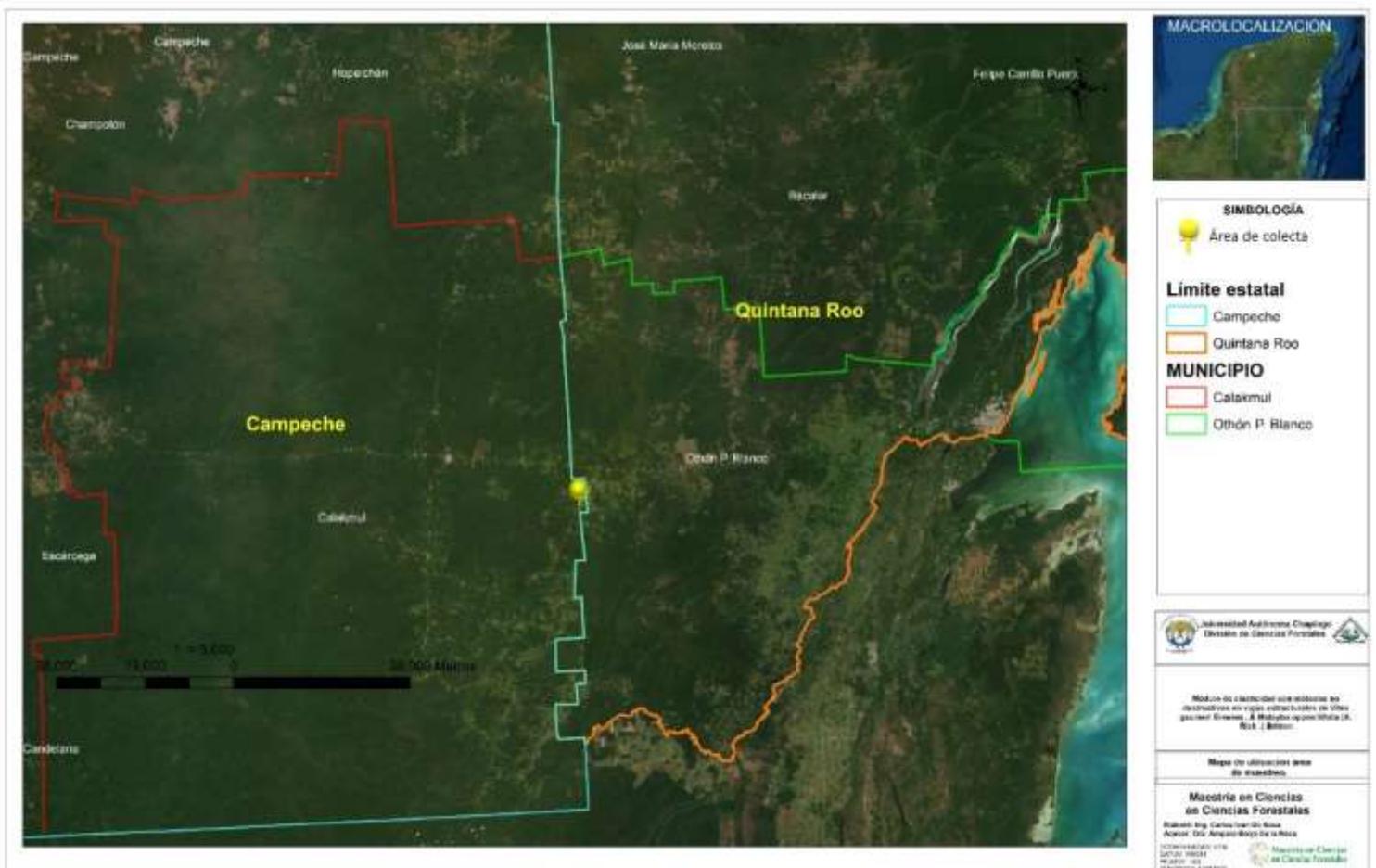


Figura 1: Localización del área de colecta de las muestras de madera.

Los árboles recolectados fueron de las especies *Vitex gaumeri* y *Matayba oppositifolia* en condiciones ambientales similares, se consideraron las siguientes características: árboles sanos, troncos rectos, con diámetro a la altura del pecho (D.A.P.) mayores a 30cm.

La identificación del árbol se realizó en pie con ayuda de los comuneros, una vez derribado el árbol, se realizó la colecta de muestras botánicas para su identificación posterior de acuerdo con Ricker, et al., (2013).

Elaboración de probetas

Para obtener el material experimental se elaboraron 25 vigas de la especie *Matayba oppositifolia* y 17 vigas de la especie *Vitex gaumeri*, en un aserradero local donde fueron habilitadas a las medidas de 5 cm x 15 cm x 4.65 m mediante operaciones de cepillado y canteado.

Las dimensiones de las probetas se registraron con un flexómetro convencional, marca Truper. 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, 2014).

Contenido de humedad

Las vigas se secaron al aire libre durante 3 meses; el contenido de humedad se midió con un Xilohigrómetro de la marca Unit-T, modelo: UT377A, tomando lecturas en los extremos y centro de las vigas, de acuerdo con la norma UNE-EN 13183-2:2002, como se muestra en la (Figura 2).



Figura 2 Medición del contenido de humedad.

