

Caracterización no destructiva de madera estructural de *Pinus sylvestris* mediante técnicas ultrasónicas *

Non-destructive characterization of *Pinus sylvestris* structural timber using ultrasonic techniques

Gloria Llorente-Sánchez¹ <https://orcid.org/0009-0002-2302-469X> *

Roberto Diego Martínez-López¹ <https://orcid.org/0000-0002-0567-1781>

Luis-Alfonso Basterra¹ <https://orcid.org/0000-0002-5273-9726>

¹Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid (ETSAVA).

Departamento de Construcciones Arquitectónicas, IT y MMC y TE. GIR Estructuras y Tecnología de la Madera.

* Este artículo es una versión ampliada y revisada por pares del trabajo presentado previamente en el III Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción (CIMAD), celebrado en Madrid, España en junio 2024. Editora asociada: Dra. Laura Moya

*Autor de correspondencia: Gloria Llorente-Sánchez: gloria_llorentesanchez@outlook.es

Resumen:

La caracterización de madera estructural mediante la medición de la velocidad de ultrasonidos ha adquirido una importancia creciente. Sin embargo, existen dudas sobre la precisión real de estos equipos, su idoneidad para caracterizar madera en condiciones de obra y su aplicabilidad frente a los métodos estándar, así como la necesidad de generar nuevas ecuaciones de correlación que permitan mejorar su uso en la práctica y en la investigación. Este estudio tiene como objetivo evaluar la efectividad y precisión del equipo Sylvatest 4.0 en la determinación de las propiedades mecánicas de la madera estructural de *Pinus sylvestris* (pino silvestre), comparando sus resultados con los obtenidos mediante ensayos normalizados en máquina y con el equipo Fakopp MST. Se realizó un análisis en 13 vigas previamente clasificadas según la norma europea, centrado en la correlación entre la velocidad de propagación de la onda ultrasónica y el módulo de elasticidad real u obtenido en máquina. El estudio también examinó el impacto de la aplicación de gel de acoplamiento en la precisión de las mediciones, así como la efectividad de los métodos de medición indirecta, comúnmente utilizados en madera puesta en obra. El análisis estadístico demostró que las mediciones indirectas utilizando el Fakopp MST proporcionan la aproximación más cercana a los valores del módulo de elasticidad de referencia obtenidos en máquina, al igual que las mediciones indirectas con el Sylvatest 4.0 sin gel de acoplamiento. En conjunto, los resultados indican que el Fakopp MST, pese a ser una tecnología anterior, ofrece la estimación más fiable y un uso más seguro en obra, frente al Sylvatest 4.0, cuyo sistema de acoplamiento presenta mayor holgura y por tanto riesgo de caída.

Palabras clave: Ensayos no destructivos, módulo de elasticidad, *Pinus sylvestris*, equipos ultrasónicos, Sylvatest 4.0, ultrasonido en madera estructural.

Abstract:

The characterisation of structural timber through ultrasound velocity measurement has gained increasing importance. However, uncertainties remain regarding the actual accuracy of these devices, their suitability for assessing timber under in-service conditions, and their applicability compared with standard methods, as well as the need to generate new correlation equations to improve their use in practice and research. This study aims to evaluate the effectiveness and accuracy of the Sylvatest 4.0 device in determining the mechanical properties of *Pinus sylvestris* (scots pine) structural timber, comparing its results with those

obtained from standardised machine tests and the Fakopp MST device. An exhaustive analysis was conducted on 13 beams, previously classified according to the European standard, focusing on the correlation between ultrasonic wave propagation speed and the real or machine-obtained modulus of elasticity. The study also examined the impact of coupling gel on measurement accuracy, as well as the effectiveness of indirect measurement methods commonly used in timber in situ. Statistical analysis revealed that indirect measurements using the Fakopp MST provide the closest approximation to reference MOE values obtained from machine tests, as well as the indirect measurements with the Sylvatest 4.0 without coupling gel. Overall, the findings indicate that the Fakopp MST, despite being an earlier technology, provides the most reliable estimation and a safer use on-site, compared to Sylvatest 4.0, whose coupling system shows greater clearance and therefore a higher risk of slipping or falling.

Keywords: Non-destructive testing, modulus of elasticity, *Pinus sylvestris*, ultrasonic device, Sylvatest 4.0, ultrasonic testing.

Received: 04.09.2024

Accepted: 21.11.2025

Introducción

La madera ha acompañado al ser humano a lo largo de su evolución, y ha sido utilizada en numerosas estructuras que aún perduran, gracias a sus buenas prestaciones constructivas y a su valor estético. En la actualidad, la sociedad apuesta por la rehabilitación del patrimonio edificado, gran parte del cual se sustenta en estructuras de madera, cuya caracterización técnica resulta, por tanto, fundamental. Con este objetivo, han surgido y evolucionado los Ensayos No Destructivos (END), que emplean diversas técnicas capaces de estimar propiedades del material sin alterarlo o con una mínima intervención. Entre ellas, las técnicas acústicas y ultrasónicas son de las más aplicadas, utilizando equipos como el CBS-Sylvatest y el Fakopp MST.

La literatura especializada documenta ampliamente la aplicación de estos equipos en numerosos estudios, realizados en diferentes condiciones y con diferentes especies. Dichos trabajos han permitido analizar de forma exhaustiva sus resultados y generar una gran base de conocimiento, (Bucur *et al.* 1994). De su revisión se pueden obtener cuatro conclusiones principales. En primer lugar, es recomendable que los END

se complementen con una clasificación visual. En segundo lugar, una velocidad de propagación superior a 5000 m/s suele ser un indicador general de buena calidad de la madera, mientras que, con velocidades inferiores, resulta aconsejable analizar también la densidad como variable complementaria. En tercer lugar, se deberían estandarizar las condiciones de ensayo, por ejemplo, realizando las mediciones con un contenido de humedad (CH) del 12 %; en caso contrario, es necesario aplicar correcciones. Por último, en la práctica, el aumento de la distancia entre palpadores atenúa la onda emitida, lo cual debe ser considerado, pudiendo requerirse la aplicación de factores o fórmulas de corrección (Arriaga *et al.* 2017, Divos y Tanaka 1997, Llana *et al.* 2016, Llana *et al.* 2020, Montero *et al.* 2015, Osuna-Sequera *et al.* 2021). En este contexto, y ante la continua aparición de dispositivos tecnológicamente avanzados, pero de funcionamiento interno opaco, resulta imprescindible validar su precisión real y seguridad operativa frente a métodos ya consolidados, especialmente para su aplicación en diagnósticos *in situ*.

