


# Módulo dinámico por vibraciones transversales de la madera de *Abies sachalinensis* (todomatsu) y *Ostrya japonica* (asada)

## Dynamic modulus by transversal vibrations of the wood of *Abies sachalinensis* (todomatsu) and *Ostrya japonica* (asada)

Javier Ramón Sotomayor Castellanos<sup>1</sup>  • Koji Adachi<sup>2</sup>  • Firas Hawasly<sup>2</sup>   
• Sonia Correa Jurado<sup>1</sup> 

Recibido: 20/05/2025

Aceptado: 24/06/2025

### Abstract

The modulus of elasticity of wood is an essential parameter in structural analysis, particularly in limit state methodologies and probabilistic methods. This study aimed to determine and contrast the densities and dynamic moduli of *Abies sachalinensis* and *Ostrya japonica* through non-destructive tests, to identify correlations between these properties. A total of 32 specimens of each species were prepared. The density and moisture content were determined according to ISO standards, and transverse vibration tests were conducted using an FFT analyzer. The results showed that *O. japonica* has a density 58% higher than that of *A. sachalinensis*, while the dynamic modulus of the latter is 39% higher. Statistical evaluations indicate significant differences between species in both density and dynamic modulus. Additionally, differentiated anatomical structures were identified that justify the variations in mechanical properties. The obtained values were positioned in relation to bibliographic data of woods from Mexico and India, highlighting *O. japonica* for its relatively high density and *A. sachalinensis* for its behavior similar to international trends. This study demonstrates the feasibility of using non-destructive dynamic methods to mechanically characterize little-studied woods, providing valuable information for their application in structural design, industrialization, and the development of value-added products

**Keywords:** *Abies sachalinensis*, *Ostrya japonica*, Mexico, Japan, Non-destructive testing.

1. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. [Javier.sotomayor@umich.mx](mailto:Javier.sotomayor@umich.mx); [0213761h@umich.mx](mailto:0213761h@umich.mx)

2. Universidad Prefectoral de Akita, Japón. [kadachi@iwt.akita-pu.ac.jp](mailto:kadachi@iwt.akita-pu.ac.jp); [hawasly\\_firas@iwt.akita-pu.ac.jp](mailto:hawasly_firas@iwt.akita-pu.ac.jp)

## Resumen

El módulo de elasticidad de la madera es un parámetro esencial en el análisis estructural, particularmente en metodologías basadas en estados límite y métodos probabilísticos. Este estudio tuvo como objetivo determinar y contrastar las densidades y módulos dinámicos de *Abies sachalinensis* y *Ostrya japonica* mediante pruebas no destructivas, con el fin de identificar correlaciones entre dichas propiedades. Se prepararon 32 probetas de cada especie. Se determinaron la densidad y el contenido de humedad según normas ISO, y se realizaron pruebas de vibraciones transversales utilizando un analizador FFT. Los resultados mostraron que *O. japonica* presenta una densidad 58 % superior a la de *A. sachalinensis*, mientras que el módulo dinámico de esta última es 39 % mayor. Las evaluaciones estadísticas indican diferencias significativas entre especies tanto en densidad como en módulo dinámico. Además, se identificaron estructuras anatómicas diferenciadas que justifican las variaciones en las propiedades mecánicas. Los valores obtenidos se posicionaron respecto a datos bibliográficos de maderas de México e India, destacando a *O. japonica* por su densidad relativamente elevada y a *A. sachalinensis* por su comportamiento alineado con las tendencias internacionales. Este estudio evidencia la viabilidad de utilizar métodos dinámicos no destructivos para caracterizar mecánicamente maderas poco estudiadas, aportando información valiosa para su aplicación en diseño estructural, industrialización y desarrollo de productos con valor agregado.

**Palabras clave:** *Abies sachalinensis*, *Ostrya japonica*, México, Japón, Pruebas no destructivas.

## Introducción

El módulo de elasticidad constituye uno de los parámetros esenciales para el diagnóstico estructural utilizando el método del elemento finito [1], en las metodologías fundamentadas en los estados límite [2] y en el análisis probabilístico [3]. Para el diseño sísmico, es igualmente aconsejable disponer de información relativa al módulo de elasticidad evaluado bajo condiciones dinámicas, como en el caso de las vibraciones transversales [4].

La caracterización mecánica de la madera, a través de la realización de pruebas dinámicas, representa un enfoque experimental alternativo y se observa una clara tendencia contemporánea hacia la adopción de métodos no destructivos para este fin [5]. Por ejemplo, el método de vibraciones transversales ASTM D6874-12 [6], ha probado su eficacia para determinar el módulo dinámico de la madera. Además, otros autores han utilizado el ultrasonido [7], ondas de esfuerzo [8] y han aplicado vibraciones transversales y longitudinales [9].