Para medir el peso de cada una de las vigas se utilizó un dinamómetro, digital marca Portable electrónica sácale, estas presentaron un contenido de humedad promedio de 13.5%. Figura. 3



Figura 3. Obtención del peso de las probetas.

Determinación del MOE Estático

Para medir el MOE estático se utilizaron dos soportes de madera de la misma altura en los extremos de la viga (Figura 2), colocados en cada extremo, a 20 cm., del mismo

De acuerdo con la metodología de IRAM 9542 (1965), el ensayo de flexión estática mide la resistencia que ofrece una viga a una carga puntual aplicada en el centro de luz o distancia entre apoyos por lo que se colocaron cargas de 5, 7.5, 10 y 15 kg al centro con ayuda de un reloj comparador genérico con una precisión de centésimas de milímetro se registraron las deformaciones que presentaron cada una de las vigas con los respectivos pesos, Figura 4.

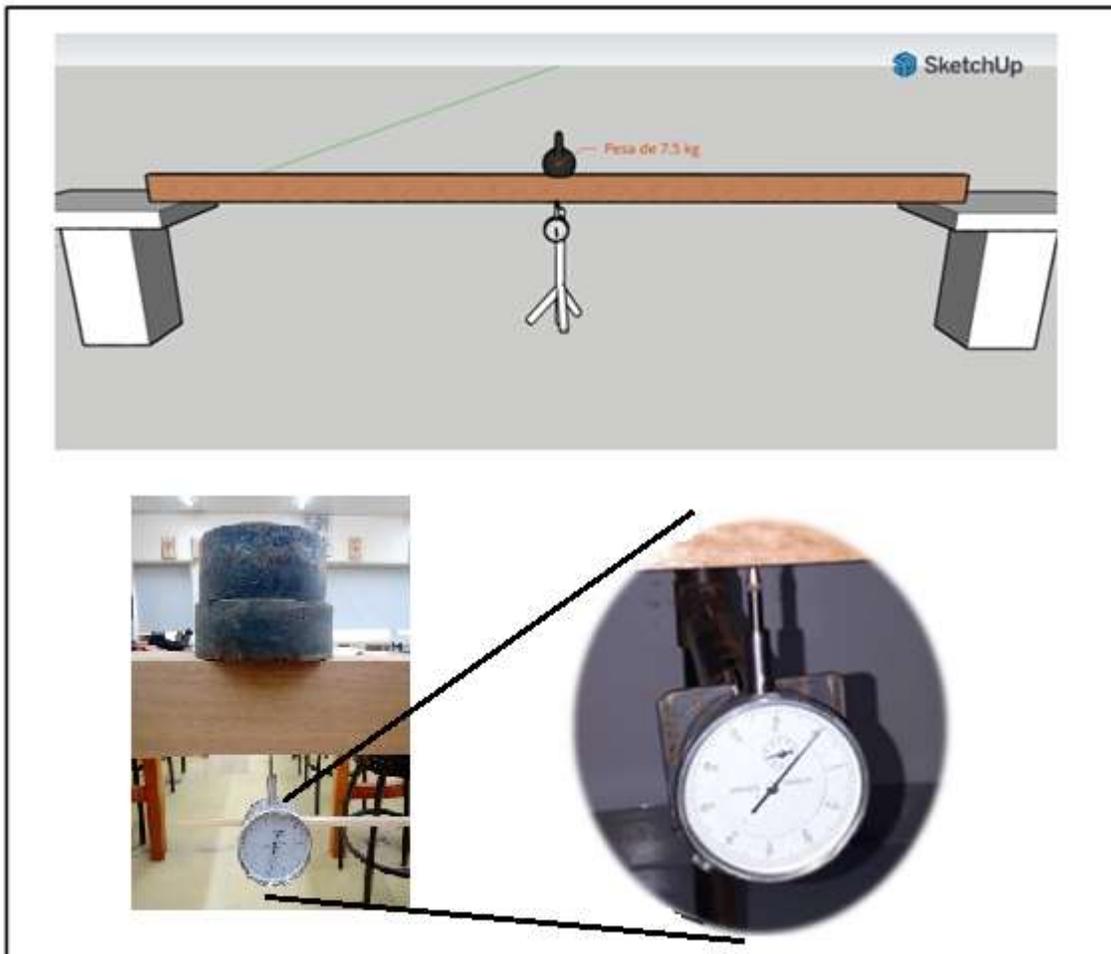


Figura 4. Ensayo del módulo de elasticidad elástico.

La determinación del Módulo de elasticidad en MPa por el método estático se obtuvo con la siguiente ecuación (Bodig & Jane, 1982):

$$MOE_{est} = \frac{\Delta P}{\Delta y} \frac{L_{flex}^3}{48 I} \quad Ec. 1$$

Donde:

MOE_{est} = Módulo de elasticidad (Pa)

ΔP = Intervalo de carga en el dominio elástico (N)

L_{flex}^3 = Distancia entre apoyos (m)

Δy = Intervalo de deformación en el dominio elástico (m)

I = Segundo momento de inercia en la sección transversal (m^4)

MOE dinámico vibración inducida longitudinalmente

La técnica no destructiva de vibración longitudinal se realizó a través del software de análisis FFT BZ-7230, Figura 6, donde se registró el valor de frecuencia de vibración (Hz) resultado de la onda mecánica que viajó a lo largo de cada viga.