Esta investigación tiene como objetivo desarrollar un modelo de correlación entre los valores obtenidos mediante ensayos normalizados en máquina (CEN 2012) y los resultados proporcionados por los equipos Sylvatest 4.0 y Fakopp MST, evaluando la precisión del algoritmo interno del primero, cuyo funcionamiento es desconocido para el operador. Además, se analiza si la aplicación de gel de acoplamiento mejora significativamente los valores los valores obtenidos y, finalmente, se determina qué método de medición proporciona resultados más cercanos a los obtenidos con una máquina universal, con especial atención a las mediciones indirectas, comúnmente aplicadas en obra con estos equipos.

Material y método

Equipos y material de laboratorio

El estudio empleó el dispositivo de transmisión ultrasónica Sylvatest 4.0 (CBS-CBT), un sistema de evaluación no destructiva de última generación diseñado para la clasificación mecánica de madera estructural. A diferencia de sus predecesores cableados, que han sido desarrollados desde la década de 1970, este modelo, introducido en 1990 y con varias versiones, opera mediante transductores inalámbricos que se comunican vía Bluetooth con la interfaz de control, el software *Sylvius*, disponible para dispositivos móviles como aplicación.

Su principio de funcionamiento se basa en la medición del tiempo de vuelo (ToF) de ondas longitudinales ultrasónicas. El software procesa estos datos junto con parámetros de entrada definidos por el usuario (especie maderable, contenido de humedad y distancia entre transductores) para estimar las propiedades mecánicas y físicas del material. El procesamiento interno de datos opera bajo un sistema de “caja negra”: los algoritmos de correlación y los factores de corrección empleados por el software son propietarios y no accesibles para el usuario, basando la estimación de densidad, por ejemplo, en valores teóricos de la especie y no en mediciones *in situ*. Por su parte, el Fakopp MicroSecond Timer (MST) genera una onda inducida mediante impacto con un martillo. Se desarrolló cuatro años después que el Sylvatest y cuenta con dos versiones, siendo la primera ya descatalogada. Pertenece a las técnicas acústicas y utiliza un método de tiempo de vuelo (ToF), en el que se mide el tiempo que tarda la onda en propagarse entre dos puntos específicos de la madera. Aunque no dispone de las funciones avanzadas de almacenamiento de datos como el Sylvatest 4.0, el Fakopp MST resulta muy eficiente para realizar mediciones rápidas y precisas en estructuras en servicio.

Además, se emplearon como instrumentos auxiliares un taladro, xilohigrómetro, martillo, entre otros. También se utilizó un gel para ultrasonidos transparente, de la marca Konix, como material de acoplamiento, aplicado únicamente en algunas de las mediciones realizadas con el Sylvatest. El gel empleado es específico para equipos de ultrasonidos en el ámbito médico.

Material de ensayo

El material de ensayo (Figura 1) es un lote de 13 vigas de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) de tamaño estructural (90 mm x 140 mm x 4840 mm), suministradas por Maderas Barrio al GIR Estructuras y Tecnología de la Madera de la UVa. Fueron previamente clasificadas obteniendo su Módulo de Elasticidad global (MOEGTO) en una máquina universal de ensayos, siguiendo la norma (CEN 2012). Las distancias entre sensores están en la Tabla 1 y son las mismas en las mediciones con y sin gel de acoplamiento.



Figura 1: Vigas de ensayo (13 unidades).

Tras una inspección visual, que incluyó la revisión y el registro de las singularidades del material, se realizaron marcas en los puntos de medición, evitando aquellos que presentaban singularidades de la madera y se anotaron con precisión las distancias entre ellos.

Tabla 1: Distancias entre sensores en cada una de las vigas para las mediciones directas e indirectas

Viga	Distancias entre palpadores (cm)	
	Medición directa	Medición indirecta
V01	484	458
V02	484	478
V03	456	434
V04	484	458
V05	484	458
V06	484	458
V07	484	473
V08	484	458
V09	484	458
V10	484	458
V11	484	458
V12	484	458
V13	509	480

Se midió el contenido de humedad (CH), verificándose que todas las vigas presentaban un CH del 10 %.

Se estableció la siguiente nomenclatura para cada método de ensayo:

- Una abreviatura, según si el valor corresponde al Módulo de Elasticidad (MOE), a la velocidad bruta (Vb) o a la velocidad corregida (Vc).
- La letra S o F, para los ensayos con Sylvatest 4.0 o Fakopp MST, respectivamente.
- Las letras D o I, según si la medición fue directa o indirecta.
- Sólo en los ensayos con Sylvatest 4.0, se utiliza S o G para indicar si la medición se realizó en seco o con aplicación de gel de acoplamiento.

La Figura 2 representa gráficamente estas nomenclaturas:

	MOE	VELOCIDAD	EJECUCIÓN
DIRECTAS	MOESDS	VcSDS	
	MOESDG	VcSDG	
	MOESIS	VcSIS	
	MOESIG	VcSIG	
INDIRECTAS	MOEFD	VbFD	
	MOEFI	VbFI	
	-	V90°	
	-	V45°	

Figura 2: Nomenclatura asignada a las distintas técnicas y modos de ensayo.

Ensayos SYLVATEST 4.0

Con este equipo se realizaron cuatro tipos de ensayo: directos e indirectos en seco, y directos e indirectos con aplicación de gel de acoplamiento (Figura 3);



Figura 3: Imágenes de los 4 tipos de mediciones con el equipo Sylvatest 4.0.

Las mediciones requirieron que los orificios hechos con el taladro fueran perpendiculares a ambas testas. En las mediciones indirectas, en cambio, los orificios se realizaron en la misma cara de la pieza, con una inclinación de 30° respecto a su superficie. Los palpadores se introdujeron en estos orificios hasta lograr una sujeción firme, sin holgura. En la aplicación Sylvius, instalada en un teléfono móvil, se configuraron los parámetros requeridos (especie, CH, tipo de medición y distancia entre palpadores) y se inició el proceso de medición. El equipo realizó 10 disparos de ultrasonidos y la aplicación procesó los datos, los almacenó internamente y mostró en pantalla los siguientes resultados: velocidad bruta - V_b (m/s); velocidad corregida - V_c (m/s); MOE (MPa); Módulo de Rotura (MOR) en (MPa); y Clase resistente - C.