Para diferentes especies y materiales compuestos a base de madera la literatura reporta valores del módulo dinámico determinado por distintos métodos experimentales [10]. Estas investigaciones están orientadas principalmente para establecer valores empleados para el cálculo y el diseño de elementos de estructuras [11], [12]. En este contexto, los métodos que emplean vibraciones han demostrado su utilidad para la determinación del módulo dinámico de madera y sus compuestos derivados [13]. Estas tecnologías son relevantes a nivel práctico para fomentar la industrialización de la madera y el avance en la ingeniería estructural, el mobiliario y la decoración de interiores, el transporte y los instrumentos musicales [14].

Las maderas de *Abies sachalinensis* (C. F. Schmidt) Mast. (todomatsu) y de *Ostrya japonica* Sarg. (asada) son endémicas de Japón y utilizadas en la industria de productos de madera. Ambas especies muestran un potencial para ampliar su uso en productos con valor agregado [15]. Sin embargo, y a pesar de ser un material importante en ingeniería, hay poca investigación sobre su comportamiento mecánico y no se localizaron datos sobre su módulo dinámico calculado por vibraciones transversales.

El propósito del estudio fue determinar y contrastar las densidades y módulos dinámicos de la madera de *A. sachalinensis* y *O. japonica* a través de pruebas de vibraciones transversales para analizar las posibles correlaciones entre dichas propiedades. La investigación se circunscribe a los hallazgos en estas especies, así como para un estudio de caso observando probetas de tamaño reducido y evaluadas con una prueba no destructiva.

## Materiales y métodos

### Materiales

La madera proviene de árboles desarrollados en la Prefectura de Akita, Japón. La madera se adquirió en forma de troncos en un aserradero de la Prefectura de Akita, Japón (9°43'12" N, 140°06'09" E) y se cuidó que estuviera libre de defectos de crecimiento y/o de secado y manufactura. El taxón botánico se determinó en el Instituto de Tecnología de la Madera de la Universidad Prefectoral de Akita, Japón. Se recortaron al azar 32 probetas de madera sólida de *A. sachalinensis* y 32 probetas de *O. japonica* y se almacenaron en una cámara de acondicionamiento con temperatura de 20 °C ( $\pm$  1°C) y un contenido de humedad del aire de 65% ( $\pm$  5%) hasta alcanzar un contenido de humedad (CH) de 12%. Sus dimensiones fueron 20 mm x 20 mm de sección transversal y 44 mm de longitud correspondientes a las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera.

**Métodos**

El contenido de humedad de la madera se evaluó por el método de diferencia de pesos, según la norma ISO 13061-1 [16] y se determinó la densidad de acuerdo con la norma ISO 13061-2 [17]. Para la identificación anatómica de las especies las secciones transversales de las probetas fueron examinadas con un microscopio electrónico MiniscopeTM3030Plus (Hitachi, Japón). Se realizaron pruebas de vibraciones transversales empleando el analizador FFT AD-3537 (A&D, Japón) adaptando el protocolo reportado por [18]. El movimiento de las probetas se inició con un impacto elástico empleando un bastón flexible de 30 g de peso. Las vibraciones fueron registradas con un micrófono y las frecuencias naturales en el primer modo de vibración se leyeron directamente en el aparato con una precisión de 1 Hz.

Los ensayos dinámicos no destructivos consistieron en el estudio de la probeta modelada como una barra continua, de sección transversal rectangular, con geometría uniforme y estructuralmente homogénea, sometida a vibración transversal sobre apoyos simples e idealizando la madera como un material elástico (Figura 1). Así, el análisis modal se realizó a partir de la ecuación de movimiento (1) [19] en vibraciones transversales de una barra equivalente a la probeta de madera presentada en la Figura 1.

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m_l \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \left( m_l r^2 + \frac{EI m_l}{K' AG} \right) \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{m_l^2 r^2}{K' AG} \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0 \quad (1)$$

Donde:  $E$  es el módulo de elasticidad de la madera ( $N\ m^{-2}$ );  $I$  es el momento de inercia de la sección transversal de la probeta ( $m^4$ );  $m_l$  es la masa por unidad

de longitud de la probeta ( $kg\ m^{-1}$ );  $A$  es el área de la sección transversal de la probeta ( $m^2$ );  $G$  es el módulo de rigidez de la madera ( $N\ m^{-2}$ );  $y$  es el desplazamiento en la dirección transversal de la probeta ( $m$ );  $x$  es la distancia en la dirección longitudinal de la probeta ( $m$ );  $t$  es el tiempo ( $s$ );  $K'$  es el factor de forma en cortante (0,833 para probetas prismáticas);  $r$  es el radio de giro de la sección transversal de la probeta ( $m^2$ ), con:  $r = \sqrt{I/A}$ .