El software FFT Analyzer (Transformada rápida de Fourier) se realiza utilizando el algoritmo FFT, donde los filtros se colocan uniformemente en un eje de frecuencia lineal, cada filtro tiene un ancho de banda constante. Además, identifica características de frecuencias de resonancia y armónicos rotacionales. (FFT Analyzer User Manual, 2020)

Para medir el MOE a través de la vibración longitudinal, se colocaron las vigas sobre dos soportes de apoyo en los extremos. A la viga se le colocó un ordenador previsto de un micrófono convencional y el analizador de sonido basado en la transformada de Fourier. Posteriormente, la viga fue golpeada, con un martillo de acero, en un extremo y con el software FFT se registró en el otro extremo la velocidad de la vibración. Figura 5.

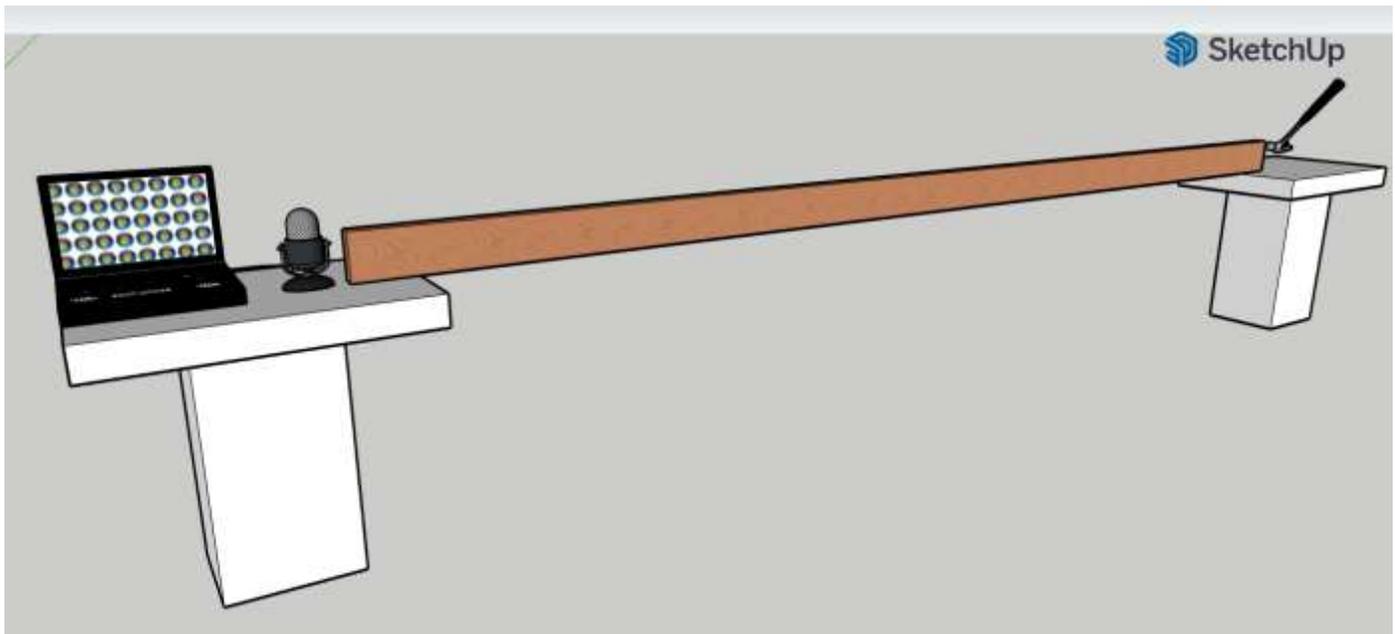


Figura 5. Ensayo del módulo de elasticidad por vibraciones longitudinales.