Una vez finalizadas las mediciones en seco, tanto directas como indirectas, se repitieron los ensayos aplicando gel de acoplamiento. El procedimiento fue el mismo, añadiendo previamente una pequeña cantidad de gel en el orificio antes de insertar los palpadores. Las mediciones se realizaron en un tiempo inferior a 10 segundos desde la aplicación de gel, para evitar posibles alteraciones en el contenido de humedad local.

Ensayos Fakopp Microsecond Timer (MST)

Las mediciones realizadas con el Fakopp MST fueron: directas, indirectas, transversales a 90° y transversales a 45° respecto del eje longitudinal de las piezas (Figura 4).



Figura 4: Mediciones longitudinales directas (a) y (b) e indirectas (c) y (d) con el Fakopp MST.

Los sensores se fijaron en los puntos marcados utilizando un martillo de goma: en dirección perpendicular a las testas para las mediciones directas y, con una inclinación no mayor de 45° sobre una misma cara (Figura 4) para las mediciones indirectas. Para las mediciones transversales, los palpadores se insertaron en dos caras opuestas, a 90° y a 45° . En estos casos, dada la escasa distancia entre sensores, cualquier pequeño defecto de la madera que interfiera con el recorrido de propagación de la onda puede generar variaciones importantes en los resultados. Por ello, las mediciones transversales se tomaron en 3 puntos distintos: en los extremos de las piezas y en el punto central (A, B y C; Figura 5).

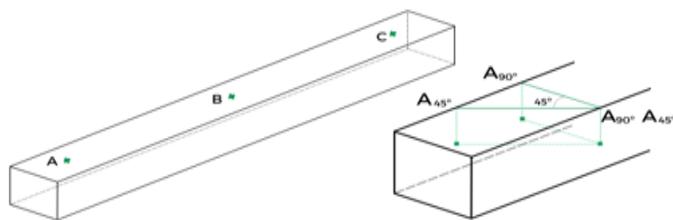


Figura 5: Posición de los puntos A, B y C y dirección de las medidas transversales (90° y 45°).

En cada caso, se aplicaron cuatro impactos sobre el sensor emisor con un martillo de acero, en paralelo a la dirección en la que se encontraba clavado, y se anotó el valor medio del tiempo (en μs). Con dichos valores y la distancia a la que se encontraban en cada caso los sensores, se calculó la velocidad de propagación de la onda de impacto, y a partir de ella, el MOE dinámico de acuerdo con la siguiente Ecuación 1:

$$MOE_{dyn} = \rho v^2 = \frac{m}{V} v^2 \quad (1)$$

Donde MOE_{dyn} , módulo de elasticidad dinámico, ρ (kg/m^3) = densidad, v (m/s) = velocidad de propagación, m (kg) = masa y V (m^3) = volumen.

Y, por último, los MOE estático y dinámico se relacionarían con la siguiente Ecuación 2:

$$MOE_{stat} = a + bMOE_{dyn} \quad (2)$$

Donde MOE_{stat} , módulo de elasticidad estático, en este caso conocido previamente, y a y b son coeficientes determinados estadísticamente, mediante modelos de regresión simple, en base a los resultados obtenidos.

Método estadístico

El análisis estadístico, realizado con el software Statgraphics 19 – X64, comenzó con una comprobación de normalidad mediante la prueba Shapiro-Wilk, buscando conocer la distribución de los datos. Una vez confirmada la normalidad, se realizó una verificación de múltiples rangos y una verificación de varianzas según la prueba de Levene, y por último se analizaron las diferencias estadísticas entre variables con un test ANOVA. Así, se comprobó si los datos pertenecían o no a grupos homogéneos. Por último, se desarrollaron modelos de regresión simple, relacionando los valores obtenidos mediante ensayo en máquina con los correspondientes a las distintas mediciones consideradas.

Resultados y discusión

Consideraciones experimentales

Durante el proceso experimental, se observaron que el equipo Sylvatest 4.0 presentaba cierta holgura en su ajuste al orificio de medición, lo que podría afectar la fiabilidad de las mediciones. Esta falta de estabilidad en el ajuste puede influir en la consistencia de los resultados obtenidos y debe ser considerada al interpretar las mediciones con este dispositivo en mediciones *in situ*.

Estadística descriptiva de las variables

Todos los valores de velocidades de propagación y MOE tienen valores-P mayores a 0,05 por lo que no se puede rechazar que sigan una distribución normal y son aptos para continuar con el análisis estadístico.

La Tabla 2 muestra un resumen estadístico de las variables (velocidades), incluyendo la media (M), la desviación estándar (DE), el coeficiente de variación (CV), el tiempo mínimo (MIN) y máximo (MAX), el rango total (Rg) y, por último, la afirmación o negación de la normalidad de los datos.

Tabla 2: Resultados de la estadística descriptiva de las variables (velocidades).

	M (m/s)	DE	CV (%)	MIN (m/s)	MAX (m/s)	Rg (m/s)	Normalidad
VcSDS	5038,27	279,79	5,55	4624,81	5491,47	866,66	Si
VcSDG	5062,18	267,20	5,27	4720,53	5507,47	787,93	Si
VcSIS	5362,28	323,40	6,03	4928,54	5854,75	926,22	Si
VcSIG	5532,93	292,92	5,29	5112,21	5999,42	887,21	Si
VbFD	4934,12	259,88	5,27	4623,07	5371,81	748,74	Si
VbFI	4821,74	265,49	5,51	4370,23	5252,29	882,06	Si
V90°	1362,46	84,18	6,18	1250,38	1561,48	311,18	Si
V45°	1840,77	85,62	4,65	1712,26	1989,32	277,29	Si

Los resultados muestran que las velocidades obtenidas en medición directa con el Sylvatest, en seco y con gel se asemejan entre sí, igual que las velocidades en mediciones indirectas. En cuanto al Fakopp MST, las velocidades también se asemejan independientemente del tipo de medición. Es destacable que Sylvatest determina, en todos los casos, valores medios de la velocidad ligeramente superiores a las del Fakopp MST. Todas ellas superan, o están muy cerca de hacerlo, la barrera de los 4900 m/s mencionada en la literatura como indicador de buena calidad.