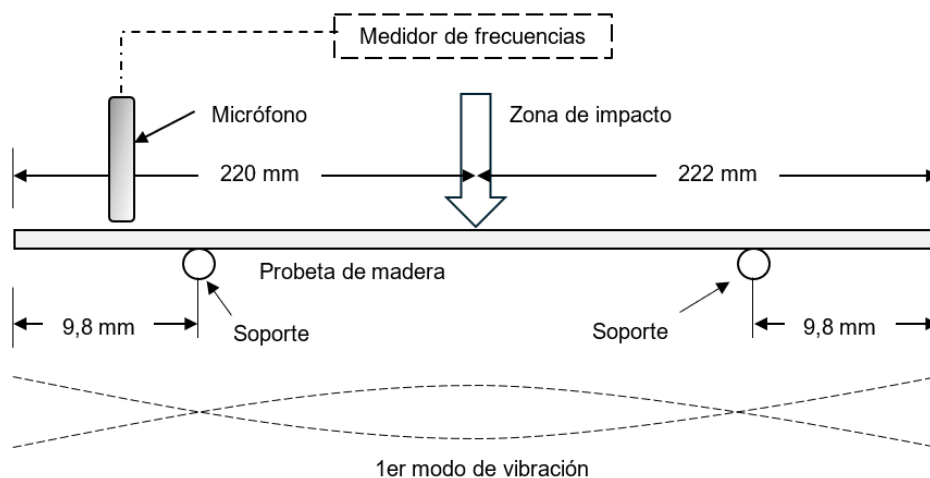
En la ecuación (1), el primer término de la izquierda está ligado a la rigidez de la probeta, el segundo a la inercia del movimiento, el tercer término representa el efecto de la inercia de rotación de la sección transversal de la probeta y el cuarto significa el efecto del esfuerzo cortante interno. Una solución numérica de la ecuación (1) para el caso de una probeta de sección rectangular, apoyada sobre soportes rígidos de tipo simple-simple, ha sido aplicada en estudios con madera por [20]. Con esta ecuación (2) se calculó el módulo dinámico.

$$E_{vt} = \frac{4 \pi^2 L^4 f^2 \rho_{CH}}{m^4 r^2} \times \left[ 1 + \frac{r^2}{L_{vt}^2} K \right] \quad (2)$$

Donde:  $E_{vt}$  es el módulo dinámico ( $N\ m^{-2}$ );  $L$  es la longitud de la probeta ( $m$ );  $L_{vt}$  es la distancia entre apoyos ( $m$ );  $f$  es la frecuencia natural (Hz);  $\rho_{CH}$  es la densidad ( $kg\ m^{-3}$ );  $r$  es el radio de giro de la sección transversal de la probeta ( $m^2$ );  $m$ ,  $K$  es la constantes adimensionales (12,65; 49,48).

**Diseño experimental**

Se elaboró un diseño totalmente aleatorio y equilibrado. La unidad experimental se compuso de dos conjuntos



**Figura 1.** Configuración de las pruebas de vibraciones transversales. Fuente: Elaboración propia.

**Figure 1.** Setup of the transverse vibration tests.

de muestras (niveles). Uno proviene de la especie *A. sachalinensis* y otro de *O. japonica*. Las variables de respuesta consistieron en los resultados experimentales de la densidad y del módulo dinámico correspondientes. La diferencia en especie se considera el tratamiento.

Se calcularon para cada muestra su media ( $\mu$ ), su desviación estándar ( $\sigma$ ) y su coeficiente de variación ( $CV = \sigma/\mu$ ). Se llevaron a cabo evaluaciones de normalidad de las distribuciones (Fisher) mediante el cálculo del sesgo (S) y apuntamiento (A), utilizando el criterio de demarcación de  $[-2 < S, A < +2]$ . En casos donde los hallazgos no cumplieron con el criterio de demarcación, se efectuaron pruebas de Kruskal-Wallis (K-W). Se llevaron a cabo evaluaciones de verificación (Levene) y análisis de varianza (Anova), además de pruebas de