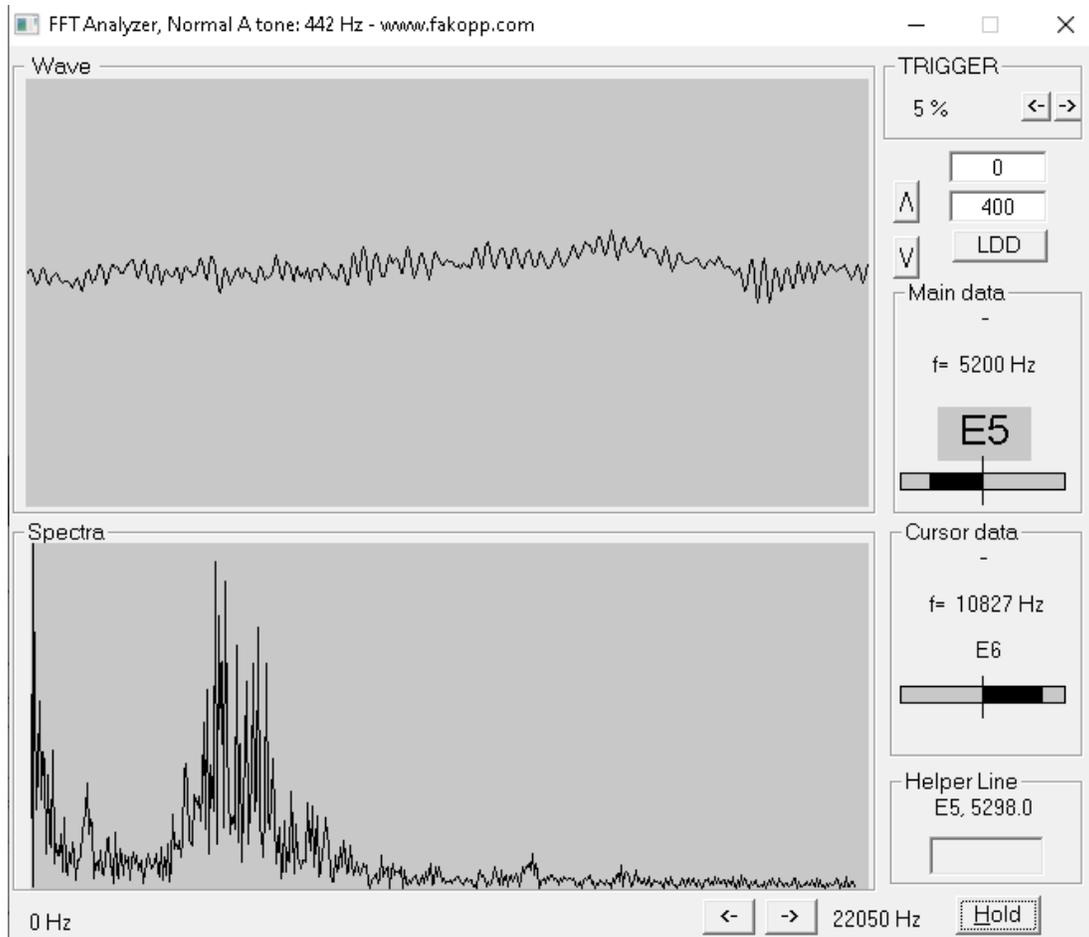


Figura 6. Software FFT Analyzer.

La determinación del Módulo de elasticidad en MPa por el método vibraciones inducidas se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$MOE_{vib} = \rho * v^2 \quad Ec. 2$$

donde: ρ = densidad de la viga en gr/cm^2

v = velocidad del paso de onda, la cual se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$v = 2 * L * f \quad Ec. 3$$

donde: L = longitud de la viga (m)

f = frecuencia de vibración (Hz)

MOE dinámico ultrasonido

La técnica no destructiva por ultrasonido se realizó mediante el equipo Fakopp Microsecond Timer, (Figura 7); el cual mide el tiempo de tránsito de la onda de estrés entre dos transductores. El requisito para obtener una medición precisa es la fijación estable de los transductores.

La velocidad del sonido en madera solida es mucho mayor que en los huecos o en áreas con descomposición. Esta es la razón por la cual el frente de la onda de estrés (impulso de sonido) evita los defectos en el árbol. Si la velocidad medida es menor que la velocidad en un árbol intacto significa que el árbol contiene defectos. (FFT Analyzer User Manual, 2020)

La medición del MOE por ultrasonido se realizó con base a las metodologías seguidas por Acuña, Díaz & Casado (2006) y Sotomayor & Bocanegra, (2011).

La metodología establece que se debe colocar la viga sobre dos soportes de apoyo a una misma altura, después se acoplan los sensores en los extremos con la precaución de hacerlo con marro de goma, se generó una onda con un ligero toque de martillo de acero. Con el equipo FAKOPP, se midió el tiempo que le toma a la misma viajar de un extremo al otro con una precisión de microsegundos.



Figura 7. Fakopp & Sensor acoplado a un extremo de la viga.



Figura 8: Ensayo del módulo de elasticidad por ultrasonido con Fakopp.

Finalmente, la determinación del Módulo de elasticidad en MPa por el método ultrasonido se realizó con la ecuación 2, pero previamente se debe obtener la “v” de la siguiente manera:

$$v = \frac{L}{t} \quad \text{Ec. 4}$$

donde: L = longitud de la viga (m)

t = tiempo de paso de la onda entre emisor y receptor en μs (microsegundos)

Análisis Estadístico

Los MOE's calculados por los tres métodos de ambas especies serán evaluados en conjunto para generar un análisis descriptivo con la finalidad de determinar el método de menor variabilidad al momento de la determinación del módulo de elasticidad de la madera. Los principales indicadores estadísticos serán la media, desviación estándar, intervalo de confianza y coeficiente de variación.

Será verificada la normalidad de las varianzas de cada una de las especies con respecto a cada uno de los tres métodos, para dicho análisis será utilizada la prueba de Shapiro-Wilk en RStudio. Con respecto a la igualdad u homogeneidad de las varianzas se llevará a cabo la prueba de Bartlett en el mismo software antes mencionado, haciendo el análisis entre los tres métodos no destructivos para cada una de las especies, en el caso de generarse heterogeneidad entre las varianzas, se correrá la misma prueba analizando todas las posibles combinaciones entre los tres métodos no destructivos para cada una de las especies.