La Tabla 3 muestra un resumen estadístico de todas las determinaciones del MOE: media (M), la desviación estándar (DE), el coeficiente de variación (CV), el mínimo (MIN) y el máximo (MAX), el rango total (Rg) y por último, la afirmación o negación de la normalidad de los datos. Las medias (M) de todos los MOE se aproximan en cierta medida al Módulo de Elasticidad global de canto (MOEGTO), siendo la más próxima la media del MOE obtenido con el equipo Sylvatest realizando medidas indirectas en seco (MOESIS).

Tabla 3: Resultados de la estadística descriptiva de las variables (MOE)
(en rojo los datos de referencia del MOE obtenido en máquina).

	M (MPa)	DE	CV (%)	MIN (MPa)	MAX (MPa)	Rg (MPa)	Normalidad
MOESDS	9445,77	1756,86	18,59	6849,66	12291,48	5441,83	Si
MOESDG	9595,94	1677,72	17,48	7450,70	12391,95	4941,24	Si
MOESIS	11480,31	2030,69	17,68	8756,78	14572,59	5815,81	Si
MOESIG	12551,99	1839,48	14,65	9910,10	15480,87	5570,87	Si
MOEFD	12776,27	2351,15	18,40	10486,65	16842,76	6356,11	Si
MOEFI	11895,95	2015,61	16,94	9503,46	16101,64	6598,19	Si
MOEGTO	11326,19	1790,25	15,80	8853,84	15270,1	6416,28	Si

Los MOE, comprendidos entre 9500 MPa y 12600 MPa, aproximadamente, atestiguan una buena calidad estructural de las piezas, como era esperable para esta especie tras una preselección inicial con criterios visuales y mecánicos exigentes. Todas cumplían los criterios de calidad MEG (AENOR 2011) y, por lo tanto, les correspondería, de acuerdo con la norma CEN 2012, una clase resistente C-22. Las velocidades de propagación obtenidas, en torno a 5000 m/s, son compatibles con dicha calidad.

Las mediciones directas con el equipo Sylvatest, tanto en seco como con gel (MOESDS y MOESDG), arrojan los valores más alejados del MOEGTO, lo que indica que este equipo, con este tipo de medición, infravalora las características de la madera ensayada.

Comparativas entre variables

En cuanto a la dispersión de los datos (Figura 6), los referentes a las mediciones directas del Sylvatest son los más agrupados y, por el contrario, los que muestran un mayor rango son las medidas directas con el Fakopp MST. El resto de los MOE mantienen aproximadamente una estructura similar. También cabe mencionar que tanto las mediciones indirectas del MST como las de máquina comparten la existencia de outliers (puntos externos que representan datos muy alejados del resto de los datos del grupo).

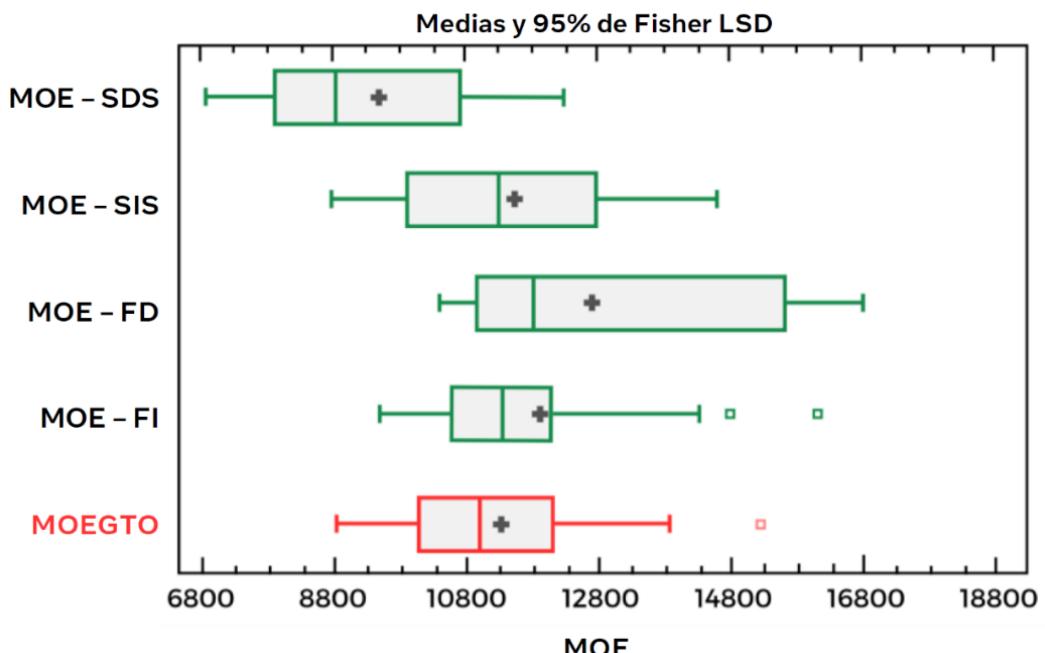


Figura 6: Comparación de los valores del MOE (MPa) obtenidos con cada tipo de medición (en verde) y del valor de referencia en máquina MOEGTO (MPa) (en rojo).

En la Figura 6 se aprecia que las mediciones indirectas sin gel del Sylvatest ofrecen el MOE (MOESIS) más semejante al MOEGTO. Además, como se mencionó anteriormente, las medidas directas del Sylvatest en seco (MOESDS) subestiman los valores estimados por máquina (MOEGTO).

En cuanto a las comparaciones entre resultados, se dedujo claramente que la aplicación de gel en las mediciones directas e indirectas del Sylvatest 4.0, no arrojaron diferencias estadísticamente significativas (Figura 7 y Figura 8). Esta observación concuerda con estudios previos realizados por Llana *et al.* (2016) y Osuna-Sequera *et al.* (2021), quienes también indicaron que el empleo del gel no presenta ventajas sustanciales, e incluso podría introducir una complejidad operativa innecesaria. Por consiguiente, en lo sucesivo se prescinde de los ensayos con gel dado que su aplicación no presenta diferencias estadísticamente significativas y los ensayos presentan mayor complejidad.