**Cuadro 1.** Densidades y módulos dinámicos determinados por vibraciones transversales de la bibliografía.

**Table 1.** Densities and dynamic moduli determined by transverse vibrations from the literature.

Sotomayor (2016) [21]			
No.	Especie	$\rho_{CH}$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )	Evt ( $\text{MN m}^{-2}$ )
1	<i>Abies religiosa</i>	462	7 178
2	<i>Acacia farnesiana</i>	901	13 965
3	<i>Acosmium panamense</i>	1 005	16 045
4	<i>Albizia plurijuga</i>	844	13 993
5	<i>Alnus acuminata</i>	541	11 436
6	<i>Andira inermis</i>	658	8 843
7	<i>Caesalpinia platyloba</i>	825	13 681
8	<i>Cedrela odorata</i>	529	8 051
9	<i>Cordia elaeagnoides</i>	878	13 536
10	<i>Cupressus lindleyi</i>	486	8 034
11	<i>Dalbergia granadillo</i>	1 147	20 236
12	<i>Dalbergia paloescrito</i>	833	11 569
13	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	467	6 224
14	<i>Fagus mexicana</i>	642	10 178
15	<i>Fraxinus americana</i>	631	10 901
16	<i>Fraxinus uhdei</i>	603	10 250
17	<i>Guazuma ulmifolia</i>	730	8 765
18	<i>Gyrocarpus americanus</i>	395	5 340
19	<i>Juglans pyriformis</i>	728	12 187
20	<i>Lysiloma acapulcensis</i>	893	13 269
21	<i>Pinus douglasiana</i>	538	13 828
22	<i>Pinus pseudostrobus</i>	516	14 120
23	<i>Platymiscium dimorphandrum</i>	866	14 077

(Continúa en la siguiente columna)

No.	Especie	$\rho_{CH}$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )	Evt ( $\text{MN m}^{-2}$ )
24	<i>Psidium sartorianum</i>	789	8 906
25	<i>Quercus scytophylla</i>	852	13 922
26	<i>Quercus spp.</i>	791	14 972
27	<i>Spathodea campanulata</i>	344	3 133
28	<i>Swietenia humilis</i>	757	9 098
29	<i>Swietenia macrophylla</i>	531	8 548
30	<i>Tabebuia chrysantha</i>	1 096	17 131
31	<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	598	8 342
32	<i>Tabebuia rosea</i>	621	10 660
33	<i>Tilia mexicana</i>	442	8 610
Chauhan y Sethy (2016) [22]			
1	<i>Acacia auriculiformis</i>	722	15 530
2	<i>Bombax ceiba</i>	437	8 350
3	<i>Eucalyptus hybrid</i>	726	15 770
4	<i>Grevillea robusta</i>	614	9 500
5	<i>Hevea brasiliensis</i>	621	8 790
6	<i>Melia dubia</i>	577	12 420
7	<i>Mesopsis emmini</i>	357	8 410
8	<i>Tectona grandis</i>	632	13 600

( $\rho_{CH}$  es la densidad; Evt es el módulo dinámico. Contenido de humedad al  $12 \pm 1\%$ ).

múltiples rangos (Diferencia mínima significativa de Fisher) con el objetivo de diferenciar los niveles a través de grupos homogéneos (GH).

Las pruebas estadísticas se realizaron con un nivel de confianza del 95%. Por consiguiente, el criterio de demarcación se basó en la aceptación de diferencias significativas para valores de  $P(\alpha = 0,05) < 0,05$ . Finalmente, se contrastaron los resultados de esta investigación con los reportados en la bibliografía [21], [22] (Cuadro 1).

La cantidad de probetas observadas por cada especie fue de 32, un número adecuado para tener en cuenta en el análisis estadístico la teoría de las grandes muestras. No obstante, se determinó posteriormente el tamaño mínimo necesario de la muestra requerido para validar las pruebas estadísticas con un error de estimación aceptable de 0,05. Este parámetro se estableció utilizando la ecuación (3) [23].

$$N = \frac{4 \sigma^2}{e^2} \quad (3)$$

**Cuadro 2.** Contenido de humedad, densidad y módulo dinámico de *Abies sachalinensis* (todomatsu) y *Ostrya japonica* (asada).

**Table 2.** Moisture content, density, and dynamic modulus of *Abies sachalinensis* (todomatsu) and *Ostrya japonica* (asada).

	<i>Abies sachalinensis</i> (n = 32)			<i>Ostrya japonica</i> (n = 32)		
	CH (%)	$\rho_{CH}$ (kg m <sup>-3</sup> )	$E_{vt}$ (MN m <sup>-2</sup> )	CH (%)	$\rho_{CH}$ (kg m <sup>-3</sup> )	$E_{vt}$ (MN m <sup>-2</sup> )
$\mu$	11,9	366	15489	12,4	577	9517
$\sigma$	0,86	34	1261	0,28	43	1237
CV	7,2	9,4	8,1	2,3	7,5	13

CH = Contenido de humedad;  $\rho_{CH}$  = Densidad;  $E_{vt}$  = Módulo dinámico;  $\mu$  = Media;  $\sigma$  = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porciento; n = Cantidad de probetas observadas.

**Cuadro 3.** Resultados del análisis estadístico.

**Table 3.** Results of the statistical analysis.

	S	A	Ver-var	Anova	K-W	GH	N
$\rho_{CH}$ (n = 32)							
<i>Abies sachalinensis</i>	3,033	3,506	0,119		<0.001*	X	14
<i>Ostrya japonica</i>	-1,218	-0,869				X	9
$E_{vt}$ (n = 32)							
<i>Abies sachalinensis</i>	-1,704	1,307	0,752	<0,001*		X	11
<i>Ostrya japonica</i>	0,467	-0,021				X	27

S = Sesgo; A = Apuntamiento; Ver-var = Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; K-W = Prueba de Kruskal-Wallis; GH = Grupos homogéneos;  $\rho_{CH}$  = Densidad (kg m<sup>-3</sup>);  $E_{vt}$  = Módulo dinámico (MN m<sup>-2</sup>); n = Cantidad de probetas observadas; N = Tamaño mínimo necesario de la muestra para un error estadístico aceptable de 0,05; \* = Existe una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de confianza de 95%.

Donde: *n* es el tamaño mínimo necesario de la muestra;  $\sigma$  es la desviación estándar y *e* es el error de estimación aceptable (0,05).

## Resultados

### Densidades

La densidad de *O. japonica* es un 58% mayor a la de *A. sachalinensis* (Cuadro 2). Sus coeficientes de variación se asemejan a los documentados para maderas en la literatura [24]. El coeficiente correspondiente a *O. japonica* es igualmente similar respecto al de *A. sachalinensis*.

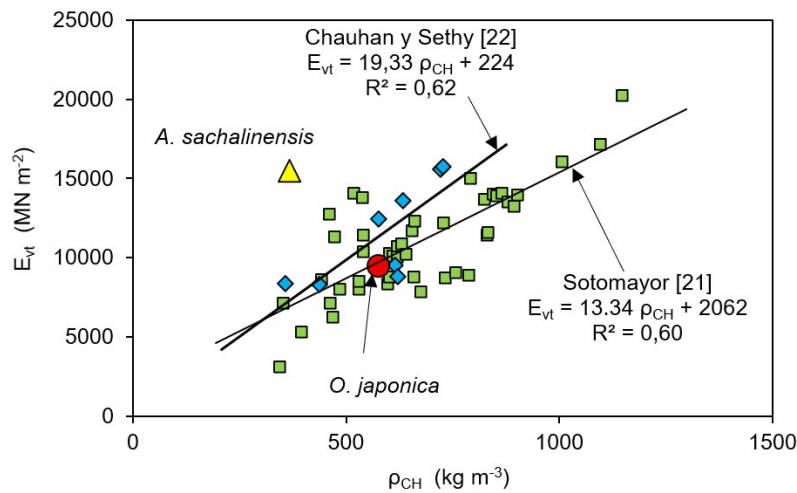
Las evaluaciones de normalidad de las muestras de densidad (Cuadro 3) señalan que los valores de sesgo y apuntamiento exceden el rango establecido por el criterio de demarcación [ $-2 < S, A < +2$ ] lo que sugiere que no se distribuyen normalmente, por lo que se recurrió a pruebas no paramétricas (Kruskal-Wallis) para evaluar las diferencias entre especies. Por lo tanto, en lo que respecta a las densidades, la prueba de Kruskal-Wallis

muestra una discrepancia estadísticamente relevante ( $P(\alpha = 0,05) < 0,05$ ) entre las densidades de *O. japonica* y *A. sachalinensis*. Este resultado se corrobora con las pruebas de múltiples rangos, las cuales señalan que ambas muestras forman parte de grupos homogéneos distintos. En el Cuadro 3 se muestran los tamaños mínimos necesarios de muestras para los dos niveles estudiados, que son menos de 32 probetas analizadas en cada especie.

La densidad media de *O. japonica* (366 kg m<sup>-3</sup>) se sitúa cerca del límite inferior de las densidades de maderas de la bibliografía y se distancia de la tendencia estadística observada entre densidad y módulo dinámico de los datos de maderas endémicas de México [21]  $R^2 = 0,60$  y de maderas endémicas de la India [22]  $R^2 = 0,62$  (Cuadro 1, Figura 2).

En contraposición, la densidad media de *O. japonica* se ubica en las proximidades de dichas tendencias. La madera de *A. sachalinensis* la sitúa como una especie excepcional en términos de su relación módulo dinámico/densidad. Es importante destacar que estos resultados





**Figura 2.** Dispersión de los módulos dinámicos ( $E_{vt}$ ) de maderas endémicas de México e India en función de las densidades ( $\rho_{CH}$ ) y posicionamiento de los módulos dinámicos de *A. sachalinensis* y *O. japonica* ([21] [22]).

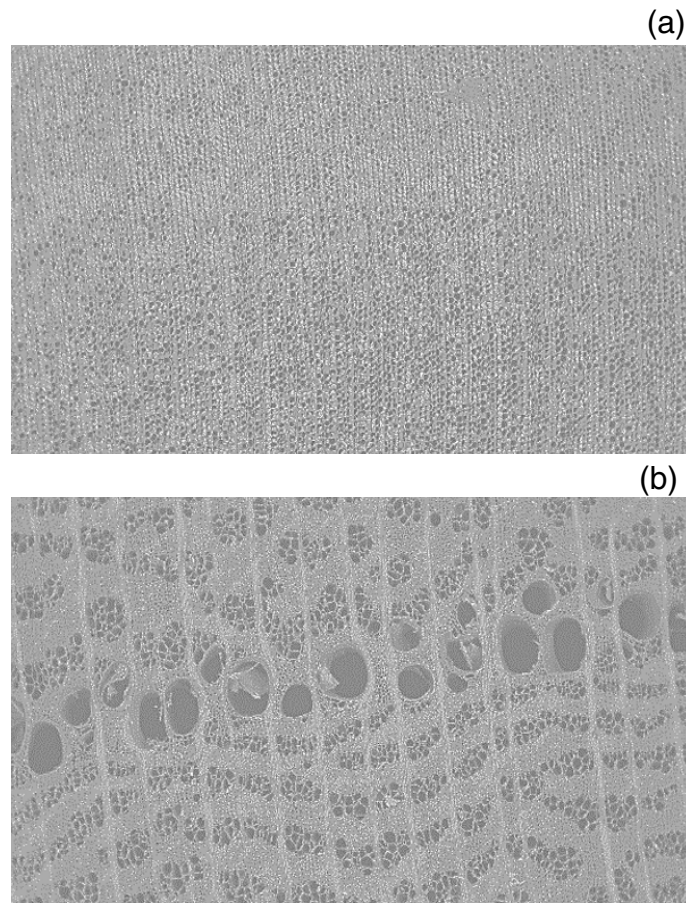
**Figure 2.** Distribution of dynamic moduli ( $E_{vt}$ ) of endemic woods from Mexico and India as a function of densities ( $\rho_{CH}$ ), and positioning of the dynamic moduli of *A. sachalinensis* and *O. japonica* ([21] [22]).

se basan en una muestra de madera de *O. japonica* que se analizó específicamente en esta investigación como un estudio de caso. Sin embargo, estos resultados indican que las maderas de *A. sachalinensis* y *O. japonica* pueden ser contrastadas entre sí a partir de muestras con estructuras anatómicas diferentes (Figura 3). De hecho, *A. sachalinensis* presenta una estructura homogénea en el plano transversal de sus lúmenes celulares. Por el contrario, *O. japonica* exhibe una anatomía discontinua con componentes vasculares y la presencia de células de parénquima.

**Módulos dinámicos**

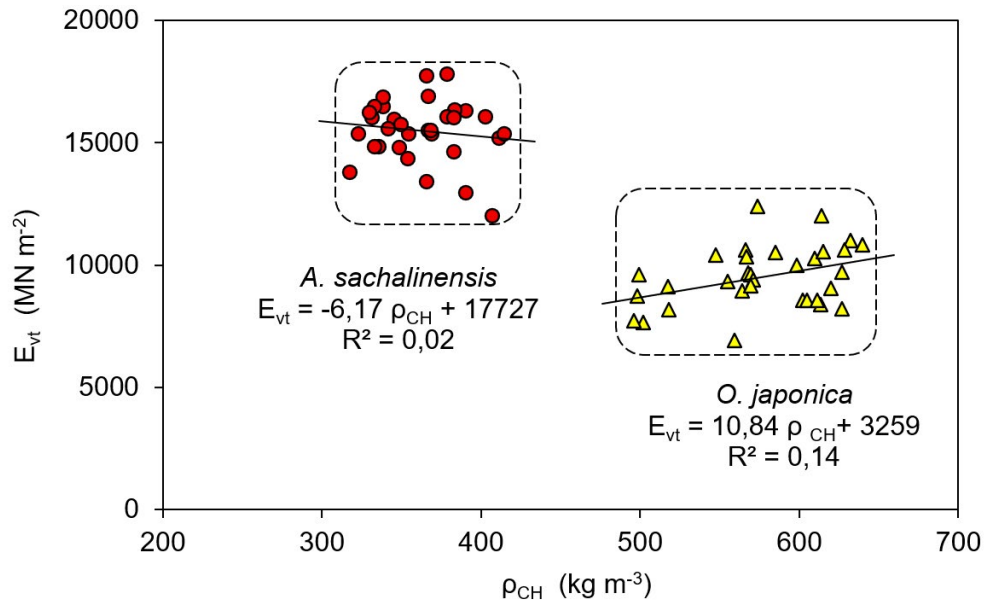
El módulo dinámico de *A. sachalinensis* es 39 % mayor respecto al de *O. japonica* (Cuadro 2) como consecuencia de la diferencia en densidades. El coeficiente de variación de *O. japonica* es mayor en 5 % comparativamente con el de *A. sachalinensis*.

Los resultados de los módulos dinámicos se explican como provienen de muestras uniformemente distribuidas (Cuadro 3) y no indican diferencias en sus desviaciones estándares. Estos hallazgos implican que el modelo teórico de la distribución normal es adecuado para analizar los resultados de esta variable en sus dos niveles. En el mismo contexto, el análisis de varianza de los dos niveles, es decir de la madera de *A. sachalinensis* versus *O. japonica*, indica una diferencia significativa y cada nivel se agrupa de manera independiente. Por su parte, el número de probetas ensayadas fue mayor al tamaño de la muestra requerida para el análisis estadístico (Cuadro 3).



**Figura 3.** Comparativo de las estructuras anatómicas de a) *Abies sachalinensis*; y b) *Ostrya japonica*. Amplificación 40 veces.

**Figure 3.** Comparison of the anatomical structures of a) *Abies sachalinensis*; and b) *Ostrya japonica*. 40x magnification.



**Figura 4.** Dispersión de los módulos dinámicos ( $E_{vt}$ ) en función de las densidades ( $\rho_{CH}$ ). Por razones de escala no se observan todos datos correspondientes a las 32 muestras ensayadas por especie.

**Figure 4.** Distribution of dynamic moduli ( $E_{vt}$ ) as a function of densities ( $\rho_{CH}$ ). Due to scale constraints, not all data corresponding to the 32 samples tested per species are visible.

El valor medio del módulo dinámico de *O. japonica* sigue la tendencia de la correlación del módulo dinámico en función de la densidad de los datos reportados en [21] y [22] (Figura 2). Sin embargo, las correlaciones lineales que explican la variación de los módulos dinámicos de *A. sachalinensis* y *O. japonica* en función de sus densidades son muy débiles (Figura 4).

Para poder utilizar la información aquí recabada en el cálculo y diseño estructural, es necesario realizar ajustes relacionados con la influencia de factores que pueden modificar los valores tabulados. Por ejemplo: el contenido de humedad, la presencia de nudos y la manifestación de biodeterioro en una pieza de madera. Este procedimiento facilita proyectar las dimensiones correctas de la estructura, así como la selección conveniente de la especie y la calidad de la madera a utilizar, optimizando así el tiempo y costo del proceso constructivo.

## Conclusiones

Los resultados mostraron diferencias significativas en densidad y módulo dinámico entre *A. sachalinensis* y *O. japonica*. La madera de *O. japonica* presentó una densidad promedio 58% superior a la de *A. sachalinensis*, superando los valores usualmente

reportados en la literatura. Esta diferencia se relaciona con su estructura anatómica: *A. sachalinensis* posee lúmenes uniformes en sección transversal, mientras que *O. japonica* exhibe una disposición irregular con elementos vasculares y parénquima, lo que incrementa su densidad y modifica su comportamiento físico.

El módulo dinámico de *A. sachalinensis* fue 39% mayor al de *O. japonica*. Ambas especies mostraron distribuciones normales para esta propiedad, permitiendo aplicar análisis estadísticos que confirmaron diferencias significativas. Además, se validó el método de vibraciones transversales como herramienta no destructiva y confiable para estimar el módulo dinámico en maderas poco estudiadas. Estos hallazgos son valiosos para la caracterización físico-mecánica comparativa y sugieren ajustes metodológicos para su aplicación en piezas estructurales reales, considerando factores como humedad, defectos naturales y biodeterioro.

## Agradecimientos

La investigación fue financiada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México y por la Universidad Prefectoral de Akita, Japón.

## Referencias

- [1] A. Cointe, et al., "Diagnosis and monitoring of timber buildings of cultural heritage," *Structural Safety*, vol. 29, no. 4, Oct., pp. 337-348, 2007.
- [2] P. Dietsch y J. Köhler, *Assessment of Timber Structures*, Maastricht: Shaker Verlag, 2010.
- [3] J. Köhler, et al. "Probabilistic modeling of timber structures," *Structural Safety*, vol. 29, no. 4, pp. 255-267, 2007.
- [4] J. Saporiti-Machado y P. Palma, "Non-destructive evaluation of the bending behavior of in-service pine timber structural elements," *Materials and Structures*, vol. 44, no. 5, Nov., pp. 901-910, 2011.
- [5] R. F. Pellerin y R. J. Ross, *Nondestructive Evaluation of Wood*, Ruston: Forest Products Society, 2002. h
- [6] ASTM (American Society of Testing and Materials International), *Standard Test Methods for Nondestructive Evaluation of Wood-Based Flexural Members Using Transverse Vibration*, ASTM D6874-12, 2012.
- [7] C. A. Senalik, G. Schueneman y R. J. Ross, "Ultrasonic-based nondestructive evaluation methods for wood: a primer and historical review", USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 2014.
- [8] U. Dackermann, et al., "In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements," *Materials and Structures*, vol. 47, no. 5, Jul., pp. 787-803, 2014.
- [9] H. Yoshihara, "Examination of the specimen configuration and analysis method in the flexural and longitudinal vibration tests of solid wood and wood-based materials," *Forest Products Journal*, vol. 62, no. 3, May., pp. 191-200, 2012.
- [10] L. Acuña, et al., "Modulus of elasticity prediction through transversal vibration in cantilever beams and ultrasound technique of different wood species," *Construction and Building Materials*, vol. 371, Mar., pp. 1-10, 2023.
- [11] A. Q. Nyrud, et al., "Proceedings from the 13th World Conference on Timber Engineering", 13th World Conference on Timber Engineering, 2023, pp. 4730.
- [12] A. Aloisio, et al., "Vibration issues in timber structures: A state-of-the-art review," *Journal of Building Engineering*, vol. 76, Oct., pp.1-27, 2023
- [13] M. G. C. Uzcategui, et al., "Nondestructive Evaluation of 2 by 10 Southern Pine Lumber," *Forest Products Journal*, vol. 73, no. 3, Jul., pp. 186-193, 2023.
- [14] Z. Wang, et al., "Research progress on dynamic testing methods of wood shear modulus: A review," *BioResources*, vol. 18, no. 1, pp. 2262-2270, 2023. [15] M. Teranishi, A. Koizumi y T. Hirai, "Evaluation of quality indexes of bending performance and hardness for hardwoods," *Journal of Wood Science*, vol. 54, Oct., pp. 423-428, 2008.
- [16] ISO (International Organization for Standardization), *Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical*, ISO 13061-1:2014, 2014.
- [17] ISO (International Organization for Standardization), *Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests*, ISO 13061-2:2014, 2014.
- [18] J. R. Sotomayor Castellanos y I. Macedo Alquicira, "Vibraciones transversales para determinar el módulo dinámico e índice material en multimaterial de maderamalla-adhesivo en *Fagus crenata*," *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, vol. 11, no. 63, Agost., pp. 39-62, 2023.
- [19] W. Jr. Weaver, et al., *Vibration problems in engineering*. Hoboken: Wiley, 1991.
- [20] Y. Faydi, L. et al., "Prediction of Oak Wood Mechanical Properties Based on the Statistical Exploitation of Vibrational Response," *BioResources*, vol. 12, no. 3, pp. 5913-5927, 2017.
- [21] J. R. Sotomayor Castellanos, "Módulos de elasticidad e índices de calidad de maderas mexicanas. Síntesis de datos del Laboratorio de Mecánica de la Madera," *Investigación e Ingeniería de la Madera*, vol. 15, no. 1, pp. 3-64, 2019. ISSN 2395-9320.
- [22] S. Chauhan y A. Sethy, "Differences in Dynamic Modulus of Elasticity Determined by Three Vibration Methods and their Relationship with Static Modulus of Elasticity," *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 18, no. 2, Apr., pp. 373-382, 2016.
- [23] H. Gutiérrez Pulido y R. De La Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*, México: Mc Graw Hill, 2012.
- [24] Forest Products Laboratory, *Wood handbook*. Madison: Forest Products Laboratory, 2021.