En caso de haber determinado normalidad y homogeneidad se realizará un análisis de la varianza (ANDEVA) la cual permitirá encontrar diferencias significativas entre los tipos de ensayos así como la especie evaluada con respecto a los valores del módulo de elasticidad obtenidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez realizadas las pruebas correspondientes sobre las 25 vigas de la especie *Matayba oppositifolia* y 17 vigas de la especie *Vitex gaumeri* el análisis de los resultados se presenta a continuación

Análisis descriptivo

Analizando los módulos de elasticidad promedio por especie, en todos los casos, fueron mayores en la especie *Matayba oppositifolia* que en *Vitex gaumeri* (Tabla 1). Además, la especie *Matayba oppositifolia* presentó una mayor variabilidad entre métodos; el estático, en ambas especies registró las mayores varianzas. Lo anterior implica que tal método es el menos preciso para determinar el módulo de elasticidad. En contraste, el método Fakopp resultó ser más preciso al presentar menor variabilidad en ambas especies (Tabla 1).

Tabla 1. Módulo de elasticidad con los métodos: estático, vibraciones y ultrasonido (Fakopp).

<i>Especie</i>	<i>Método</i>	<i>n</i>	<i>Media</i>	<i>I.C.</i>	<i>D.E.</i>	<i>C.V. (%)</i>
<i>Matayba oppositifolia</i>	Estático	25	13058	(11945,14171)	2,696.81	20.7
	Vibraciones longitudinales	25	17322	(16383,18261)	2,273.69	13.1
	Fakopp	25	18171	(17374,18968)	1,931.58	10.3
<i>Vitex gaumeri</i>	Estático	17	9582	(8605,10559)	1,900.10	19.8
	Vibraciones longitudinales	17	12575	(11651,13499)	1,797.05	14.3
	Fakopp	17	12898	(12238,13558)	1,283.25	9.9

n= tamaño de muestra, I.C.= Intervalo de confianza (95%), D.E.= Desviación estándar, C.V. = Coeficiente de variación.

Para realizar el Análisis de Varianza (andeva) se verificaron los supuestos de normalidad e igualdad de varianzas de los datos (módulo de elasticidad), Para probar normalidad se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk y para la homogeneidad de varianzas se aplicó la prueba de Bartlett, en ambas pruebas se consideró un nivel de significancia de 0.05. Los resultados se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 2. Verificación de los supuestos de la especie *Matayba oppositifolia*

SUPUESTO	MÉTODO	ESTADÍSTICO	P_VALOR
NORMALIDAD	Estático	0.96686	0.5669
	Vibraciones	0.97083	0.6662
	Fakopp	0.94999	0.2506
HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS	Estático		
	Vibraciones	2.6074	0.2715
	Fakopp		

Tabla 3. Verificación de los supuestos de la especie *Vitex gaumeri*

SUPUESTO	MÉTODO	ESTADÍSTICO	P_VALOR
NORMALIDAD	Estático	0.96577	0.7411
	Vibraciones	0.94263	0.3507
	Fakopp	0.95999	0.6313
HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS	Estático		
	Vibraciones	2.5639	0.2775
	Fakopp		

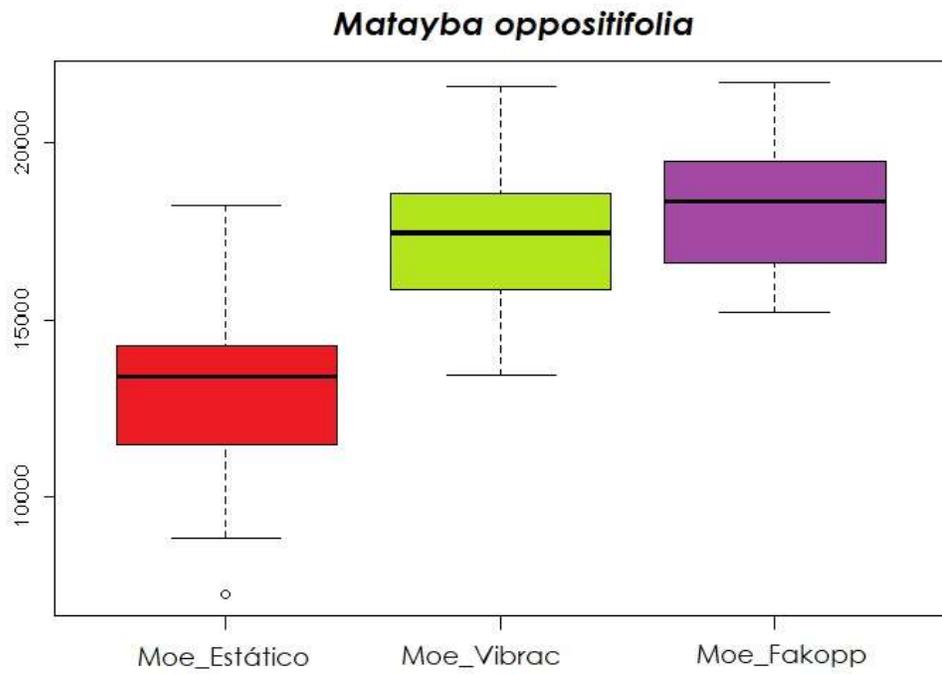


Figura 9. Diagrama de caja de la distribución de los MOE's para *Matayba oppositifolia*.