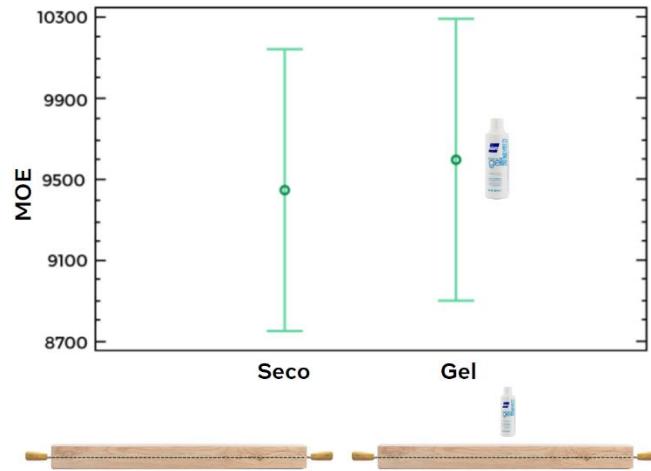


Figura 7: Comparación de las medias del MOE (MPa) obtenidas con mediciones directas en seco (MOESDS) y con gel (MOESDG), mostrando el efecto del gel de acoplamiento (Sylvatest).

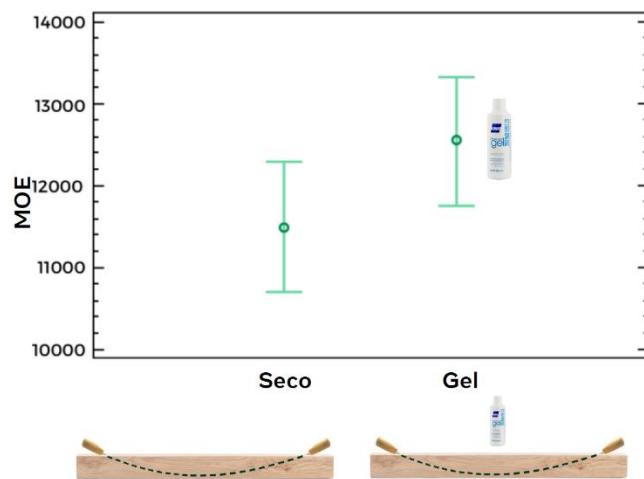


Figura 8: Comparación de las medias del MOE (MPa) obtenidas con mediciones indirectas en seco (MOESIS) y con gel (MOESIG), mostrando el efecto del gel de acoplamiento (Sylvatest).

La Figura 9 muestra que las mediciones directas e indirectas tomadas con el Sylvatest muestran diferencias estadísticas significativas. Sin embargo, la Figura 10 muestra que las mediciones directas e indirectas tomadas con el Fakopp MST no muestran diferencias estadísticamente significativas.

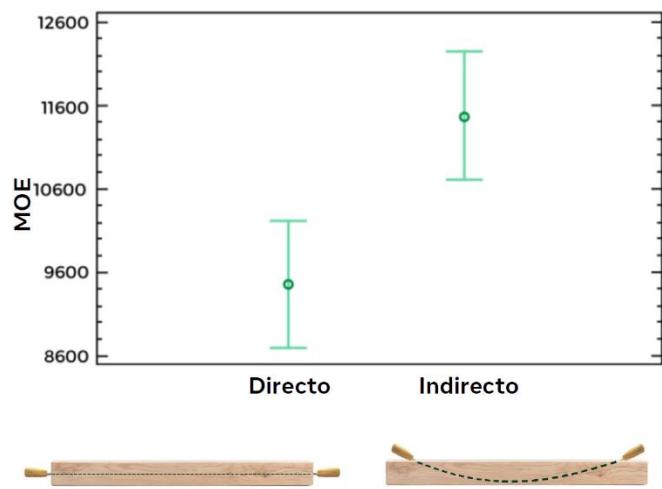


Figura 9: Comparación de las medias del MOE (MPa) obtenidas con mediciones directas (MOESDS) y mediciones indirectas (MOESIS) en seco, mostrando el efecto de la disposición de los palpadores (Sylvatest).

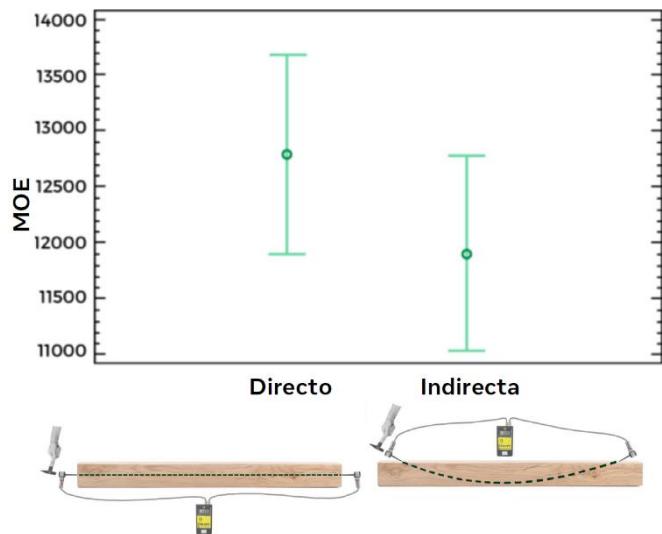


Figura 10: Comparación de las medias del MOE (MPa) obtenidas con mediciones directas (MOEFD) e indirectas (MOEFI), mostrando el efecto de la disposición de palpadores (Fakopp MST).

Por último, la Figura 11 y la Figura 12 muestran que las velocidades de propagación transversal, tanto a 90° como a 45°, muestran diferencias estadísticamente significativas (P -valor < 0,05) respecto a las velocidades tomadas como referencia (velocidad longitudinal de la medición indirecta con el MST).

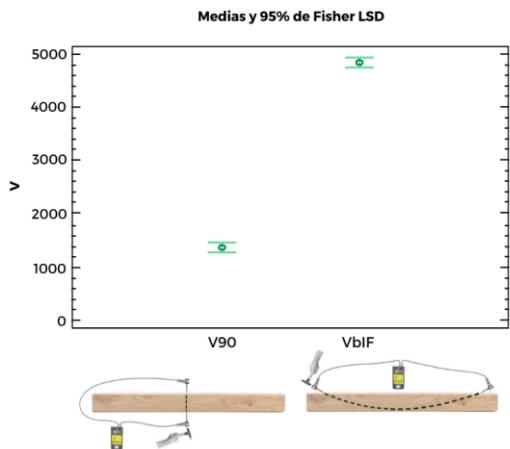


Figura 11: Comparación de la media de la Velocidad (m/s) de propagación transversal a 90° con la velocidad longitudinal de referencia obtenida mediante mediciones indirectas con el MST (VbFI).

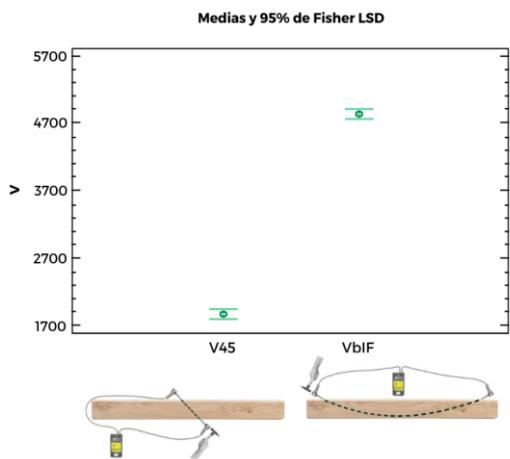


Figura 12: Comparación de la media de la Velocidad (m/s) de propagación transversal a 45° con la velocidad longitudinal de referencia obtenida mediante mediciones indirectas con el MST (VbFI).

Para el estudio de estas dos casuísticas y verificar si las mediciones transversales podrían ser aplicables en obra, se relacionó en primer lugar la velocidad transversal a 90° con la velocidad de la medición longitudinal indirecta del MST resultando el modelo de regresión simple mostrado en la Ecuación 3:

$$VbFI = 5233,95 - 0,302548V90 \quad (3)$$

Donde $VbFI$ (μ s) = velocidad bruta de la medición indirecta y $V90$ (μ s) = velocidad de la medición transversal a 90°, ambas con el MST.

El R^2 de 0,920144 % y el coeficiente de correlación de -0,0959241 indican una relación muy débil entre las variables. Además, el P-valor (0,7552) es mayor que 0,05, por lo que no hay una relación estadísticamente significativa entre VbFI y V90º con un nivel de confianza del 95,0 % o más. Por lo tanto, se descarta continuar con el modelo de correlación.

En segundo lugar, y siguiendo con el equipo MST, se relacionó la velocidad transversal a 45º con la velocidad longitudinal indirecta resultando en el modelo de regresión simple mostrado en la Ecuación 4:

$$VbFI = 6670,65 - 1,00442 \cdot V45 \quad (4)$$

Donde $VbFI$ (μs) = velocidad bruta de la medición indirecta y $V45$ (μs) = velocidad de la medición transversal a 45º, ambas con el MST.

Como en el caso anterior, un R^2 de 10,4932 % y el coeficiente de correlación de -0,323932 indican una relación relativamente débil entre las variables. Además, el P-valor (0,2803) es mayor que 0,05, por lo que no hay una relación estadísticamente significativa entre VbFI y V45º con un nivel de confianza del 95 % o más. Por lo tanto, igual que en el caso anterior, ha de descartarse el modelo de correlación.

La baja correlación observada en mediciones ultrasónicas transversales (90º y 45º respecto al eje longitudinal) es congruente con hallazgos anteriores documentados por Bucur (2006), Arriaga *et al.* (2014) y França *et al.* (2019). Estos estudios resaltan la influencia significativa que ejercen la anisotropía y la presencia de singularidades internas en las mediciones transversales, frente a la alta consistencia obtenida en las mediciones longitudinales. Ross (2015) también destaca que la dirección longitudinal es preferible para evaluaciones precisas debido a la estructura anatómica de la madera.

Una vez se han descartado los resultados de las mediciones con gel del Sylvatest 4.0 y las velocidades de las mediciones transversales a 90º y 45º con el MST, se analizaron conjuntamente todos los MOE restantes. El análisis de las medias de los MOE obtenidos mediante la prueba de múltiples rangos resulta en la existencia de dos grupos homogéneos apreciables tanto en la Tabla 4 como en la Figura 13. El primero está compuesto únicamente por las mediciones directas en seco con Sylvatest, y el otro con las demás variables.

Tabla 4: Grupos homogéneos entre los ensayos realizados, determinados mediante la prueba de múltiples rangos. (En rojo se destaca el grupo asociado al valor de referencia estimado por máquina.)

Ensayos	Grupos Homogéneos
MOESDS	A
MOESIS	B
MOEFD	B
MOEFI	B
MOEGTO	B

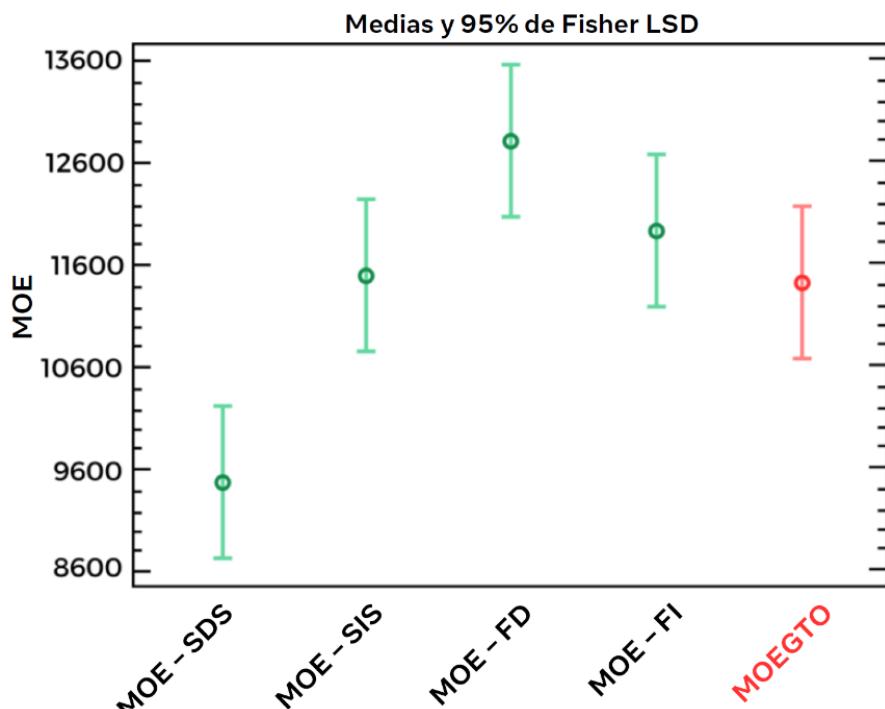


Figura 13: Comparación de las medias del MOE (MPa) obtenidas con los distintos tipos de mediciones y del valor de referencia en máquina (MOEGTO), resaltado en rojo.

Modelos de regresión simple

Por último, se obtuvieron varios modelos de correlación. En primer lugar, entre el MOEGTO y el MOE obtenido con las mediciones indirectas sin gel con el Sylvatest (MOESIS) (Ecuación 5):

$$MOEGTO = 3795,75 + 0,655943 \times MOESIS \quad (5)$$

Donde $MOEGTO$ = MOE obtenido en máquina y $MOESIS$ = MOE estimado por medición indirecta en seco con el Sylvatest.

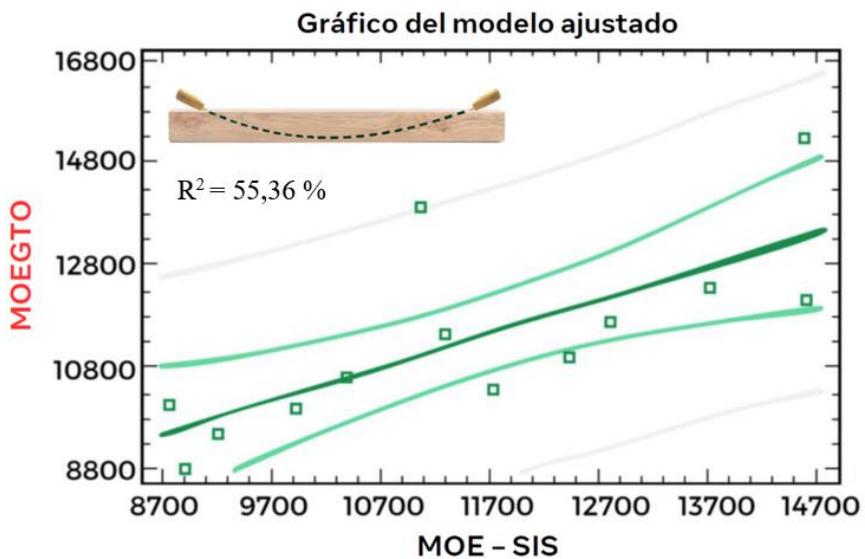


Figura 14: Gráfico del Modelo Ajustado entre MOEGTO (MPa) y MOESIS (MPa).

Este modelo (Figura 14), con un P-valor menor que 0,05 posee una relación estadísticamente significativa con un 95 % de confianza y con la mayoría de los valores cercanos a la recta de regresión. El estadístico R^2 muestra que el modelo explica el 55,36 % de la variabilidad observada en el MOEGTO y su coeficiente de correlación (0,744039) indica una relación relativamente elevada entre ambas variables. Estos resultados son comparables con los encontrados por Casado *et al.* (2012), quienes reportaron coeficientes de determinación comprendidos entre 0,54 y 0,57 al emplear diferentes equipos ultrasónicos sobre la misma especie. Esto también es consistente con las observaciones de Ross (2015), quien señala que los métodos ultrasónicos constituyen técnicas fiables y ampliamente validadas para la evaluación preliminar de propiedades mecánicas en madera destinada a usos estructurales.

También se realiza el modelo de correlación entre el MOEGTO y el MOE obtenido con las mediciones indirectas con el MST Fakopp (MOEFI) (Ecuación 6):

$$MOEGTO = 1819,88 + 0,799122 \times MOESIS \quad (6)$$

Donde $MOEGTO$ = MOE obtenido en máquina y $MOEFI$ = MOE establecido por medición indirecta con el Fakopp MST.

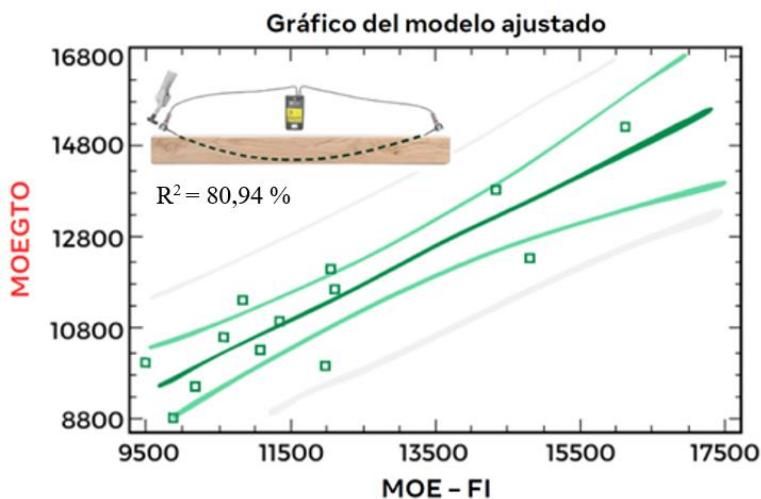


Figura 15: Gráfico del Modelo Ajustado entre MOEGTO (MPa) y MOEFI (MPa).

Este modelo (Figura 15), con un P-valor menor que 0,05 posee una relación estadísticamente significativa con un 95 % de confianza y con la mayoría de los valores cercanos a la recta de regresión. El estadístico R^2 muestra que el modelo explica el 80,94 % de la variabilidad observada en el MOEGTO y su coeficiente de correlación (0,899712) indica una relación bastante elevada entre ambas variables. Este nivel elevado de correlación coincide con los resultados reportados por Acuña *et al.* (2023) y Yang *et al.* (2008), quienes destacaron igualmente la alta precisión de los métodos acústicos inducidos por impacto en diferentes especies maderables. En este mismo sentido, Hassan *et al.* (2013) obtuvieron resultados comparables en ensayos ultrasónicos por impacto en madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), reforzando la validez de los resultados obtenidos en este estudio.

Conclusiones

Las técnicas ultrasónicas analizadas en este estudio han demostrado ser adecuadas para la determinación no destructiva del Módulo de Elasticidad (MOE) en madera estructural de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) En particular, las mediciones realizadas con el dispositivo Fakopp MST mostraron una correlación alta ($R^2=0,81$).

Por otro lado, el método Sylvatest 4.0 (MOESIS) también demostró una buena correlación, aunque ligeramente inferior, siendo particularmente apropiado para realizar evaluaciones rápidas o preliminares en condiciones de campo o en estructuras existentes.

Asimismo, no se detectaron ventajas estadísticamente significativas derivadas del uso de gel de acoplamiento en las mediciones ultrasónicas. Este resultado sugiere que podría prescindirse de su aplicación para simplificar procedimientos operativos sin comprometer la calidad de los datos obtenidos.

Finalmente, se confirmó que las mediciones ultrasónicas en dirección transversal proporcionan resultados menos fiables debido a la anisotropía inherente del material. Por tanto, se recomienda priorizar las mediciones longitudinales para asegurar una evaluación más robusta y precisa de las propiedades estructurales de la madera.

La validación experimental de las técnicas ultrasónicas longitudinales establece su idoneidad como herramienta no destructiva para la estimación del Módulo de Elasticidad (MOE) *in situ*, ofreciendo una base metodológica robusta para la diagnosis estructural de la madera cuando los ensayos destructivos no son factibles.

El análisis comparativo define, además, al dispositivo Fakopp MST como la metodología de propagación de ondas más consistente y eficiente operativamente, proporcionando un criterio técnico determinante para la selección de instrumentación en trabajos de campo, dada su mayor estabilidad y facilidad de aplicación. Finalmente, las ecuaciones de correlación por regresión generadas enriquecen el corpus científico actual, fundamentando la optimización de los protocolos de medición y sirviendo como punto de partida empírico para futuras líneas de investigación centradas en la caracterización de estructuras de madera en servicio.

Contribución de autorías

G. L-S.: Conceptualización, metodología, ensayos, redacción del borrador original. R. D. M-L.: Metodología, estadística de datos, análisis formal, revisión y edición del manuscrito. L. A. B.: Conceptualización, supervisión, obtención de financiación, revisión y edición del manuscrito.

Referencias:

- AENOR. 2011.** Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. Spanish Standard UNE 56.544. AENOR: Madrid, Spain. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0048310>
- Acuña, L.; Martínez, R.; Spavento, E.; Casado, M.; Álvarez-Martínez, J.; O’Ceallaigh, C.; Harte, A. M.; Balmori, J. A. 2023.** Modulus of elasticity prediction through transversal vibration in cantilever beams and ultrasound technique of different wood species. *Construction and Building Materials* 37: 35-40. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130750>
- Arriaga, F.; Monton, J.; Segues, E.; Íñiguez-Gonzalez, G. 2014.** Determination of the mechanical properties of radiata pine timber by means of longitudinal and transverse vibration methods. *Holzforschung* 68(3): 299-305. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0087>
- Arriaga, F.; Llana, D. F.; Esteban, M.; Íñiguez-González, G. 2017.** Influence of length and sensor positioning on acoustic time-of-flight (ToF) measurement in structural timber. *Holzforschung* 71(9): 713-723. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0214>
- Bucur, V.; Böhnke, I. 1994.** Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. *Ultrasonics* 32(5): 385-390. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(94\)90109-0](https://doi.org/10.1016/0041-624X(94)90109-0)
- Bucur, V. 2006.** Theory of and experimental methods for the acoustic characterization of wood. In: *Acoustics of Wood*. 2nd edition. Springer Series in Wood Science. Springer: Berlin, Germany, pp. 39-104. <https://doi.org/10.1007/3-540-30594-7>
- Casado, M.; Acuña, L.; Basterra, L.A.; Ramón-Cueto, G.; Vecilla, D. 2012.** Grading of structural timber of *Populus × euramericana* clone I-214. *Holzforschung* 66(5): 633-638. <https://doi.org/10.1515/hf-2011-0153>
- Divos, F.; Tanaka, T. 1997.** Lumber strength estimation by multiple regression. *Holzforschung* 51(5): 467-471. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1997.51.5.467>
- European Committee for Standardization. CEN. 2012.** Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. European Standard EN 408. CEN: Brussels, Belgium. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0049928>
- European Committee for Standardization. CEN. 2012.** Structural Timber. Strength classes. Assignment of visual grades and species. European Standard EN 1912. CEN: Brussels, Belgium. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0049485>
- França, F.J.N.; Seale, R.D.; Shmulsky, R.; França, T.S.F.A. 2019.** Assessing southern pine 2 x 4 and 2 x 6 lumber quality: longitudinal and transverse vibration. *Wood and Fiber Science* 51(1): 2-15. <https://doi.org/10.22382/wfs-2019-002>.
- Hassan, K.T.S.; Horáček, P.; Tippnera, J. 2013.** Evaluation of stiffness and strength of scots pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques. *BioResources* 8(2): 1634-1645. <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.1634-1645>
- Llana, D.F.; Íñiguez-Gonzalez, G.; Arriaga, F.; Wang, X. 2016.** Time-of-Flight adjustment procedure for acoustic measurements in structural timber. *BioResources* 11(2): 3303-3317. <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.3303-3317>
- Llana, D.F.; Íñiguez-González, G.; Díez, M.R.; Arriaga, F. 2020.** Nondestructive testing used on timber in Spain: A literature review. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 22(2): 133-156. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000201>

- Montero, M.J.; de La Mata, J.; Esteban, M.; Hermoso, E. 2015.** Influence of moisture content on the wave velocity to estimate the mechanical properties of large cross-section pieces for structural use of scots pine from Spain. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 17(2): 407-420. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000038>
- 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. e121256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121256>
- Ross, R.J. (Ed.). 2015.** *Nondestructive evaluation of wood*. 2nd edition. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory General Technical Report FPL-GTR-238. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-238>
- Yang, T.; Wang, S.; Lin, C.; Tsai, M. 2008.** Evaluation of the mechanical properties of Douglas-fir and Japanese cedar lumber and its structural glulam by nondestructive techniques. *Construction and Building Materials* 22: 487-493. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.11.012>