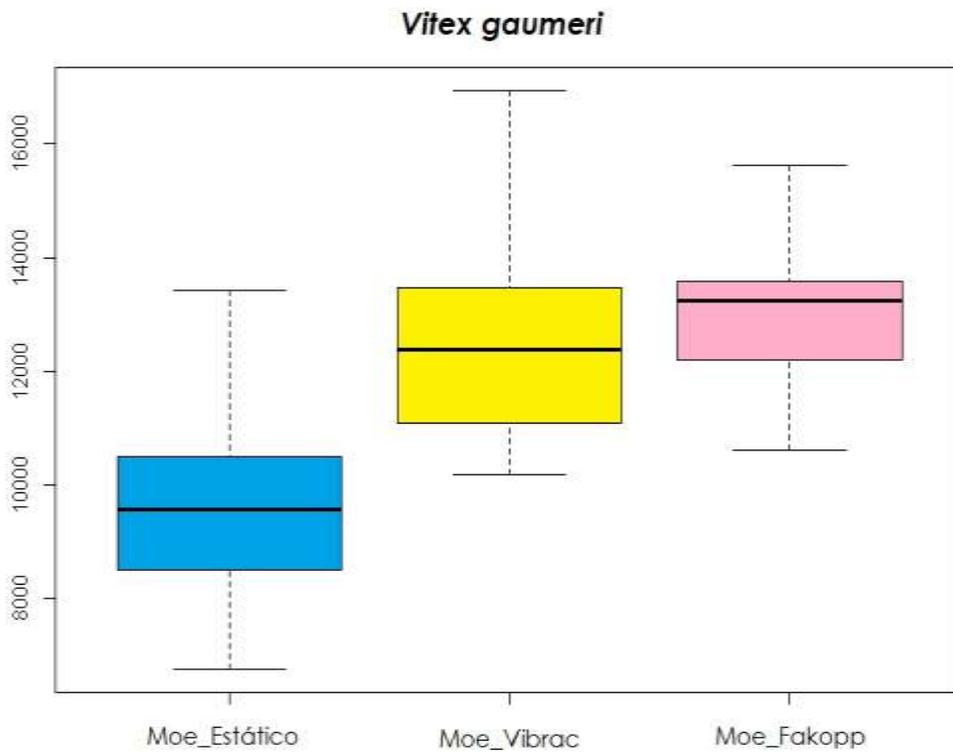


Figura 10. Diagrama de caja de la distribución de los MOE's para *Vitex gaumeri*.

Análisis de Varianza

Una vez verificado los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, se procedió a obtener al análisis de varianza para el diseño factorial, cuyos resultados se presentan en la, Tabla 4.

Tabla 4. Análisis de varianza del Módulo de Elasticidad.

<i>Fuentes de variación</i>	<i>Grados de Libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrados medios</i>	<i>F calculada</i>	<i>p_valor</i>
<i>Método</i>	2	471,795,508	235,897,754	54.028	<2e-16 ***
<i>Especie</i>	1	614,375,777	614,375,777	140.711	<2e-16 ***
<i>Método Especie</i>	2	17,264,483	8,632,241	1.977	0.143
<i>Error</i>	120	523,948,156	4,366,235	---	

Analizando los resultados de la Tabla 4 se tiene que tanto los métodos como las especies resultaron significativos con un nivel de significancia de 0.05. Es decir, el efecto del método y de la especie son diferentes de cero; en otras palabras, el tipo de método si presenta un efecto significativo sobre la determinación del módulo de elasticidad, también la especie evidenció el efecto significativo en dicho módulo. Sin embargo, la interacción entre el método y especie no fue significativa; lo cual implica que el método y la especie son independientes.

Siendo los valores de las 2 especies diferentes de forma significativa ($p < 0.05$), procedemos a comparar los valores de los diferentes Métodos de ensayo (Módulos de elasticidad). El Análisis se llevará a cabo con la prueba HSD (High Significant Difference) de Tukey.

Dado que el factor método resultó significativo y como un objetivo es comparar los métodos se llevó a cabo una comparación de medias entre métodos con el procedimiento de Tukey con un nivel de significancia de 0.05. Los resultados se muestran en la Tabla 5

Tabla 5. Comparación de medias.

Método	diferencia	li	ls	p_valor
F-E	4385.6090	3303.506	5467.7123	0.0000000
V-E	3749.9381	2667.835	4832.0415	0.0000000
V-F	-635.6709	-1717.774	446.4325	0.3472113

E= Estático, V= Vibratorio y F= Fakopp

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 5 se puede concluir que no existen diferencias estadísticas significativas entre los métodos Vibraciones longitudinales y ultrasonidos (Fakopp) debido a que el p_valor es mayor que 0.05; mientras que, ambos resultaron ser significativamente diferentes al método estático, el p_valor fue menor que 0.05 en los 2 casos.

La confiabilidad de los métodos no destructivos, se corroboraron de acuerdo con Acuña (2006); Beall (2002); Baettig (2001); Pellerin y Ross (2002) y Carballo, et al., (2007), Soto mayor, et al., (2014).

Hernández et. al. (2013). Reporta una densidad básica de 0.67 gr/cm^3 para la madera de *Vitex gaumeri*, mientras que en esta investigación con respecto a *Vitex gaumeri* obtuvimos un promedio de 0.85 gr/cm^3 a un C.H. promedio de 13.4%; mientras que para *Matayba oppositifolia* se obtuvieron valores promedio de 1.08 gr/cm^3 a un C.H. de 13.9%.

Los datos obtenidos en la presente investigación, donde el MOE estático tanto para *Vitex gaumeri* como para *Matayba oppositifolia* presenta un coeficiente de variación alrededor del 20%., coincide con lo obtenido por Muhammad et. al. (2016) en tableros de madera que fue de 3-20% de coeficiente de variación ya que existe una tendencia la cual indica que el valor MOE dinámico de vibraciones longitudinales (NDT) es mayor que el valor MOE de la prueba de flexión estática. Por otra parte, estudios realizados en Pino de Calabria (*Pinus nigra* Arnold subsp). Reportaron MOE dinámicos en promedio de 9,900.43 Mpa por debajo de lo reportado en ese estudio para *Vitex gaumeri* y *Matayba oppositifolia*, sin embargo, el valor de las

especies mencionadas se puede deber entre otras propiedades a que estas estas presenta una densidad alta y el pino es de densidad baja a media. Además, los datos de pino fueron obtenidos de árboles en pie. Proto et. al. (2017)

CONCLUSIONES

La especie *Matayba oppositifolia* tiene mayor resistencia a la deformación por cargas en flexión con respecto a la especie *Vitex gaumeri*, era de esperarse ya que la primera presentó una densidad básica promedio de 1.08 gr/cm^3 mientras la segunda de 0.85 gr/cm^3 , ambas especies muestran módulos de elasticidad aceptables para ser utilizadas como madera estructural en la construcción.

Estadísticamente no existen diferencias significativas en los resultados del método por vibraciones longitudinales y ultrasonidos (Fakopp), por lo que la aplicación de cualquiera de estos dos métodos proporcionará resultados similares y aceptables.

El uso de métodos de ensayo no destructivos representa una ventaja ante los métodos tradicionales destructivos, ya que este permite utilizar las piezas ensayadas como productos finales y/o ser comercializadas, además es fácil y rápido evaluar la madera tanto en campo, aserradero, obra en construcción, en uso, etc. haciendo más eficiente el proceso de investigación.

El método estático que consiste en colocar cargas puntuales no es recomendable debido a que además de ser el método con mayor variabilidad, no es capaz de detectar imperfecciones a lo largo del cuerpo de la madera, porque como su nombre lo indica, la prueba se hace en un punto específico de la viga, mientras que los otros dos métodos utilizan energía que viaja a través de toda la viga, y las variaciones de energía de la herramienta emisora con respecto a la receptora, son claros indicadores de defectos internos en la madera.

Aunque no existen diferencias estadísticamente significativas entre el método vibratorio y el método de Fakopp por el tipo de equipo que se requiere en cada método se puede recomendar ampliamente utilizar el método vibratorio, el cual es más práctico y económico.

Literatura citada

- Acuña, L., Díez, M., & Casado, M. (2006). *Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a Pinus pinaster Ait.* Palencia, España: Boletín Informativo del CIDEU 2:7-26(ISSN: 1885-5237).
- Andreini, V., Quiroga, M., & Rabolini, S. (2013). Determinación del módulo de elasticidad en vigas de álamo 2" x 3" mediante ensayos no destructivos. *Nota técnica N°4.*
- Álvarez, H. N. (1982). *Determinación del módulo de elasticidad de la madera por métodos vibráticos.* Madrid, España: AITIM. Asociación de Investigaciones de las Industrias de la Madera.
- Arriaga, F., Osuna-Sequera, C., Esteban, M., Iñiguez-González, G., & Bobadilla, I. (2021). In situ assessment of the timber structure of an 18th century building in Madrid, Spain. *Construction and Building Materials* 304: 124466. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124466>
- Arriaga, F., Osuna-Sequera, C., Bobadilla, I., & Esteban, M. (2022). Prediction of the mechanical properties of timber members in existing structures using the dynamic modulus of elasticity and visual grading parameters. *Construction and Building Materials* 322 :126512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126512>
- Beall, F.C. 2002. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology.* (36):197-212.
- Brüel & Kjær. 2020. FFT Analysis Software BZ-7230 and Tone Assessment Option BZ-7231. www.bksv.com.
- Bucur, V. 1995. *The acoustics of wood.* CRC Press.
- Bodig, J. & Jayne, B.A. (1982). *Mechanics of Wood Composites.* Van Nostrand Reinhold, USA. Comisión Forestal de América del Norte (COFAN). (1994). *Manual de Construcción de Estructuras Ligeras de Madera.* México. Consejo Nacional de la Madera en la Construcción, A.C.
- Carballo, J. C.; Hermoso P.E.; Díez R. B. (2009). Ensayos no destructivos sobre madera estructural. Kurú: *Revista Forestal (Costa Rica)* 6(17).
- Cedeño, V. A. (2013). La madera. ¿Una alternativa para proteger el medioambiente? [Wood: An alternative to protect the environment?]. *Revista de Arquitectura*, 15, 111-119. <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2013.15.1.12>

- Fukun, X.; Houran, W.; Gang, L. (2019) Study on Multiparameter Precursory Information Identification of the Fracture of Yellow Sandstone. Adv. Civ. Eng., 7676801, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2019/7676801>
- Gerhards, C.C. 1975. Stress wave speed and MOE of sweetgum ranking from 150 to 15 percent moisture content. Forest Products Journal. 25(4):51-57.
- Görlacher, R. 1984. Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des E-modulus von Holz. Holz als Roh-und Werkstoff. 42:212-222.
- Haines, D.W.; Leban, J.M.; Herbé, C. 1996. Determination of Young`s modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. Wood Science and Technology. 30:253-263.
- Hernández S. J.J.;J.G Rivera R. y R. Espinoza H. 2013. Propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Vitex gaumeri* (Ya'axnik). Reusmen del IV Congreso Mexicano de Recursos Forestales, celebrado en Octubre de 2013. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", Saltillo, Coahuila, México.
- Ilic, J. 2001. Relations among the dynamic and static elastic properties of air-dry Eucalyptus delegatensis R. Baker. Holz als Roh- und Werkstoff. 59:169-175.
- International Organization for Standardization. 2014. 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.
- Íñiguez, G. G., Arriaga, M. F., Esteban, H. M., & Argüelles, A. R. (2007). *Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural*. Informes de la construcción, 506(59),. <https://doi.org/10.3989/ic.2007.v59.i506.512>
- IRAM 9542. (1965). *Maderas – Método de ensayo de flexión estática de maderas con peso específico aparente mayor de 0,5g/cm³*. Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- James, W.L. 1961. Effect of temperature and moisture content on: Internal Friction and Speed of Sound in Douglas-fir. Forest Products Journal. 11(9):383-390.
- James, W.L.; Boone, R.S.; Galligan, W.L. 1982. Using speed of sound in wood to monitor drying in a kiln. Forest Products Journal. 32(1):27-34.

- 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. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-134>
- Meli, R. (1998). Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos. Fundación ICA, primera edición, México DF.
- Muhammad N. R.; T. Agus P.; S. Suzuki. 2016. Dynamic modulus of three-layer boards with different furnish and shelling ratio. Journal of the Korean Wood Science and Technology <https://doi.org/10.5658/WOOD.2016.44.2.274>
- Nakai, T.; Tanaka, T.; Nagao, H. 1991. Nondestructive Evaluation of Bending Properties of Flat Square Sawn Timber. In: Proceedings of the 1991 International Timber Engineering Conference. Volume 2. United Kingdom. pp: 2.236-2.241.
- Osuna-Sequera,C., Llana,D.F., Esteban M., & Arriaga, F. (2019) Improving density estimation in large cross-section timber from existing structures optimizing the number of non-destructive measurements. *Construction and Building Materials* 211: 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.144>
- Osuna-Sequera,C., Llana,D.F., Hermoso,E. & Arriaga,F. (2021). Acoustic wave velocity in long pieces of Salzmann pine for in-situ structural assessment. *Construction and Building Materials* 269 : 121256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.144>
- Osuna-Sequera,C., Llana,D.F., Íñiguez-González.,G. & Francisco Arriaga,F. (2020).The influence of cross-section variation on bending stiffness assessment in existing timber structures. *Engineering Structures* 204:110082.doi <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110082>
- Pellerin, R.F.; Ross, R.J. Editors. 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society.USA
- Proto A.R.; Macrì G.; Bernardini V.; Russo D.; Zimbalatti G. (2017). *Acoustic evaluation of wood quality with a non-destructive method in standing trees: a first survey in Italy*. iForest vol 10: 700-706pp. – doi: 10.3832/ifor2065-010
- Qiu,Q., Qin,R., Lam, J.H.M., Tang, A.M.C., Leung, M.W.K., & Lau,D. (2018).An innovative tomographic technique integrated with acoustic-laser approach for detecting defects in tree trunk, *Computers and Electronics in Agriculture* 156 : 129–137 <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.017>

- Ricker, M. & Rincón A. (2013). Manual para realizar las colectas botánicas del Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Instituto de Biología. Universidad Autónoma de México. D.F.
- Ross, R.J.; Pellerin, R.F. 1991. NDE of green material with stress wave: preliminary results using dimension lumber. *Forest Products Journal*. 41(6):57-59.
- Santini, L., Ortega, Rodriguez.D.R., Trindade Quintilhan,M., Brazolin,S., & Tommasiello Filho.M.(2019) Evidence to wood biodeterioration of tropical species revealed by nondestructive Techniques. *Science of the Total Environment* 672 :357–369.<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.429>
- Sharma,V., Yadav,J., Kumar,R., Tesarova,D., Ekielski,A.,& Kumar, M.P.(2020).On the rapid and non-destructive approach for wood identification using ATR-FTIR spectroscopy and chemometric methods. *Vibrational Spectroscopy* 110 (2020) 103097. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103097>
- Sotomayor (2007). Módulos de elasticidad evaluada por métodos no destructivos y ruptura de la madera de Pinus douglasiana. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. <http://dx.doi.org/10.15174.au.2014.624>
- Sotomayor (2014). Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Sotomayor Castellanos, J.R.; Villaseñor Aguilar, J.M. 2005. Comportamiento a la ruptura de probetas modificadas de madera de Prosopis sp. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 1(2): 3-9. México.
- Torres, C. D. (2020). Estimación y Clasificación de las Propiedades Mecánicas de 149 Especies Mexicanas de Importancia Industrial con Métodos No Destructivos. Chapingo, México: División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo.