

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**“VALIDACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD
DINÁMICO DE LA MADERA DE *Pinus tecunumanii* PROCEDENTE
DE UNA PLANTACIÓN
DE VILLA RICA - PASCO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL**

JUAN LUIS CORREA GARCÍA

LIMA – PERÚ

2022

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24 – Reglamento de Propiedad Intelectual)**

Document Information

Analyzed document	Tesis-JuanCorrea 09-08-2022 (1).docx (D142803474)
Submitted	8/10/2022 6:13:00 PM
Submitted by	Manuel Chavesta Custodio
Submitter email	mchavesta@lamolina.edu.pe
Similarity	5%
Analysis address	mchavesta.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

- SA** **Universidad Nacional Agraria La Molina / Tesis LysPamela Rev. FINAL CORREGIDO 2022-investigación (4).pdf**
 Document Tesis LysPamela Rev. FINAL CORREGIDO 2022-investigación (4).pdf (D142088078)
 Submitted by: investigacionfcf@lamolina.edu.pe
 Receiver: investigacionfcf.unalm@analysis.arkund.com

- W** URL: https://idm.fing.edu.uy/sites/default/files/2021-03/Proceedings_CLEM2019_ISBN_parte_1.pdf
 Fetched: 5/3/2021 2:23:12 AM

- SA** **UCP_Ing.Civil_2021_Tesis_Bruce Lopez_V1.pdf**
 Document UCP_Ing.Civil_2021_Tesis_Bruce Lopez_V1.pdf (D97365331)

- W** URL: https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=562
 Fetched: 8/10/2022 6:15:00 PM

- W** URL: <http://oa.upm.es/21580/1/SILVITCALIDADMADERA.pdf>
 Fetched: 8/10/2022 6:16:00 PM

- W** URL: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/fifn325c/doc/fifn325c.pdf>
 Fetched: 8/10/2022 6:15:00 PM

- W** URL: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/96423/TJLM1de3.pdf?sequence=1>
 Fetched: 8/10/2022 6:15:00 PM

- W** URL: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/download/511/586>
 Fetched: 8/10/2022 6:14:00 PM

- W** URL: http://intranet.aidimme.es/acceso_externo/difusion_proyectos/adjuntos_resultados/E8_6_MENDME_IMDEEA_2018_2_AIDIMME_2018.pdf
 Fetched: 8/10/2022 6:13:00 PM

- SA** **Alverca Orrego y Martinez Martinez-PT-IFA.pdf**
 Document Alverca Orrego y Martinez Martinez-PT-IFA.pdf (D112318381)

- SA** **Tesis Richard Luis Cajahuamàn Paucar.docx**
 Document Tesis Richard Luis Cajahuamàn Paucar.docx (D41139863)

- SA** **UNU_FORESTAL_2019_T_SHARON-PEREZ_V1.pdf**
 Document UNU_FORESTAL_2019_T_SHARON-PEREZ_V1.pdf (D54821055)

- W** URL: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322011000500004
 Fetched: 8/10/2022 6:14:00 PM

- W** URL: <http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/596/T.FRS-197.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
 Fetched: 8/10/2022 6:14:00 PM

- SA** **Xiomara Alexandra Moncayo Chamorro.docx**
 Document Xiomara Alexandra Moncayo Chamorro.docx (D107289668)

- SA** **PTI_Caracterización Dasométrica ACERILLO_ACP Gotas Agua Viva_4.pdf**
 Document PTI_Caracterización Dasométrica ACERILLO_ACP Gotas Agua Viva_4.pdf (D106244127)

- SA** **UNU_Forestal_2021_P_Erick_Villacorta_V1.pdf**
 Document UNU_Forestal_2021_P_Erick_Villacorta_V1.pdf (D111653205)

- W** URL: https://oa.upm.es/36492/1/PFC_JAIME_DE_LA_MATA_JIMENEZ.pdf
 Fetched: 8/10/2022 6:15:00 PM

- W** URL: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120284/Rustom_Antonio_Estadistica_descriptiva.pdf
 Fetched: 8/10/2022 6:15:00 PM

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

**“VALIDACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD
DINÁMICO DE LA MADERA DE *Pinus tecunumanii* PROCEDENTE
DE UNA PLANTACIÓN
DE VILLA RICA - PASCO”**

**TESIS PARA OPTAR TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL
JUAN LUIS CORREA GARCÍA**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Julio Canchucaya Rojas
Presidente

Dr. Luis Shuseki Yoza Yoza
Miembro

Mg. Sc. Rolando Montenegro Muro
Miembro

Dr. Manuel Chavesta Custodio
Asesor

DEDICATORIA

*A Dios, por mostrarme el camino correcto y
haberme permitido cumplir esta meta.*

*A mi familia, a los que están físicamente conmigo y
también a los que no. Por ser mi principal fuente de
inspiración.*

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento

A mi asesor, el profesor Manuel Chavesta Custodio, por su apoyo incondicional, predisposición y sus enseñanzas durante el desarrollo de esta tesis.

Al profesor, Moisés Acevedo Mallque, por su apoyo incondicional, paciencia y dedicación durante la fase inicial de esta tesis.

Al profesor, Luis Yoza Yoza, por su disposición a resolver mis dudas.

Al profesor, Rolando Montenegro Muro, por su apoyo en el análisis estadístico.

Al Dr. Eloy, Miriam, Yanett, Haru y Piero; por su orientación y sus consejos durante el desarrollo de esta tesis.

A Vane, por su apoyo incondicional y sus palabras de motivación durante este proceso.

A Fer, por estar siempre dispuesta a brindarme su ayuda y compartir su experiencia.

A Mell, por su apoyo durante la realización de los ensayos destructivos en la prensa.

A mis padres y hermanos, por ser los principales promotores de mis sueños, por la confianza y por creer en mí.

Finalmente, al Programa Nacional de Estudios e Investigación Para el Desarrollo Forestal y Cambio Climático de la Dirección de Desarrollo Tecnológico Agrario del Instituto Nacional de Innovación Agraria; y al proyecto 121_PI “Innovación en el uso de maderas mediante la generación de tablas de propiedades tecnológicas relacionada a edad utilizando métodos no destructivos en especies procedentes de plantaciones forestales de la región amazónica”; del Programa Nacional de Innovación Agraria.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	2
2.1. Descripción de la especie.....	2
2.1.1. Taxonomía, distribución y hábitat.....	2
2.1.2. Características del árbol.....	3
2.1.3. Características de la madera	3
2.2. Aspectos fundamentales.....	4
2.2.1. De la madera como materia prima.....	4
2.2.2. De las pruebas no destructivas.....	7
2.3. Antecedentes.....	13
III. METODOLOGÍA	17
3.1. Lugar de Ejecución de los Ensayos	17
3.2. Materiales y equipos	17
3.2.1. Evaluación de plantación y extracción de árboles.....	17
3.2.2. Preparación de probetas.....	17
3.2.3. Ensayos por métodos no destructivos y no destructivos	18
3.2.4. Otros materiales.....	18
3.3. Zona de Estudio y Procedimiento	18
3.3.1. Zona de estudio.....	18
3.3.2. Selección y colección de muestras	19
3.3.3. Procesamiento de trozas y codificación de probetas	20
3.3.4. Ensayos no destructivos.....	23
3.3.5. Realización de ensayos destructivos.....	26
3.3.6. Procesamiento de datos y evaluación de resultados	28
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1. Módulo de elasticidad dinámico por el método de propagación de ondas 23 Khz 29	
4.2. Módulo de elasticidad dinámico por el método de vibraciones transversales y Fast Fourier Transform (FFT)	32
4.3. Módulo de elasticidad estático por el método destructivo.....	34
4.4. Comparación entre distintos métodos.....	35
4.5. Regresión lineal simple Velocidad de propagación de ondas – MOE _e	37
4.6. Regresión lineal simple MOE _{d1} – MOE _e	38
4.7. Regresión lineal simple MOE _{d2} – MOE _e	39
V. CONCLUSIONES	41
VI. RECOMENDACIONES	42
VII. BIBLIOGRAFÍA	43
VIII. ANEXOS	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Información de correlaciones para estimar el MOE _e	15
Tabla 2: Caracterización dasométrica de árboles de <i>Pinus tecunumanii</i>	20
Tabla 3: Codificación empleada para probetas.....	22
Tabla 4: Valores promedio de humedad, densidad verde y densidad básica	29
Tabla 5: Estadísticos descriptivos para MOE _{d1} y Velocidad (Vel) por el método de propagación de ondas en cara tangencial, radial.	30
Tabla 6: Estadísticos descriptivos para Frecuencia y MOE _{d2} por el método de vibraciones transversales.....	34
Tabla 7: Estadísticos descriptivos de MOE _e y contenido de humedad por el método destructivo	35
Tabla 8: Estadísticos descriptivos para MOE _d por métodos no destructivos y MOE _e por método destructivo	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vibración de flexión. Fuente: Iñiguez (2007).....	11
Figura 2. Modos de vibración de una barra en condiciones de extremos libre. Fuente: Sucksmith (2009).....	12
Figura 3. Mapa de ubicación de plantación de <i>Pinus tecunumanii</i>	19
Figura 4. Disposición de listones en vista transversal de una troza	21
Figura 5. Vista tridimensional de los listones de 2,5 x 2,5 cm en la troza. Fuente: Elaborado en base a Bustamante (2019).....	21
Figura 6. Codificación de probetas.....	22
Figura 7. Medición de espesor y ancho de probetas.....	23
Figura 8. Colocación de los sensores de Microsecond Timer.	24
Figura 9. Medición de la frecuencia de vibración en el software FFT Analyzer	25
Figura 10. Ensayo de flexión estática en prensa universal.....	26
Figura 11. Probeta para determinar densidad y contenido de humedad. Fuente: Bustamante (2019).....	27
Figura 12. Diagrama de cajas del MOE_{d1} en cara radial y tangencial.....	31
Figura 13. Ensayo FFT analyzer de una probeta	33
Figura 14. Diagrama de cajas del MOE destructivo (MOE_e), MOE empleando la FFT (MOE_{d2}) y el MOE empleando el Microsecond timer (MOE_{d1})	36
Figura 15. Diagrama de dispersión y regresión lineal simple entre velocidad de propagación de ondas con el Microsecond timer y el MOE_e	37
Figura 16. Diagrama dispersión y regresión lineal simple entre el MOE_{d1} y el MOE_e	38
Figura 17. Diagrama dispersión y regresión lineal simple entre el MOE_{d2} y el MOE_e	39

ÍNDICE DE ANEXOS

INFORMACIÓN DE ÁRBOLES EVALUADOS EN LA PLANTACIÓN.....	51
INFORMACIÓN DE TROZAS	52
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS	53
TABLA RESUMEN DE LAS PROPIEDADES POR PROBETA.....	54
COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE.....	59
PRUEBA T-STUDENT ENTRE LOS MOE_{d1} HALLADOS EN CARA RADIAL Y TANGENCIAL	60
PRUEBA ANOVA ENTRE MOE_e , MOE_{d1} y MOE_{d2}	61
PRUEBA DE TUKEY ENTRE MOE_e , MOE_{d1} y MOE_{d2}	62
ANÁLISIS DE RESIDUALES	63
ANÁLISIS DE RESIDUALES Y COEFICIENTES DE REGRESIÓN.....	63

RESUMEN

El objetivo principal del estudio fue validar la efectividad de dos métodos no destructivos para determinar los módulos de elasticidad dinámico; el de velocidad de propagación de ondas sonoras con el equipo Microsecond timer (MOE_{d1}) y el de modos de vibraciones transversales mediante la Fast Fourier Transform (MOE_{d2}). Para ello, se determinó el módulo de elasticidad estático (MOE_e) mediante el método destructivo según NTP. Las mediciones del módulo de elasticidad dinámico y estático se realizaron en probetas de *Pinus tecunumanii*, en condición saturada ($CH > 30\%$). Se realizaron regresiones lineales para predecir y evaluar el comportamiento del MOE_e en función del MOE_{d1} y MOE_{d2} hallados por métodos no destructivos. Se encontró que el MOE_{d2} resultó ser el mejor para estimar el MOE_e , con R^2 de 0,81. Adicionalmente, se realizó la regresión lineal empleando la velocidad de propagación de ondas para estimar el MOE_e , obteniéndose un bajo coeficiente de determinación para este modelo.

Palabras clave: Propiedades mecánicas, módulo de elasticidad, microsecond timer, fast fourier transform.

ABSTRACT

The main objective of the study was to validate the effectiveness of two non-destructive methods to determine the dynamic modulus of elasticity; the speed of propagation of sound waves with the Microsecond timer (MOE_{d1}) and the transverse vibrations modes using the Fast Fourier Transform (MOE_{d2}). Also, the static modulus of elasticity (MOE_e) was determined by the destructive method according to the Peruvian Technical Standard. The measurements of the dynamic and static modulus of elasticity were made in *Pinus tecunumanii* specimens, in a saturated condition ($CH > 30\%$). Linear regressions were performed to predict and evaluate the behavior of the MOE_e based on the MOE_{d1} and MOE_{d2} found by non-destructive methods. It was found that the MOE_{d2} was the best to estimate the MOE_e , with R^2 of 0,81. Additionally, linear regression was performed using the wave propagation velocity to estimate the MOE_e , obtaining a low coefficient of determination for this model.

Keywords: mechanical properties, modulus of elasticity, microsecond timer, fast fourier transform.

I. INTRODUCCIÓN

La madera es una de las materias primas más explotadas por el hombre. Formar parte de estructuras es uno de sus usos principales, donde a pesar de tener mucha competencia con otros materiales sintéticos destaca por ser un recurso renovable, orgánico y fácil de trabajar.

El Perú, a pesar de ser el segundo país con mayor extensión forestal de América Latina, tiene una participación en el mercado mundial de productos maderables muy baja, probablemente debido a que la producción forestal maderable en el Perú proviene fundamentalmente de bosques naturales. En estos últimos años el gobierno central, apoyado por el sector privado, viene mostrando una voluntad política de apostar por el sector forestal y en particular por las plantaciones forestales. Se ha identificado en ellas, una extraordinaria oportunidad de negocio, que permite generar empleo y cumplir con la recuperación de áreas degradadas. A pesar de existir varias especies con las que se está trabajando en plantaciones, Guariguata et al. (2017) menciona que el *Pinus tecunumanii* es una de las especies que presenta mejor viabilidad para ser plantada con fines comerciales en zonas de selva alta.

Para que los diseños de estructuras de madera sean confiables, seguras y económicas es imprescindible contar con valores precisos de las propiedades mecánicas de la madera proveniente de plantaciones. Ello conlleva a la necesidad de buscar nuevos métodos denominados ensayos no destructivos, que permiten examinar las piezas de madera y determinar sus características de resistencia, sin afectar sus propiedades, su integridad y su utilidad final (Acuña et al, 2006)

El objetivo del presente estudio, es determinar los valores del MOE dinámico de probetas en condición saturada de *Pinus tecunumanii* provenientes de una plantación de 11 años asociada a cultivo de café; utilizando técnicas no destructivas de ultrasonido y vibraciones transversales; para predecir los valores obtenidos en flexión estática por el método destructivo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Descripción de la especie

2.1.1. Taxonomía, distribución y hábitat

Según TROPICOS (2020):

Familia : Pinaceae

Género : Pinus

Especie : *Pinus tecunumanii* F. Schwerdtf. ex Eguluz & J.P. Perry

Nombre común : Pino

Nombres Internacionales : Pinabete (Honduras), Pino ocote (Guatemala).

La distribución natural de *Pinus tecunumanii* está asociada a áreas montañosas que van desde el sur de México hasta el Noroeste de Nicaragua, pasando por Guatemala, El Salvador y Honduras. La especie se desarrolla a una altitud entre 1500 y 2600 msnm. El rango de precipitación va de 1800 a 2400 mm y la temperatura entre 12 a 22°C, con una humedad relativa de 80%. Se le puede encontrar en varios tipos de suelo, principalmente los que mantienen un pH ácido entre 4,5 y 5,5. Crece en rodales puros, pero a menudo asociado con *Pinus oocarpa* var *ochoterenai*, *Pinus maximinoi*, *P. oaxacana*, *P. nubicula* y *P. ayacahuite*. (CATIE, 2000)

En el Perú esta especie fue introducida entre los años 1980 y 1993 en la zona de Pozuzo, Villa Rica y otras localidades de selva central, como parte de un proyecto denominado "Proyecto Peruano Alemán" (Quispe, 2015). Los resultados de este proyecto sirvieron de base para mejorar la tecnología en la instalación de plantaciones forestales, lo cual sumado a la buena adaptación de la especie propició que en años posteriores se realizaran más plantaciones asociándola a sistemas agroforestales y obteniendo buenos resultados. (Berrios, 2007)

2.1.2. Características del árbol

Según CATIE (2003) su fuste puede alcanzar hasta 55 m de altura, recto y sin ramas hasta 40 o 60 % de su altura, con un DAP de 50 a 90 cm. Es considerado el pino con mejor forma de fuste de todos los pinos de México y América Central. Su corteza externa es gris rojiza, áspera y fisurada en la base; y más lisa y rojiza en la parte superior. Su corteza interna es color rojo anaranjado.

2.1.3. Características de la madera

Según CATIE (2003) la madera es de color castaño amarillento, de textura fina, grano recto, brillo bajo, olor característico a resina fragante, sabor no característico y moderadamente pesada. Tiene menor contenido de resina comparada con *P. caribaea* o *P. elliottii*. Es fácil de secar, preservar y trabajar. Además, según Claros et al. (2017) es moderadamente resistente al ataque de hongos.

Gifoni & Teixeira (2002) encontraron una densidad básica de 0,418 g/cm³ en madera de *Pinus tecunumanii* procedente de Centro América; y de 0,398 g/cm³, de México. Asimismo, Gallo (2014) realizó un estudio de las propiedades físicas obteniendo los resultados siguientes:

- Contracción tangencial: 1,56%
- Contracción radial: 0,79%
- Relación T/R: 1,97

Trianoski et al. (2014) determinó las propiedades mecánicas de la madera de *Pinus tecunumanii* a 12% de humedad, cuyos valores son:

- MOE en flexión : 91193,22 kg/cm²
- MOR en flexión : 724 kg/cm²
- MOE en Compresión paralela : 143259,93 kg/cm²
- MOR en Compresión paralela : 397,69 kg/cm²
- Cizallamiento : 116,45 kg/cm²
- Dureza : 3410 N

Respecto a los usos de *Pinus tecunumanii*, CATIE (2003) menciona que su madera es empleada para construcción pesada, construcción interior (puertas y marcos de ventanas), postes tratados, contrachapado, muebles, artesanías, artículos torneados, producción de pulpa y en menor grado para leña y su resina es de buena calidad para la producción de serpentina y otros productos.

2.2. Aspectos fundamentales

2.2.1. De la madera como materia prima

a. Variabilidad de la madera

Gimenez et al. (2014) afirman que la madera es un material heterogéneo y extremadamente variable. La variabilidad de sus elementos estructurales, así como de sus propiedades físicas se atribuyen a la diferente ubicación geográfica de los individuos. Navia (2006) realizó una evaluación del MOE_e en tres rodales de *Pinus radiata* de diferentes calidades de sitio, encontrando que existen diferencias significativas entre los tres sitios. Por su parte, Vásquez (2003) menciona que otros factores que explican la variabilidad de la madera, además de la calidad del sitio, son los factores hereditarios, el manejo silvicultural, los defectos de la madera y su compleja estructura variable.

Goche et al. (2000), al analizar dos especies de coníferas (*Abies religiosa* y *Pinus ayacahuite*) logró demostrar que existe una variación en las propiedades físicas de la madera que depende de la ubicación de la misma dentro del árbol, es decir, de acuerdo a qué tan cercana o lejana se encuentra la pieza de madera evaluada de la medula y análogamente en dirección longitudinal. Trianoski et al. (2014) confirmó esta variación longitudinal de la densidad básica con varias especies del género *Pinus*, entre ellas *Pinus tecunumanii* de 17 y 18 años.; concluyendo que esta especie presenta un patrón de disminución de la densidad básica conforme se incrementa la altura del fuste.

b. Factores que afectan la resistencia mecánica de la madera

Campos (2015) encontró en *Pinus maximinoi* diferencias significativas entre el MOE_e en flexión de la madera de la zona central de árbol y la madera ubicada en la periferia, obteniendo mayores valores en la periferia. Estos resultados fueron para madera en condición seca (12% de humedad) y madera en condición verde (30% de humedad).

García (2017) encontró que longitudinalmente en flexión estática *Retrophyllum rospigliosii* presenta una tendencia de disminución de la resistencia desde la base hacia la parte media y luego un incremento hacia el ápice. Por otro lado, Ramírez et al. (2001) realizó una evaluación en *Pinus radiata* a diferentes alturas, demostrando estadísticamente que existe una variación solo en el MOR y el ELP en las alturas evaluadas.

Los tratamientos silviculturales también influyen de manera considerable en la resistencia a la flexión. Winck et al. (2014) encontró una variación fuerte en el módulo de elasticidad de diferentes rodales de *Pinus taeda* de 20 años, que previamente fueron sometidos a raleos a diferentes intensidades. El módulo de elasticidad resultó mucho menor en los rodales con raleos mucho más fuertes. Mientras que Campos (2015) encontró que la madera proveniente de raleo tenía menores valores de MOE_e en flexión que la madera de corta final. De acuerdo a esto Ordoñez (2002) menciona la importancia de considerar la influencia de la edad en las propiedades tecnológicas de la madera.

Pérez et al. (2000) menciona que la madera juvenil presenta importantes diferencias en sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y anatómicas con respecto a la madera adulta. En

Pinus taeda de 18 años, encontró diferentes porcentajes de madera juvenil y diferencias significativas en el MOE_e en flexión; siendo mayor en la madera adulta y menor en la madera juvenil, recomendando no utilizar piezas con alto porcentaje de madera juvenil para fines estructurales.

Vignote et al. (2013) señala que los primeros anillos que se forman en el árbol, están constituidos por madera que a simple vista es similar al resto de la madera, pero posee unas características de comportamiento mecánico y físico diferentes al resto de la madera formada. Esta madera es más ligera, con traqueidas o fibras más cortas, paredes celulares más delgadas, menor contenido de celulosa y más hemicelulosa, mayor desviación de la fibra y una proporción más alta de madera de compresión. Lasserre et al. (2004) menciona que gran parte de la oferta de madera proviene de plantaciones de especies de rápido crecimiento son manejadas en rotaciones cortas. En consecuencia, se ha producido un incremento de la madera juvenil en las cosechas.

Chan (2002) menciona que los nudos son considerados el defecto más común en la madera y los define como las porciones de ramas que quedan rodeadas por la madera del tronco, es el rastro resultante del desarrollo de una rama, cuyas características organolépticas y propiedades son diferentes a las de la madera circundante. Vignote et al. (2013) menciona que la presencia de nudos disminuye de forma notable la resistencia mecánica de la madera, sobre todo a los esfuerzos de flexión y tracción. Davalos et al. (2010) demostró estadísticamente que la existencia de nudos en la madera de diferentes especies de pino comercial afecta considerablemente la resistencia a la flexión estática.

León y Espinoza (2001) mencionan que existe una estrecha relación entre las propiedades mecánicas y la estructura anatómica de la madera; además, es posible predecir el comportamiento que experimenta la madera ante determinado tipo de esfuerzo mediante el estudio de su estructura anatómica.

c. Comportamiento viscoelástico de la madera

Sotomayor y Villaseñor (2006) mencionan que la madera es un material que se comporta mecánicamente como un sólido elástico y que obedece las leyes de resistencia de materiales,

pero que con el paso del tiempo los elementos estructurales de madera que son sometidos a cargas permanentes sufren deformaciones, lo que denota un carácter viscoso en la madera. El comportamiento antes mencionado depende de la intensidad y duración de la carga y de la rigidez del miembro estructural.

Evangelista y Afanador (2016) indican que los materiales viscoelásticos lineales se caracterizan por tener un comportamiento intermedio entre un sólido elástico lineal y un fluido viscoso; es decir, tienen la capacidad de almacenar energía como un sólido elástico y disiparla siguiendo la ley de los fluidos viscosos.

Sotomayor (2015) menciona que la velocidad de carga es el parámetro que pone en manifiesto el carácter viscoelástico de la madera. La resistencia elástica aumenta cuando las deformaciones provienen de la aplicación de cargas súbitas o periódicas. Es el caso de las sollicitaciones dinámicas como las vibraciones y sollicitaciones acústicas como el ultrasonido y las ondas de esfuerzo.

Ashby (1999) menciona que el MOE_e es una característica intrínseca del material y no debería variar según el método usado para su determinación, sin embargo, el autor encontró que al utilizar diferentes velocidades de carga en el ensayo de flexión estática se obtenía diferentes valores de MOE_e y esto era explicado por el carácter viscoelástico de la madera. Ya que según Sotomayor y Villaseñor (2006) el comportamiento viscoso de la madera depende de la intensidad, duración de la carga y rigidez del miembro estructural. Basados en lo anterior, estos autores explican que la diferencia entre los resultados obtenidos para el MOE_d y MOE_e en la madera es explicada por su carácter viscoelástico, que aumenta la rigidez aparente de las probetas. Pues en diversos estudios encontraron que siempre el MOE_d era mayor al MOE_e , que entre probetas los valores aumentaban o disminuían proporcionalmente y que en los métodos dinámicos la velocidad de sollicitación es superior a la velocidad de sollicitación en los métodos estáticos, produciendo una superposición entre la respuesta de su rigidez elástica más la respuesta de la rigidez viscosa.

2.2.2. De las pruebas no destructivas

Ross & Pellerin (1994) mencionan a las técnicas no destructivas, como una alternativa para identificar propiedades físicas y mecánicas de la madera sin afectar su capacidad de tener un uso final. Entre estas técnicas destacan el método de evaluación de la propagación de ondas en la madera. Los autores indican que existen dos tipos de ondas que pueden propagarse en la madera, las longitudinales y las transversales. Las ondas longitudinales son las más veloces de todas las ondas y son empleadas para la evaluación de las propiedades de la madera.

Jacques et al. (2004) y Toro & Velásquez (2005) mencionan que estas evaluaciones permiten realizar no solo la identificación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, sino también la identificación de los defectos internos, su tamaño, su forma y orientación. Además, destacan la eficiencia de los métodos acústicos (ultrasonido y frecuencia de resonancia) como una alternativa económicamente rentable para estimar el MOE_e en flexión en comparación con los métodos convencionales.

Soto et al. (2012) menciona que en la madera es posible determinar dos tipos de MOE . Uno estático (MOE_e) y otro dinámico (MOE_d). El primero utiliza un dispositivo que permite aplicar una carga, registrar una deflexión en el rango elástico y con las dimensiones del elemento de madera se obtiene el MOE_e . El segundo, puede hallarse de dos maneras:

- a) Empleando dispositivos que facilitan el paso de ondas acústicas por un elemento de madera calculando el tiempo o la velocidad de tránsito de estas ondas, que en conjunto con la densidad permiten obtener el MOE_{d1} .
- b) Según Malhotra et al. (2004) con la frecuencia natural que está asociada a la vibración de una pieza de madera, que en conjunto con sus dimensiones y su masa permiten obtener el MOE_{d2} .

Divos et al. (2005) menciona que las propiedades de la onda sónica que se propaga dependen de diversos parámetros asociados al material y a la geometría de la pieza, por ende, no es posible extrapolar resultados a otras especies o productos derivados.

a. Método de propagación longitudinal de ondas de ultrasonido.

Según Iñiguez (2007) los métodos acústicos pueden emplear dos tipos de ondas: Las ondas ultrasónicas (superiores a los 20 kHz), generadas mecánicamente mediante un acelerómetro piezoeléctrico y las ondas sónica (que va desde los 20 Hz a los 20 kHz) generada por el impacto de un martillo. El autor menciona también que las ondas de impacto sónicas tienen la ventaja de permitir el estudio de distancias de gran longitud, ya que debido a su baja frecuencia tiene un mayor alcance.

FAKOPP (2022) provee equipos que permiten medir el tiempo en que las ondas se desplazan por piezas de madera de dimensiones conocidas y en base a ello estimar la velocidad. El Microsecond Timer, permite estimar la velocidad de las ondas de ultrasonido de 23 kHz y el Ultrasonic Timer, permite estimar la velocidad de las ondas de ultrasonido de 45 kHz.

Según Wang et al. (2001) dos propiedades de los materiales pueden ser medidas con técnicas de ondas de esfuerzo longitudinales: la conservación de energía y la disipación de la energía. La conservación de energía se manifiesta como la velocidad con la que viaja una onda en un material. Por otro lado, la velocidad a la que se atenúa la intensidad de una onda es una indicación de la disipación de energía.

Mora et al. (2009) mencionan un método que relaciona la magnitud de la velocidad de propagación de ondas con el módulo de elasticidad dinámico de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$v^2 = \frac{MOE_{d1}}{\rho}$$

Donde:

- v: Velocidad de propagación de la onda;
- **MOE_{d1}**: Módulo de elasticidad dinámico por método de propagación longitudinal de ondas de ultrasonido;
- ρ: Densidad del material (masa/volumen)

Para el cálculo de la velocidad de propagación de la onda el autor utilizo la siguiente relación:

$$v = \frac{L}{T}$$

Donde:

- v: Velocidad de propagación de la onda;
- L: Distancia entre los sensores;
- T: el tiempo entre la salida y llegada del pulso.

b. Método de análisis de vibraciones

Según Malhotra et al. (2004) para una pieza de determinadas dimensiones que se encuentra vibrando, la frecuencia natural que está asociada a esa vibración está relacionada con sus propiedades físicas (densidad) y mecánicas (módulo de elasticidad). Por ello, el módulo de elasticidad dinámico de una pieza prismática puede ser determinado empleando relaciones matemáticas entre la frecuencia natural de vibración y su densidad.

Iñiguez (2007) indica que utilizando un método de análisis de vibraciones, el cual consiste en medir la frecuencia natural de vibración de una pieza, es posible determinar sus propiedades resistentes. El autor menciona que una probeta puede hacerse vibrar de varias formas, de acuerdo con las condiciones de apoyo o al lugar de impacto. De esa manera, si el golpe que se realiza es transversal al eje directriz de la probeta (Figura 1). El modo de vibración que resulta más marcado es el de flexión, pudiendo de esta forma medir la frecuencia natural en flexión.

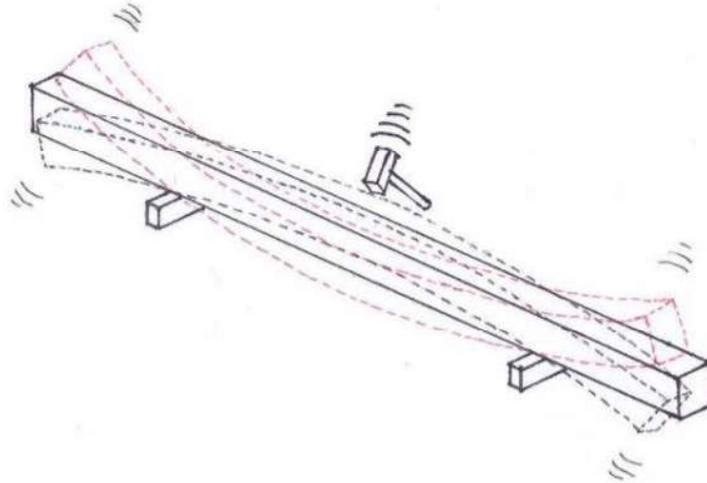


Figura 1. Vibración de flexión. Fuente: Iñiguez (2007)

Según Carnero (2007) la solución de una ecuación para la vibración transversal dispone de una serie de modos que se muestran en la Figura 2. El autor menciona varias ecuaciones que permiten calcular el módulo de elasticidad dinámico, unas más complejas que otras; sin embargo, la ecuación de Euler, por su simplicidad es la más empleada en este tipo de ensayos, que se detalla a continuación:

$$MOE_{d2} = \left(\frac{2 \cdot f_n}{\gamma_n \cdot \pi} \right)^2 \cdot \frac{m \cdot L^3}{I}$$

- MOE_{d2} : Módulo de elasticidad dinámico por el método de vibración transversal;
- f_n : Frecuencia natural de vibración en flexión, siendo “n” el modo (si n=1) se llama modo básico o fundamental;
- m: es la masa de la pieza;
- γ_n : es una constante igual a $(n + 0,5)^2$ para $n \geq 1$, donde “n” es el modo de vibración (Figura 3), y $\gamma_1 = 2,267$;
- L: Longitud de la probeta;
- I: Momento de inercia, $I = ab^3/12$, donde a es el ancho y b es el espesor de la probeta.

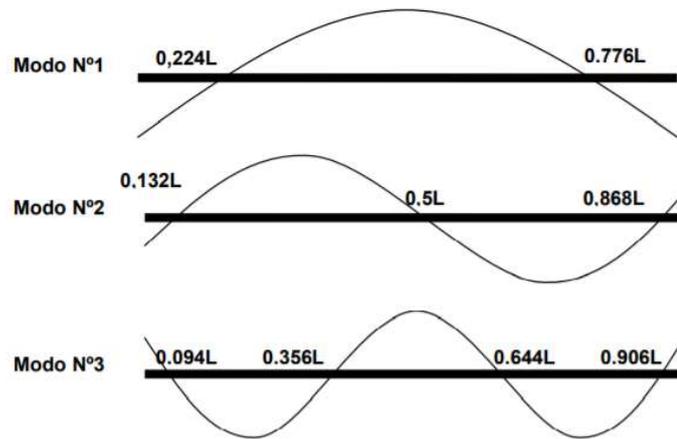


Figura 2. Modos de vibración de una barra en condiciones de extremos libre. Fuente: Sucksmith (2009)

c. Factores que influyen en la propagación de ondas

Iñiguez (2007), Raquelé (2004) y Arriaga (2006) mencionan que los factores que influyen en la propagación de ondas dependen del material y de la interacción entre ellos, y de forma general mencionan los siguientes:

- Acople de transmisores (sensores): Una incorrecta ejecución repercute negativamente en los resultados obtenidos. El transmisor debe estar en contacto pleno con el material, cualquier discontinuidad o bolsa de aire supone una dispersión de la señal, ya que el aire es opaco a los ultrasonidos.
- Contenido de humedad: El agua libre aumenta la atenuación resultando en una disminución de la velocidad en las direcciones longitudinal, radial y tangencial. Por cada incremento de 1% de humedad se produce una disminución de la velocidad de un 0,8%, siguiendo una relación lineal entre 5 y 30%. Además, indica que los valores de lectura obtenidos deben ser corregidos en función a su contenido de humedad a un valor de referencia que usualmente es 12%.
- Longitud de la probeta: A pesar de que en teoría la longitud del camino no debe afectar a la velocidad, en la práctica, menores longitudes de lectura tienden a dar como resultado valores de velocidad más altos. Por cada incremento de 1 metro en la longitud se produce una pérdida de velocidad del 2%, con un coeficiente de determinación de dicha relación de 0,78.

- Forma y dimensiones de la pieza: En la mayoría de casos la velocidad no depende de este factor; sin embargo, en la fórmula utilizada para el cálculo de la velocidad de propagación de onda ultrasónica depende del módulo de elasticidad, la densidad y el coeficiente de Poisson. En piezas en las que la dimensión longitudinal es aproximadamente 20 veces la sección transversal, la velocidad es independiente del coeficiente de Poisson, siendo válida la predicción que se utiliza.

Por otro lado, Raquelé (2004) indica que la velocidad de propagación de ondas varía según los siguientes términos:

- Es mayor en la dirección longitudinal que en la transversal (siendo menor en la dirección tangencial que en la radial).
- Es mayor cuanto mayor es la longitud de fibras.
- Es menor cuanto mayor es la porosidad y la permeabilidad de la pared celular, considerando constante a la densidad.
- Es mayor cuanto mayor sea la densidad en todas las direcciones de la madera, considerando humedad constante.
- Es mayor cuanto mayor es la continuidad de las regiones cristalinas de la pared celular (mayor ocurrencia de celulosa), decreciendo con el aumento de regiones amorfas (mayor ocurrencia de hemicelulosa y lignina).

Bucur (1995) indica que las propiedades de la madera como la densidad y la estructura de los anillos de crecimiento, específicamente la proporción de madera temprana y tardía, influyen en la propagación de ondas ultrasónicas.

2.3. Antecedentes

Caballé et al. (2020) evaluó por el método de propagación de ondas, árboles en pie de *Pinus ponderosa* de varias edades encontrando valores del MOE_{d1} que van desde 21719 hasta 225357 kg/cm² con una media de 114208 kg/cm², esta variación se explica por el amplio rango de edades, calidades de sitio y estructuras del rodal. Además, los autores encontraron que la altura de los árboles evaluados y la edad influían positivamente en el MOE_{d1} , de tal manera que a mayor edad o mayor altura se obtenían MOE_{d1} mayores.

Mata (2011) determinó el módulo de elasticidad dinámico y estático en *Pinus sylvestris* con 11,8% de humedad. Obtuvo un valor de MOE_{d1} por el método de propagación de ondas con Microsecond timer de 122355 kg/cm² con un C.V. de 11,4%. El MOE_e fue de 92611 kg/cm² con un C.V. de 13,9%. Además, realizó una regresión lineal entre MOE_{d1} – MOE_e obteniendo un modelo con R^2 de 0,67.

Montón (2012) evaluó *Pinus radiata* de edades entre 35 y 50 años y contenido de humedad entre 10 y 12%. El MOE_{d2} por el método de vibraciones transversales fue 102073 kg/cm² con un C.V. de 24,10%.

Montero (2013) determinó el MOE_{d1} con Microsecond timer en vigas de *Pinus sylvestris* L. de 200 x 150 mm y largos variables de 4 a 5 m secas al 12% de humedad; encontró una velocidad promedio de 4974 m/s con C.V. de 5,6%; mientras, que el MOE_{d1} promedio fue de 124609 kg/cm², además, realizó la regresión lineal para estimar el MOE_e con el MOE_{d1} obteniendo un modelo con un R^2 de 0,46.

El mismo autor realizó el análisis de vibración transversal en estas vigas obteniendo la frecuencia promedio de 55 Hz con un C.V. de 7,5% en el canto y 39 Hz con un C.V. de 14% en la cara. Mientras que el MOE_{d2} hallado por este método fue de 99024,64 kg/cm² en el canto y 104123 kg/cm² en la cara. El autor realizó una regresión lineal para estimar el MOE_e en función al MOE_{d2} obteniendo un R^2 de 0,26% en el canto y 0,19% en la cara.

Acuña et al. (s.f.) determinó el MOE_e y el MOE_{d1} por el método de propagación de ondas de ultrasonido en vigas de madera de *Pinus sylvestris*, clasificada para uso estructural. También, realizó un análisis de regresión múltiple, para predecir el MOE_e empleando variables independientes como la velocidad de propagación de ondas sonoras y el peso específico obteniendo una relación con un R^2 de 0,7032, indicando que el 70% de la variabilidad del MOE_e está explicada por el modelo de regresión múltiple entre las variables en mención.

Hermoso et al. (2007) aplicaron ultrasonido para evaluar madera rolliza de pequeños diámetros de *Pinus nigra subsp. Saltzmanii* a 14% de humedad. Mediante un modelo lineal ajustado por técnicas de regresión lineal obtuvieron un R^2 de 0,68; concluyendo que este método resulta eficaz en la clasificación de rollos de pequeño diámetro de esta especie.

Además, menciona que este método puede emplearse en la predicción de la presencia de anomalías y particularidades del crecimiento de la madera, en especial de madera juvenil.

Manavella et al. (2019) determinaron el MOE_{d1} por ultrasonido en vigas de pino ponderosa (*Pinus ponderosa Dougl. ex Laws*) y empleó el MOE_{d1} como variable predictora para estimar el MOE_e mediante una regresión lineal, obteniendo un modelo con R^2 de 0,81.

El Instituto Tecnológico AIDIMME (2019) propuso una metodología de evaluación no destructiva de madera de diferentes tipos de pino, acondicionados a humedad de equilibrio higroscópico de 12%. Observaron diferentes variables analizadas estadísticamente mediante regresiones para determinar el grado en el que influían en el MOE_e en flexión estática, cuyos resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Información de correlaciones para estimar el MOE_e .

Especie	Variables independientes	Coefficiente de determinación (R^2) de la regresión lineal en %
<i>Pinus sylvestris</i>	Velocidad de ultrasonidos	52
<i>Pinus pinaster</i>	MOE obtenido mediante emisión – recepción de ultrasonidos	83

* La velocidad de ultrasonidos fue estimada usando el equipo Sylvatest Trio

FUENTE: Elaborado en base a AIDIMEE 2019

França et al. (2019) realizaron la evaluación destructiva y no destructiva en madera de pino amarillo (*Pinus palustris*, *Pinus echinata*, *Pinus taeda*, *Pinus elliottii*) seca al horno a 12% de contenido de humedad; del MOE_e y el MOE_{d2} por el método de vibración transversal obtuvieron un modelo lineal con un R^2 de 0,769.

Niemz et al. (1994) realizaron ensayos en probetas con especies de latifoliadas y coníferas de densidades medias que van de 0,57 g/cm³ a 0,69 g/cm³ y contenido de humedad promedio de 11%; obtuvieron velocidades de propagación que van desde 4476 m/s y 5049 m/s para el

caso de las latifoliadas; y para coníferas de 4706 m/s y 5036 m/s. Los autores concluyen que existe una relación directa entre la densidad y la velocidad de propagación del sonido en un material.

Divos et al. (2005) mencionan que las propiedades de la onda sónica propagada dependen de diversos parámetros asociados al material y a la geometría de la pieza; por ende, no es posible extrapolar resultados a otras especies o productos derivados.

Fathi et al. (2020) caracterizaron las propiedades elásticas de la madera de *Populus alba* mediante el método no destructivo de propagación de ondas y mediante el método convencional en una prensa universal. Las probetas en evaluación fueron agrupadas en rangos de humedad de 50 a 100%, con una amplitud de clase de 10%. Demostraron que tanto el MOE_e como el MOE_{d1} disminuyen al incrementarse el contenido de humedad; siendo los mayores y menores, los del rango 50-60% y 90-100% respectivamente, debido a que la madera es un material viscoelástico especialmente a altos contenidos de humedad.

Ramos & Cuellar (2018) relacionaron mediante regresión lineal simple en *Cedrelinga cateniformis* los MOE_{d1} por métodos no destructivos empleando Microsecond timer y Ultrasonic timer con el MOE_e en flexión estática mediante métodos destructivos. El modelo lineal obtenido empleando al MOE_{d1} hallado con Microsecond timer tuvo un R^2 de 0,75; mientras que el obtenido empleando el MOE_{d1} con Ultrasonic timer fue de 0,52.

III. METODOLOGÍA

3.1. Lugar de Ejecución de los Ensayos

Los ensayos por métodos destructivos se realizaron en el Laboratorio de Propiedades Físicas y Mecánicas de la Madera del Departamento de Industrias Forestales de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM). Los ensayos no destructivos se realizaron en la sala de Tecnología de la Madera - Laboratorio de Investigación Tecnológica en Cambio Climático del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA).

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Evaluación de plantación y extracción de árboles

- Tomógrafo acústico FAKOPP
- Cinta diamétrica
- GPS
- Motosierra

3.2.2. Preparación de probetas

- Sierra cinta
- Garlopa
- Sierra circular
- Escuadra

3.2.3. Ensayos por métodos no destructivos y no destructivos

- Microsecond Timer marca FAKOPP
- Software FFT Analyzer y accesorios
- Prensa Universal marca “Tinius Olsen” y accesorios para ensayo de flexión
- Computadora
- Micrófono
- Vernier digital con precisión de 0,01 mm
- Balanza de precisión 0,01 g
- Flexómetro

3.2.4. Otros materiales

- Spray aerosol de colores
- Plástico envolvente
- Plumones para madera
- Formatos

3.3. Zona de Estudio y Procedimiento

3.3.1. Zona de estudio

Las muestras provienen de una plantación agroforestal de *Pinus tecunumanii* asociada a cultivos de café de 11 años, con distanciamiento de 5 x 6 m; sin ningún tipo de tratamiento silvicultural. Se encuentra ubicada dentro de un predio privado en las coordenadas este 471845 y norte 8816439 entre las quebradas Oyón y Yesú (Figura 3), distrito de Villa Rica, provincia de Oxapampa, región Pasco a una altitud de 1618 msnm.

La zona tiene una variación anual de temperatura de 7,3 a 22,1 °C y una precipitación anual promedio de 1012,8 mm; con lluvias altas en los meses de enero a marzo y un periodo relativamente seco durante el resto del año. El clima, es caracterizado por el declive de la Cordillera Andina propia de la selva alta.

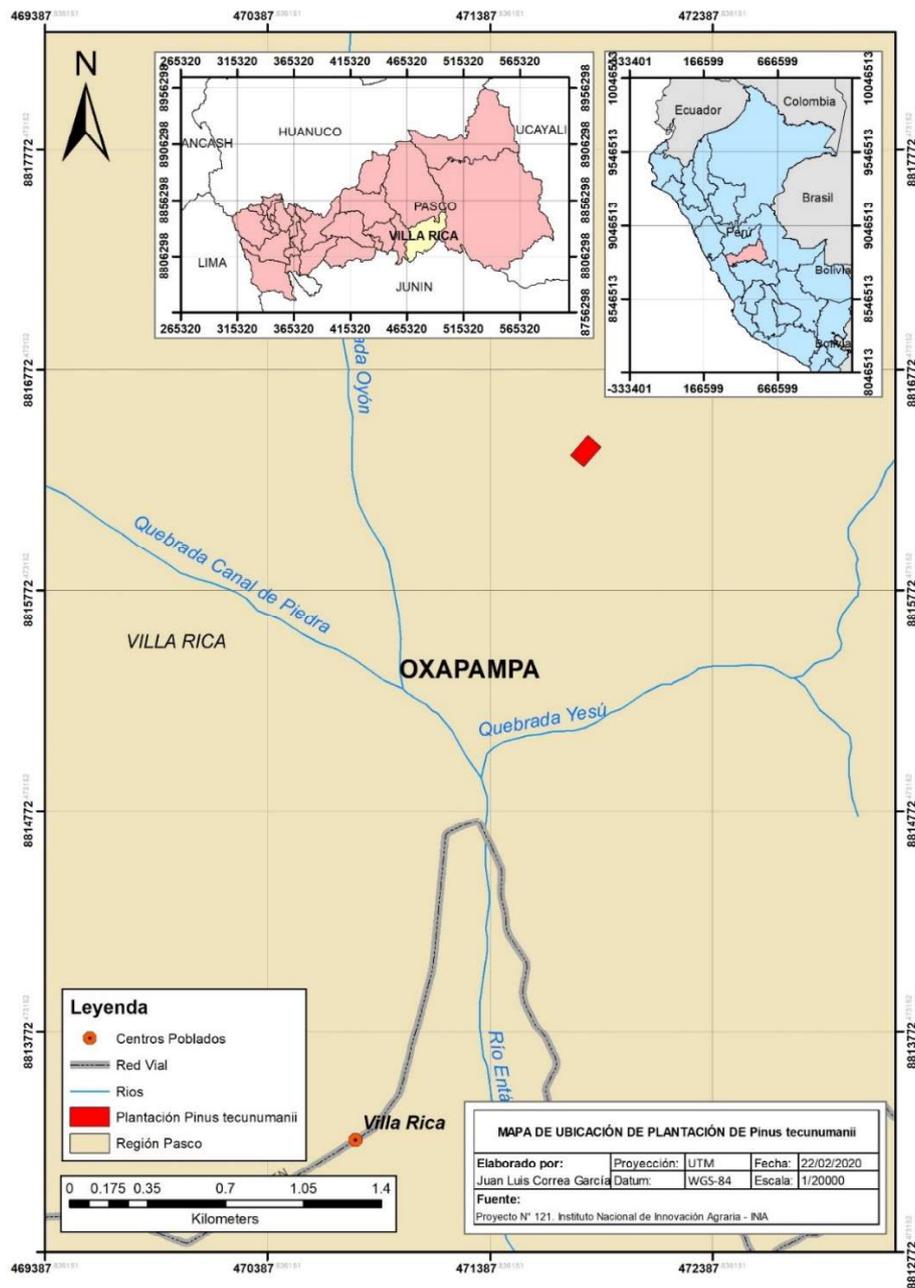


Figura 3. Mapa de ubicación de plantación de Pinus tecunumanii

3.3.2. Selección y colección de muestras

Según la NTP 251.008:2016 - selección y colección de muestras, y tratándose de un estudio preliminar se eligieron 3 árboles al azar (individuos N° 28, 35 y 62). Luego de evaluar visualmente que no mostraban evidencia de daño o enfermedad y que no estaban afectados por el efecto borde, fueron evaluados con el Tomógrafo acústico FAKOPP (instrumento

empleado para detectar el tamaño y localización de zonas podridas y huecas en el tronco, basado en la medición de la velocidad del sonido entre varios sensores del tronco) para descartar pudrición interna. Posteriormente se marcó el norte en cada árbol y fueron tumbados y trozados a 1,5 m de longitud. Cada troza fue codificada indicando el número de árbol al que perteneció y el número de troza (iniciando por la troza basal). Además, se marcó el norte y el extremo basal de cada troza. La tabla 2 muestra las características dasométricas de cada uno de los árboles de *Pinus tecunumanii* seleccionados.

Tabla 2: Caracterización dasométrica de árboles de *Pinus tecunumanii*

N° de árbol	DAP (cm)	Altura Comercial (m)	Altura Total (m)	UTM	
				X	Y
28	26,7	8,00	27,97	471824	8816405
35	34,7	8,13	22,35	471825	8816399
62	28,4	11,92	22,59	471803	8816428

3.3.3. Procesamiento de trozas y codificación de probetas

La elaboración de probetas se realizó en el aserradero “Postes Wisse S.A.” ubicado en el distrito de Chaclacayo, Lima. Estas se elaboraron siguiendo la Norma Técnica Peruana 251.017:2014, método para determinar la flexión estática. La medula fue descartada, mientras que los listones de 5 x 5 cm adyacentes a la medula fueron destinados a otros estudios. Luego, se elaboraron listones de 2,5 x 2,5 cm de la zona adyacente a la cara externa de los listones de 5 x 5 cm. La disposición transversal de los listones de donde se obtuvieron las probetas se muestra en las figuras 4 y 5.

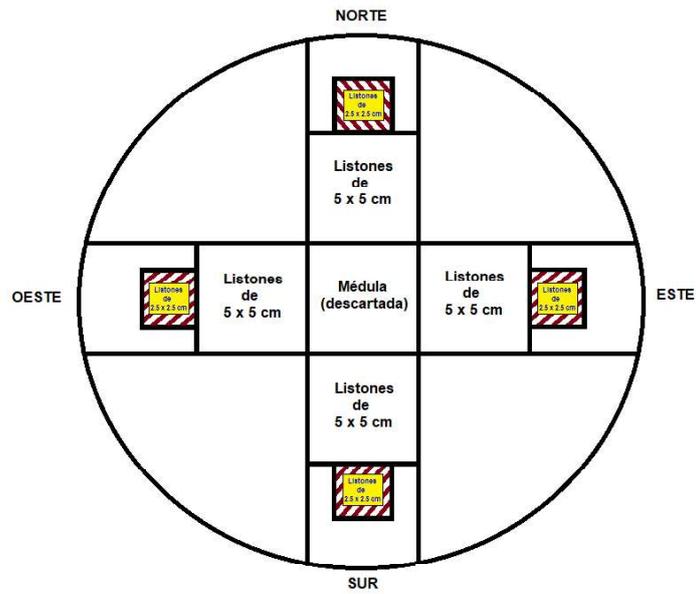


Figura 4. Disposición de listones en vista transversal de una troza

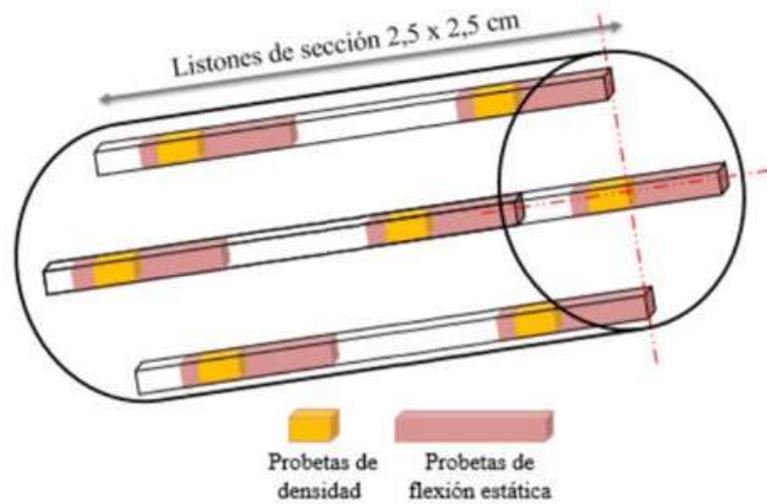


Figura 5. Vista tridimensional de los listones de 2,5 x 2,5 cm en la troza. Fuente: Elaborado en base a Bustamante (2019)

Finalmente, se dimensionó las probetas descartando los nudos. Se obtuvo un total de 201 probetas que fueron codificadas como se aprecia en la figura 6, siguiendo la codificación que se presenta en la tabla 3.

Tabla 3: Codificación empleada para probetas

Item	Codificación
N° Árbol	28, 35, 62
N° Troza*	1, 2, 3, ...
Orientación**	N, S, O, E
Zona	a, b, c, ...

*En el ítem “N° Troza” la codificación 1 corresponde a la troza basal, la 2 a la siguiente y así sucesivamente.

**En el ítem “Zona” la codificación “a” corresponde a la probeta más cercana a la médula y las letras consecutivas van alejándose de ella. En caso de solo haberse obtenido un listón, se omite este valor en la codificación.



Figura 6. Codificación de probetas

3.3.4. Ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos fueron realizados en probetas en condición saturada. Previo a ellos se realizó la medición del espesor y ancho con un vernier digital (Figura 7), los valores se obtuvieron promediando las medidas de los extremos y el centro a lo largo de la probeta. La longitud fue medida con un flexómetro y la masa fue medida con una balanza digital de precisión 0,01g.



Figura 7. Medición de espesor y ancho de probetas

a. Método de propagación de ondas (Microsecond Timer)

De acuerdo con FAKOPP Enterprise (s.f.), el Microsecond Timer mide el tiempo de propagación de una onda longitudinal de 23 KHz (μs) inducida por un impacto en uno de los transductores hasta llegar al otro. Para hallar el MOE dinámico en la cara radial como en la tangencial se procedió de la siguiente manera:

- 1) Se clavó los sensores a 3 cm de los bordes a un ángulo de inclinación $\alpha:45^\circ$ (Figura 8);
- 2) Se efectuó un golpe a través del transductor START;

- 3) Se registró el tiempo (t) en μs que aparece en pantalla;
- 4) Se calculó la velocidad de propagación de ondas con la siguiente ecuación (V):

$$V = \frac{L}{\Delta t}$$

Donde:

- V : Velocidad de propagación de la onda;
- L : Distancia entre los sensores;
- Δt : el tiempo entre la salida y llegada del pulso.

- 5) Se calculó el MOE_{d1} según Acuña et al. (s.f.):

$$MOE_{d1} = v^2 \rho$$

Donde:

- MOE_{d1} : Módulo de elasticidad dinámico por método de emisión acústica;
- v : Velocidad de propagación de la onda;
- ρ : Densidad del material (masa/volumen)



Figura 8. Colocación de los sensores de Microsecond Timer.

b. Método para medición del Módulo de Elasticidad Dinámico en Flexión (MOE_{d2}) usando el método de vibraciones transversales y la transformación rápida de Fourier (FFT)

De acuerdo con FAKOPP Enterprise (2005), este método analiza las vibraciones de sonido mediante la transformación rápida de Fourier que permite estimar el MOE_{d2} . Para hallar el MOE_{d2} se procede de la siguiente manera:

Se posicionó la probeta de ensayo sobre los soportes de caucho. Los soportes se colocarán a 0,22 del largo de la probeta, en cada extremo (9 cm) como se aprecia en la figura 9. Luego, se procede a golpear con el martillo de punta de goma en el centro de la probeta en la cara tangencial. En el software FFT Analyzer se registra el valor del pico que corresponde a la frecuencia (Hz) de vibración en flexión.

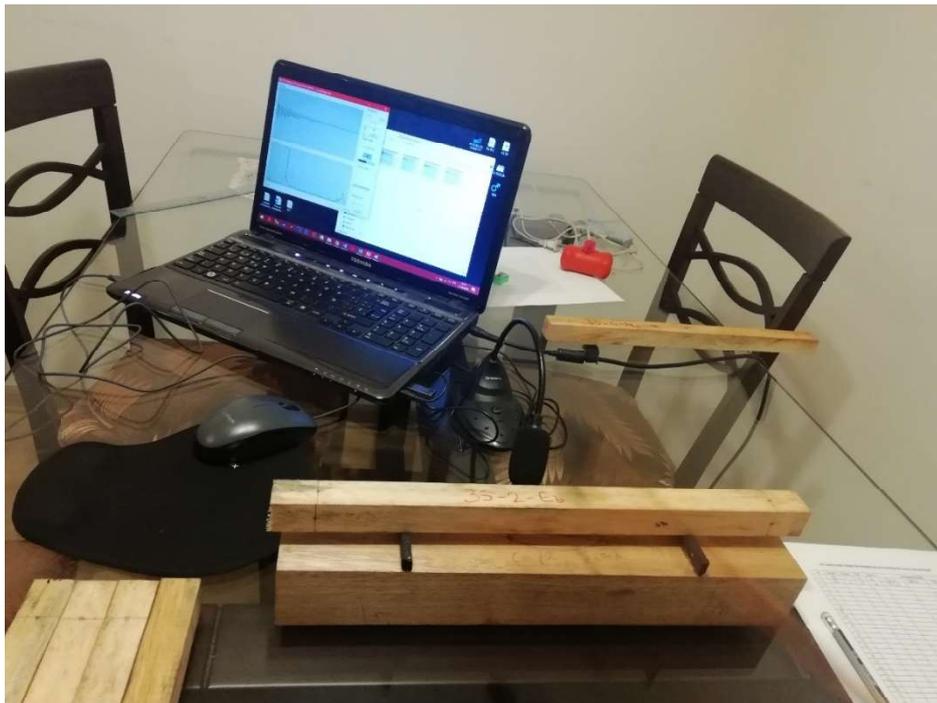


Figura 9. Medición de la frecuencia de vibración en el software FFT Analyzer

Finalmente, siguiendo la metodología empleada por Sucksmith (2009) se determina el MOE_{d2} para cada una de las probetas con la ecuación de Euler mostrada a continuación:

$$MOE_{d2} = \left(\frac{2f_n}{\gamma_n \pi} \right)^2 * \frac{mL^3}{I}$$

Donde:

- f_n es la frecuencia en Hz de vibración en flexión para el modo n;
- $\gamma_n = (n + 0,5)^2$, en este caso n=1, por ende $\gamma_n = 2,267$;
- m es la masa de la probeta en kg;
- L es la longitud de la probeta en m;
- I es el momento de inercia, $I = \frac{ab^3}{12}$, donde a es el ancho y b el espesor de la probeta (ambos en m).

3.3.5. Realización de ensayos destructivos

a. Ensayo de flexión estática

El ensayo de flexión estática se realizó en probetas en condición saturada (CH > 30%), en la prensa universal “Tinius Olsen” de acuerdo con la Norma Técnica Peruana 251.017:2014, “MADERA. Método para determinar la flexión estática” por el método secundario como se aprecia en la figura 10.



Figura 10. Ensayo de flexión estática en prensa universal

El MOE_e en flexión fue determinado empleando la siguiente ecuación:

$$MOE_e = (P'L^3)/(4ae^3Y)$$

Donde:

- MOE_e es el módulo de elasticidad en flexión (kg/cm^2);
- P' es la carga al límite proporcional (kg);
- L es la distancia entre los soportes (cm);
- a es el ancho de la probeta (cm);
- e es el espesor de la probeta (cm);
- Y es la deflexión en el centro de la luz al límite proporcional.

b. Determinación de la densidad y contenido de humedad

La densidad en verde ($CH > 30\%$), densidad básica (DB) y contenido de humedad se determinó en las probetas elaboradas en base al remanente de la realización de los ensayos realizados. Se cortó una probeta de 10 cm de longitud adyacente a la zona de falla conforme a la figura 11.

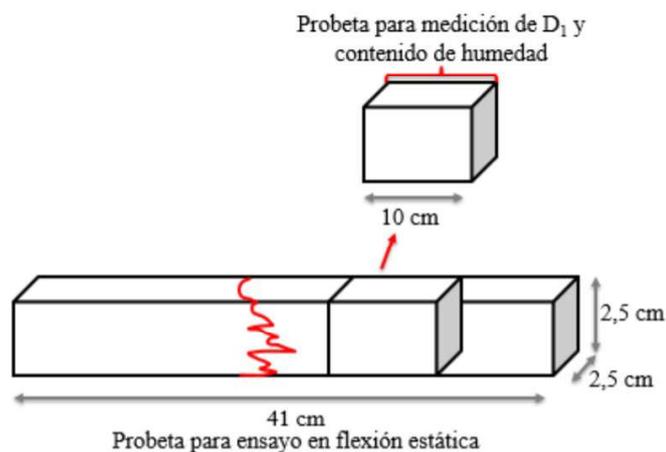


Figura 11. Probeta para determinar densidad y contenido de humedad. Fuente: Bustamante (2019)

La densidad se determinó conforme a la Norma Técnica Peruana 251.011:2014, “MADERA. Método para determinar la densidad” y el contenido de humedad con la metodología descrita en la Norma Técnica Peruana 251.010:2014, “MADERA. Método para determinar el contenido de humedad”.

3.3.6. Procesamiento de datos y evaluación de resultados

Se obtuvieron los estadísticos descriptivos: media, máximo, mínimo y coeficiente de variación para el módulo de elasticidad estático (MOE_e) y el módulo de elasticidad dinámico (MOE_d) para cada uno de los métodos no destructivos.

Se realizó la prueba T-student para muestras independientes entre los MOE_d hallados con el método de propagación de ondas en la cara radial y tangencial para determinar si existe o no diferencia significativa entre las medias.

En vista que se comprobó que no existía diferencia significativa entre las medias de los valores obtenidos en la cara radial y tangencial para el método de propagación de ondas, los análisis predictivos para este método serán trabajados con el promedio de MOE_{d1} .

Finalmente, se realizó un análisis de regresión lineal entre los MOE_d hallado por los métodos no destructivos (método de propagación de ondas y el análisis vibraciones mediante la FFT) con el MOE_e hallado por el método destructivo y se determinó el grado de asociación entre las variables en estudio.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de propiedades físicas por métodos destructivos normalizados se presentan en la tabla 4. La humedad tiene un amplio rango de variación que va de 34,29% hasta 186,21%. La densidad verde también presenta una alta variación que va desde 0,49 a 1,13 g/cm³. La variación en ambos parámetros se debe a que algunas probetas demoraron en ser ensayadas e iban perdiendo humedad; sin embargo; siempre estuvieron por encima del punto de saturación de las fibras: 30% de contenido de humedad.

La densidad básica promedio fue de 0,43 g/cm³ con un mínimo de 0,33 y un máximo de 0,56 g/cm³, valor que va acorde con lo reportado por Gifoni & Teixeira (2002), que obtuvieron una densidad básica de 0,418 g/cm³ en madera de esta especie procedente de Centro América y 0,398 en la procedente de México. Además, es clasificada como madera de densidad media por Arostegui (1982).

Tabla 4: Valores promedio de humedad, densidad verde y densidad básica

	Promedio	Mínimo	Máximo	C.V.*
C.H. (%)	98,91	34,29	186,21	38,01
Densidad verde (g/cm ³)	0,84	0,49	1,13	18,05
DB (g/cm ³)	0,43	0,33	0,56	11,02

*C. V: Coeficiente de variabilidad en %

4.1. Módulo de elasticidad dinámico por el método de propagación de ondas 23 kHz

En la Tabla 5, se presentan los resultados obtenidos por el método de propagación de ondas con Microsecond Timer en probetas en condición saturada. Se puede observar que hay una

diferencia en la cantidad de probetas ensayadas en cada árbol, esto se debe a que la cantidad de probetas obtenida fue proporcional a las dimensiones del árbol.

Tabla 5: Estadísticos descriptivos para MOE_{d1} y Velocidad (Vel) por el método de propagación de ondas en cara tangencial, radial.

Árbol	Parámetro	N° Probetas	Promedio	Mínimo	Máximo	C.V. (%)
28	Vel Tg	34	4245,82	3397,79	4724,14	7,57
	Vel Rd		4303,76	3569,57	4810,55	7,24
	Vel \bar{x}		4274,79	3497,00	4742,38	7,26
	MOE _{d1} Tg		153693	84564	211787	20,43
	MOE _{d1} Rd		158228	87270	240849	21,46
	MOE _{d1} \bar{x}		155961	85917	226318	20,75
35	Vel Tg	109	3992,49	3161,95	5032,65	7,43
	Vel Rd		4000,66	3244,74	4854,33	8,02
	Vel \bar{x}		3996,58	3284,09	4943,49	7,61
	MOE _{d1} Tg		141070	72473	199871	20,36
	MOE _{d1} Rd		141854	70021	209066	21,51
	MOE _{d1} \bar{x}		141462	71944	201325	20,75
62	Vel Tg	58	4145,17	3415,51	4676,81	6,99
	Vel Rd		4195,16	3453,78	4867,59	7,60
	Vel \bar{x}		4170,17	3434,65	4731,37	7,13
	MOE _{d1} Tg		140638	87927	191419	21,05
	MOE _{d1} Rd		144238	80069	202382	21,71
	MOE _{d1} \bar{x}		142438	83998	191202	21,14
Toda la muestra	Vel Tg	201	4079,40	3161,95	5032,65	7,70
	Vel Rd		4108,06	3244,74	4867,59	8,28
	Vel \bar{x}		4093,73	3284,09	4943,49	7,85
	MOE _{d1} Tg		143081	72473	211787	20,74
	MOE _{d1} Rd		145312	70021	240849	21,84
	MOE _{d1} \bar{x}		144196	71944	226318	21,09

*El promedio indica los estadísticos descriptivos de toda la muestra (3 árboles – 121 probetas)

* \bar{x} Promedio de cara radial y tangencial; Tg: cara tangencial; Rd: cara radial; C.V: Coef. de variabilidad.

*MOE_{d1}: MOE dinámico con Microsecond Timer en kg/cm²; Vel: Velocidad de propagación de ondas sonoras en m/s.

Los MOE_{d1} fueron obtenidos empleando la densidad al contenido de humedad en el que se encontraban las probetas (CH>30%), cabe mencionar que estos resultados presentan aproximadamente un 5% de error atribuido al equipo Microsecond Timer. Los MOE_{d1} se encuentran en el rango encontrado por Caballé et al. (2020) para otra especie del género

Pinus. Las medias de los MOE_{d1} en todos los casos fueron superiores a la media hallada por Caballé et al. (2020), que fue de 114208 kg/cm² en *Pinus Ponderosa* y por Mata (2011), que fue de 122355 kg/cm² en *Pinus sylvestris*. Esto es atribuido a la especie, la calidad de sitio y edad de los árboles.

La figura 12 muestra el diagrama de cajas de los MOE_{d1} . Este ensayo fue realizado en la cara radial y tangencial de la probeta. En el gráfico se aprecia que los datos obtenidos en ambas caras y sus respectivas medias son similares.

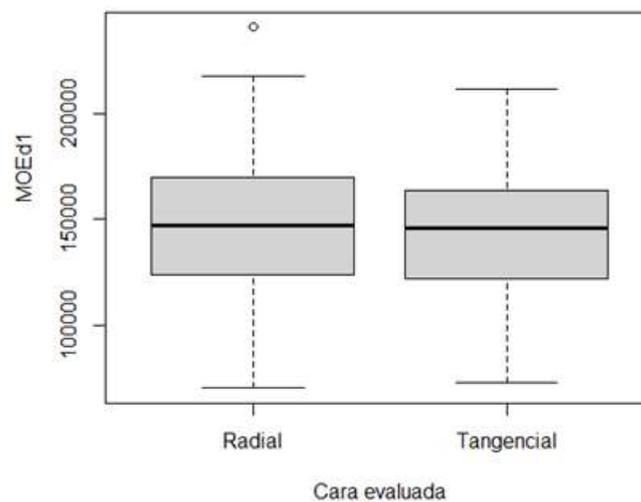


Figura 12. Diagrama de cajas del MOE_{d1} en cara radial y tangencial

Para comprobar estadísticamente que no existe diferencia significativa entre las medias de las caras radiales y tangenciales se realizó la prueba T-Student (Anexo 6). Puesto que el valor del estadístico T fue de 0,55 y se encuentra en el rango de los valores críticos -1,99 y 1,99, se puede afirmar que no existe diferencia estadísticamente significativa entre la media de MOE_{d1} en la cara radial y tangencial con 95% de confianza. Esto posiblemente debido a que independientemente de la cara en la que se coloquen los sensores, las ondas de ultrasonido se propagarán por la madera en dirección longitudinal.

Dada la gran similitud entre los parámetros estadísticos en caras tangenciales y tangenciales; tanto en la velocidad como en MOE_{d1} en la cara tangencial y radial; y a las pruebas estadísticas mencionadas se trabajó con los promedios en los análisis de regresión.

Las velocidades obtenidas en todos los casos fueron inferiores a los valores dados por Niemz et al. (1994), quien mencionó velocidades que van desde 4706 m/s a 5036 m/s en coníferas. Ello debido a que la especie estudiada tiene menor densidad básica y fue evaluada a un contenido de humedad saturado ($CH > 30\%$). Esto concuerda con Fathi et al. (2020) que mencionan que tanto el MOE_{d1} como el MOE_e sufren variaciones debido que el carácter viscoelástico de la madera se acentúa más, a mayores contenidos de humedad.

Los coeficientes de variabilidad (C.V.) son mayores en los MOE_{d1} en comparación con las velocidades. Esto es atribuido a que en la fórmula para estimar MOE_{d1} la velocidad es elevada al cuadrado, lo cual aumenta la variabilidad de los datos respecto a la media. La dispersión en los datos también podría explicarse por la variación en las densidades, explicada a su vez por el amplio rango de contenido de humedad de las probetas. Los C.V. de los MOE_{d1} resultaron superiores a los obtenidos por Mata (2011), que obtuvo un C.V. 11,4%; Los C.V. de las velocidades resultaron superiores al hallado por Montero (2013), que obtuvo un C.V. de 5,6%, ambos en *Pinus sylvestris* L.

4.2. Módulo de elasticidad dinámico por el método de vibraciones transversales y Fast Fourier Transform (FFT)

El módulo de elasticidad por el método de vibración transversal se estimó en base a las frecuencias de resonancia de las probetas empleando el gráfico proporcionado por el programa FFT analyzer; el cual permite visualizar las frecuencias de vibración en forma de picos. Al vibrar la muestra en el modo fundamental (modo N° 1), el programa registra un pico como se muestra en la parte inferior de la figura 13, donde además se visualiza la frecuencia en el margen derecho.

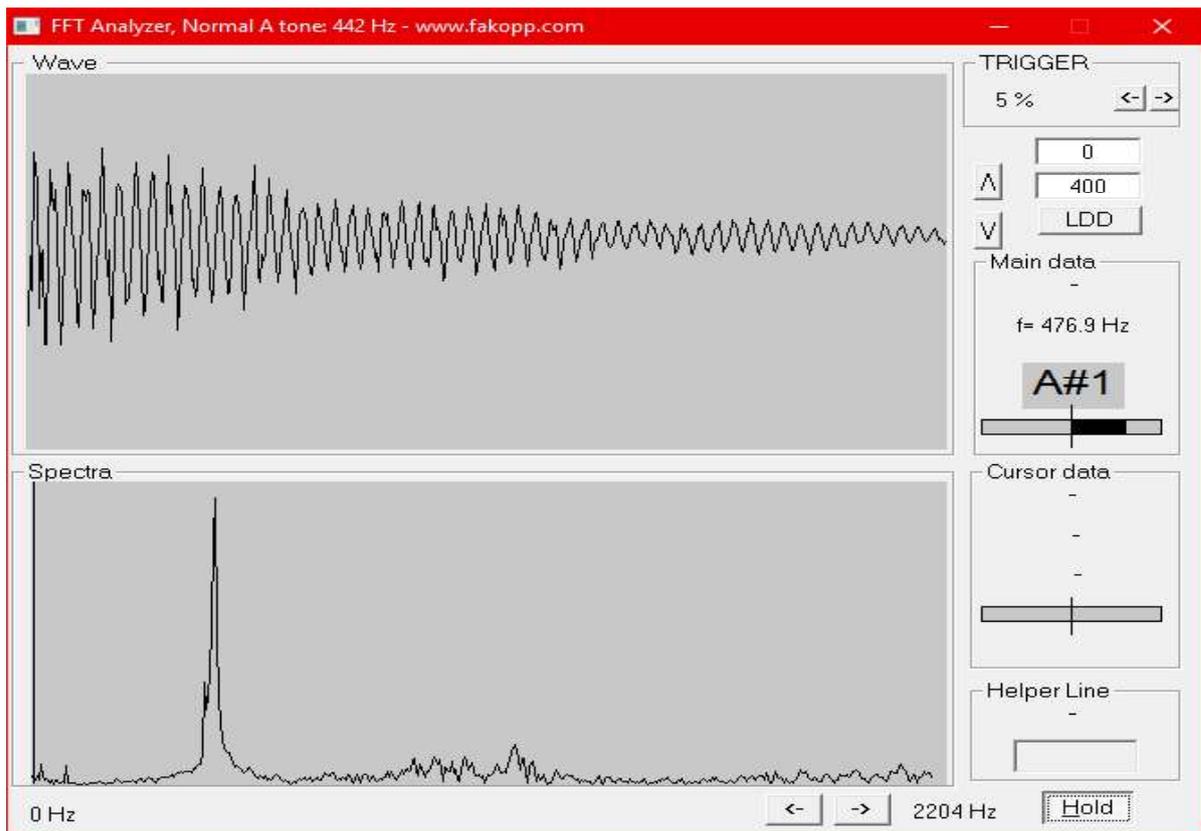


Figura 13. Ensayo FFT analyzer de una probeta

La tabla 6 muestra los estadísticos descriptivos para la frecuencia y el MOE_{d2} por el método de vibración transversal en probetas en condición saturada. Se observa que los promedios de MOE_{d2} y de frecuencias de vibración son bastante cercanos entre los 3 árboles. El MOE_{d2} resultó superior al hallado por Montón (2012), quien obtuvo un MOE_{d2} de 102073 kg/cm^2 en *Pinus radiata*. Esta diferencia puede ser atribuida a la especie y al contenido de humedad, ya que el autor trabajó con probetas entre 10% y 12% de humedad. En cuanto a los C.V. del MOE_{d2} promedio resultó ser inferior al obtenido por el mismo autor que obtuvo un C.V. de 24,10%. Además, en los ensayos de *Pinus tecunumanii* el C.V. en todos los casos es mayor en el MOE_{d2} en comparación con las frecuencias, esto se debe a que para obtener el MOE_{d2} la frecuencia es elevada al cuadrado incrementando la diferencia de los datos respecto a la media.

Tabla 6: Estadísticos descriptivos para Frecuencia y MOE_{d2} por el método de vibraciones transversales

Árbol	Parámetro	N° probetas	Promedio	Mínimo	Máximo	C.V. (%)
28	Frecuencia	34	558	408	663	11,54
	MOE _{d2}		109042	64600	159081	20,72
35	Frecuencia	109	529	402	665	10,26
	MOE _{d2}		103790	52396	155051	22,03
62	Frecuencia	58	543	438	674	10,21
	MOE _{d2}		98375	57155	129488	19,58
Toda la muestra	Frecuencia	201	538	402	674	10,61
	MOE _{d2}		103116	52396	159081	21,30

*MOE_{d2}: Modulo de elasticidad dinámico por el método de vibración transversal en kg/cm²; C.V: Coeficiente de variabilidad.

*La frecuencia se encuentra en Hz.

Montero (2013) obtuvo frecuencias promedio de 39 y 55 Hz en vigas de *Pinus sylvestris* de dimensiones 150 x 200 x 4000 mm; valores muy inferiores a las obtenidas en *Pinus tecunumanii*, esta variación es atribuida a las dimensiones de la pieza de madera ensayada, principalmente a la longitud de la probeta que hace que la frecuencia sea menor, pues la ecuación de Euler, utilizada por Sucksmith (2019), se incorpora exponencialmente a las dimensiones de la pieza ensayada. Es por esta razón, la diferencia en los MOE_{d2} no es amplia, ya que Montero (2013) obtuvo 99025 kg/cm² en la cara tangencial y 104123 kg/cm² en la cara radial y estos valores son solo ligeramente superiores al obtenido en *Pinus tecunumanii*. De esta manera, la frecuencia en las vigas ensayadas por Montero (2013) es menor, para compensar sus dimensiones superiores respecto a las probetas ensayadas de *Pinus tecunumanii*.

4.3. Módulo de elasticidad estático por el método destructivo

En la tabla 7 se presentan los promedios de la evaluación en flexión por el método destructivo en probetas en condición saturada. Se obtuvo un MOE_e promedio general 89027 kg/cm²; siendo el valor mínimo de 43840 kg/cm² y el máximo 140971 kg/cm². La diferencia entre los promedios de MOE_e de los árboles es bastante pequeña en comparación con la media general y muy cercanos a 92611 kg/cm², valor obtenido por Mata (2011) en *Pinus sylvestris* L. Además, Trianoski (2014), reporta un MOE_e de 91193 kg/cm² para *Pinus tecunumanii*; resultado muy similar al obtenido en el presente estudio.

Tabla 7: Estadísticos descriptivos de MOE_e y contenido de humedad por el método destructivo

Árbol	N° probetas	MOE _e				Contenido de Humedad (%)			
		Prom.	Min.	Max.	C.V.	Prom.	Min.	Max.	C.V.
28	34	92130	43840	135086	21,89	110,39	37,84	182,14	38,97
35	109	89956	47832	140971	22,81	95,46	34,29	155,88	32,70
62	58	85462	51786	122170	17,12	98,66	34,33	186,21	44,92
Toda la muestra	201	89027	43840	140971	21,29	98,91	34,29	186,21	38,01

*MOE_e: Modulo de elasticidad estático por el método destructivo en kg/cm²; C.V: Coeficiente de variabilidad en %.

La media del MOE_e fue 89027 kg/cm² y con un coeficiente de variabilidad de 21,29%. La variación del MOE_e puede ser explicada por el amplio rango de contenido de humedad en el que se encontraban las probetas ensayadas, que va de 34,29% a 186,21% y el C.V. del contenido de humedad que fue de 38,01%.

Lo anterior corrobora lo mencionado por Fathi et al. (2020), quienes indican que el MOE_e disminuye al incrementarse el contenido de humedad incluso por encima del punto de saturación de las fibras.

4.4. Comparación entre distintos métodos

En la tabla 8 se observa que los valores de MOE para los métodos no destructivos son mayores que en el destructivo, patrón también reportado por Ramos & Cuellar (2018). El factor que puede explicar este fenómeno es el comportamiento viscoelástico de la madera conforme lo mencionan Sotomayor y Villaseñor (2006). Asimismo, indicar que los coeficientes de variabilidad son similares en los tres métodos evaluados. Pero en el MOE_{d1} el C.V. resultó ser superior a los hallados por Mata (2011), que obtuvo un C.V. 11,4% y Montero (2013), que obtuvo un C.V. de 5,6%, ambos en probetas de *Pinus sylvestris* L. Mientras que el C.V. del MOE_{d2} resultó ser inferior al hallado por Montón (2012) que obtuvo 24,10% en probetas de *Pinus radiata*.

Tabla 8: Estadísticos descriptivos para MOE_d por métodos no destructivos y MOE_e por método destructivo

	Promedio	Mínimo	Máximo	C.V. (%)
MOE _e (kg/cm ²)	89027	43840	140971	21,29
MOE _{d1} (kg/cm ²)	144196	71944	226318	20,95
MOE _{d2} (kg/cm ²)	103116	52396	159081	21,30

*MOE_e: MOE estático hallado por método destructivo; MOE_{d1}: MOE dinámico hallado con equipo Microsecond timer; MOE_{d2}: MOE dinámico hallado por FFT; C.V: Coeficiente de variabilidad.

La figura 14 muestra el grafico de cajas de los MOE por los tres métodos empleados. Se observa una variación entre ellos; siendo el método de vibraciones transversales el más aproximado al destructivo. Asimismo, el MOE_{d1} y el MOE_{d2} son superiores al MOE_e por lo explicado en el párrafo anterior.

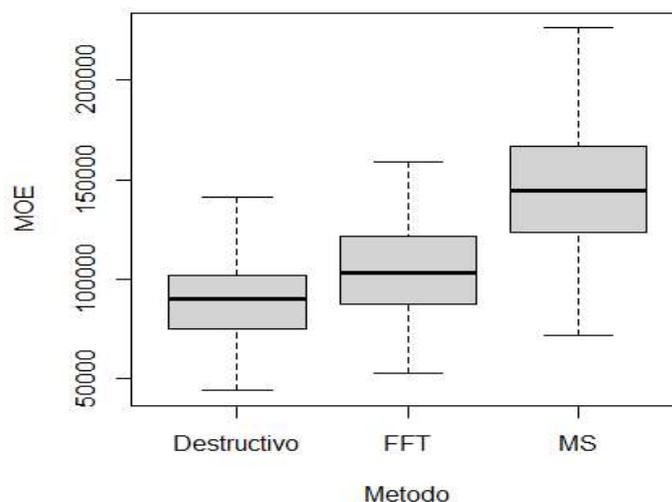


Figura 14. Diagrama de cajas del MOE destructivo (MOE_e), MOE empleando la FFT (MOE_{d2}) y el MOE empleando el Microsecond timer (MOE_{d1})

Para la comprobación estadística de lo mencionado anteriormente se realizó la prueba de ANOVA (Anexo 7); obteniéndose que existen diferencias estadísticas significativas entre la media de los MOE entre un método y otro, al 95% de confianza. Asimismo, para determinar

que medias son diferentes de otras, se realizó la prueba de Tukey (Anexo 8) obteniéndose que los tres métodos muestran diferencias significativas entre si con un 95% de confianza.

4.5. Regresión lineal simple Velocidad de propagación de ondas – MOE_e

En los anexos 9 se muestran las pruebas complementarias para los análisis de regresión: análisis de residuales y de coeficientes de regresión. La figura 15 muestra la dispersión de valores entre la velocidad de propagación de ondas en m/s y el MOE_e en kg/cm². Se obtuvo el siguiente modelo de regresión: $MOE_e = 40,309 * Vel - 75988$, donde el $F = 17,08$ (p-valor = $2,2 \times 10^{-16}$) y el R^2 fue 0,47; indicando que el 47% de la variación del MOE_e es explicado por el modelo en mención; sin embargo, debe resaltarse que en la relación para calcular el MOE_{d1} también se utiliza la densidad, la cual no es tomada en cuenta en este modelo de regresión, y siendo variable entre probetas podría explicar la baja correlación entre estas variables.

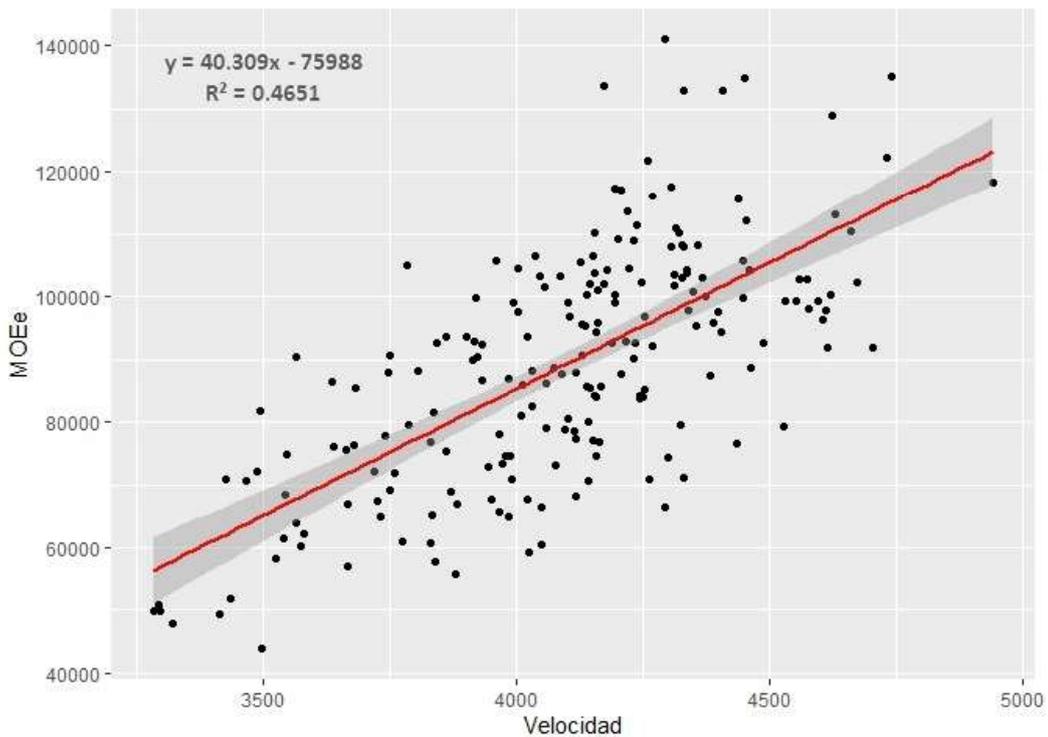


Figura 15. Diagrama de dispersión y regresión lineal simple entre velocidad de propagación de ondas con el Microsecond timer y el MOE_e

4.6. Regresión lineal simple MOE_{d1} – MOE_e

La figura 16 muestra la dispersión de valores entre el MOE_{d1} y el MOE_e en kg/cm^2 , donde se obtuvo el siguiente modelo de regresión: $MOE_e = 0,4834MOE_{d1} + 19322$, con un $F = 296,7$ (p -valor = $2,2 \times 10^{-16}$) y un R^2 fue de 0,60, lo cual indica que el 60% de la variación del MOE_e es explicado el MOE_{d1} . Este modelo de regresión presenta mayor confiabilidad que el modelo anterior para estimar el MOE_e ; pues en el cálculo de este MOE_{d1} se utiliza la densidad.

El R^2 obtenido es mayor a los reportados por Hernandez (2017) en *Pinus sylvestris*, cuyos R^2 van desde 0,35 a 0,46, que incluye ancho de los anillos de crecimiento. Asimismo, Acuña et al (s.f.) obtuvieron un valor de R^2 de 0,70 en vigas de *Pinus sylvestris* que incluyo el peso específico como otra variable independiente; en tanto, Montero (2013) obtuvo un R^2 de 0,46 para vigas de la misma especie, cabe mencionar, que las vigas son de mayores dimensiones y suelen contener defectos.

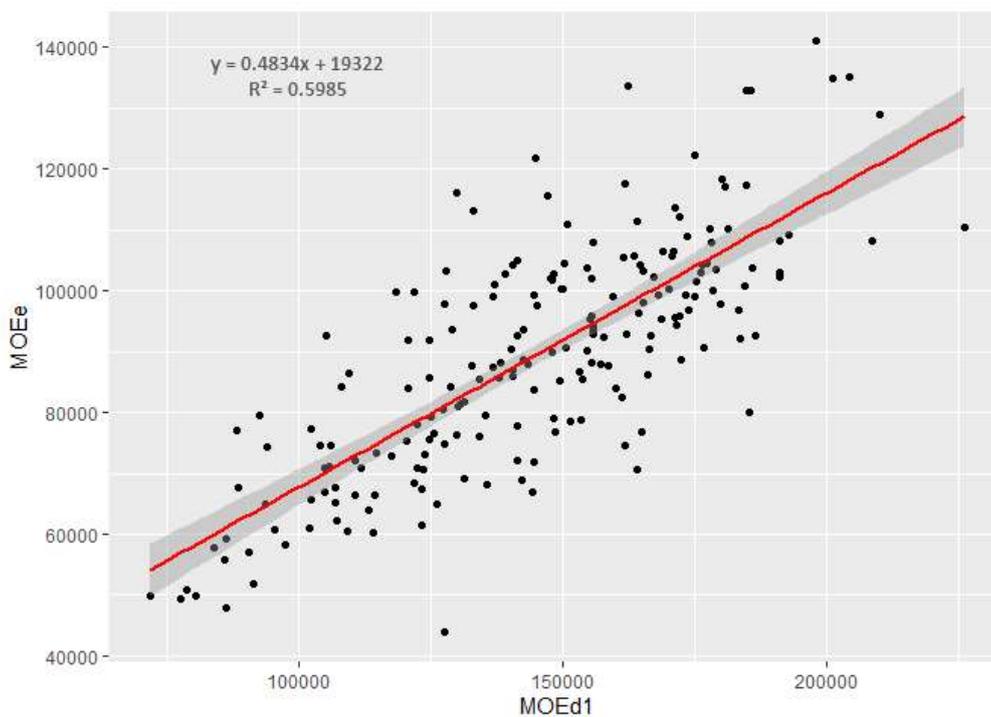


Figura 16. Diagrama dispersión y regresión lineal simple entre el MOE_{d1} y el MOE_e

Otros autores como Manavella et al. (2019), França et al. (2019), Hermoso (2007), Mata (2011) y AIDIMME (2019) obtuvieron modelos con valores de R^2 superiores al obtenido empleando solo al MOE_{d1} como variable independiente; precisando que la humedad utilizada por los autores mencionados fue de 10 a 12%.

4.7. Regresión lineal simple MOE_{d2} – MOE_e

En la figura 17 se presenta la dispersión de valores entre el MOE_{d2} y el MOE_e en kg/cm^2 , de donde se obtiene el siguiente modelo: $MOE_e = 0,7782MOE_{d2} + 8783,4$ con un $F = 864,97$ ($2,2 \times 10^{-16}$) y un R^2 de 0,81, indicando que el 81% de la variación del MOE_e es explicada por la regresión en mención, siendo el mejor de los cuatro modelos obtenidos en el presente trabajo. Autores como Videla (2015), AIDIMME (2019), Manavella (2019) y França (2019) obtuvieron valores similares de R^2 entre 0,77 y 0,87, evidenciando la buena relación entre estas variables.

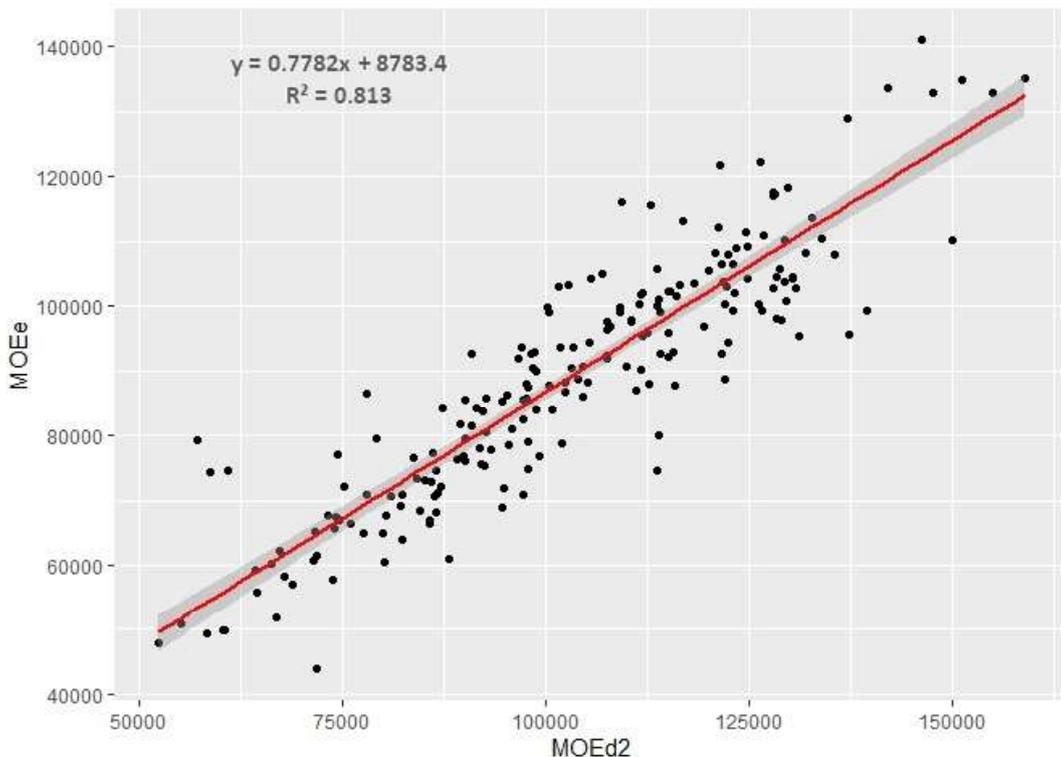


Figura 17. Diagrama dispersión y regresión lineal simple entre el MOE_{d2} y el MOE_e

Además, AIDIMME (2019) y Manavella (2019), trabajando ambos métodos, encontraron que el modelo empleando MOE_{d2} por vibraciones transversales obtuvieron mayor R^2 , que va acorde con los resultados obtenidos en *Pinus tecunumanii*. La buena relación entre las variables puede deberse a que el MOE_{d2} , tiene en cuenta de manera indirecta factores como la masa, la longitud y el momento de inercia de la probeta, empleados en la transformación para encontrar el MOE_{d2} . Se observa que la dispersión de valores se asemeja mucho a un modelo lineal; por tanto, para esta especie y en estas condiciones resulta el mejor método para estimar el módulo de elasticidad en flexión (MOE_e).

V. CONCLUSIONES

- El módulo de elasticidad dinámico en condición saturada empleando el método de velocidad de propagación de ondas (MOE_{d1}) con el microsecond timer es de 144196 kg/cm² y el obtenido por el método de modos de vibraciones transversales (MOE_{d2}) es de 103116 kg/cm².
- El módulo de elasticidad estático (MOE_e) en condición saturada por el método destructivo fue de 89027 kg/cm².
- El MOE_{d1} permite obtener un modelo para estimar el MOE_e con un R^2 de 0,60; en tanto, MOE_{d2} permite obtener un modelo para estimar el MOE_e con un R^2 de 0,81.
- El modelo hallado con el método de vibraciones transversales (MOE_{d2}) empleando la Fast Fourier Transform (FFT), resulto ser el mejor para estimar el módulo de elasticidad estático (MOE_e).

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar la caracterización anatómica junto a las pruebas de flexión estática, de manera que se pueda identificar su influencia en las evaluaciones no destructivas.
- Realizar estudios de la plantación con mayor tamaño de muestra y evaluar el comportamiento de la madera en función a la edad.
- Realizar estudios en probetas acondicionadas al 12% de humedad para evitar la variación de la propagación de ondas debido al contenido de humedad.
- Utilizar otros métodos y/o equipos que permitan determinar la velocidad de propagación de ondas sonoras y el método de resonancia en árboles en pie y en trozas para validar su efectividad.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, L., Llorente, A., Herrera, C., Casado, M. (s.f.). Clasificación de la madera *Pinus sylvestris* L. Mediante ensayos no destructivos. Recuperado de http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/download/15977/15820
- Acuña, L.; Díez, M.; Casado, M. (2006). Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural, aplicación a *Pinus pinaster* Ait.
- AIDIMME. (2019). Desarrollo de una metodología para evaluación no destructiva de madera estructural y aplicación innovadora a rehabilitación. Recuperado de http://intranet.aidimme.es/acceso_externo/difusion_proyectos/adjuntos_resultados/E8_6_MENDME_IMDEEA_2018_2_AIDIMME_2018.pdf
- Arroyo, J. (1983). Propiedades Físico – Mecánicas de la Madera. Mérida, Venezuela. Oficina de Publicaciones – Universidad de los Andes.
- Ashby, M. (1999) Materials selection in mechanical desing. 2a Ed. Butter-woth-Heinemann, Gran Bretaña
- Bucur, V. (1995). Acoustic of wood. New York, Estados Unidos: CRC Press.
- Berríos, P. (2007). Efecto Residual de los Fertilizantes Orgánicos e Inorgánicos y Enraizadores en una plantación de *Pinus Tecunumanii* (Schw.) en la época Seca en Oxapampa. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima.
- Bustamante, E. (2019). Validación de un método no destructivo para medir el módulo de elasticidad en trozas de *Calycophyllum spruceanum* de una plantación de Ucayali – Perú. (Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria la Molina). Recuperada de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3875/bustamante-orellana-elizabeth-lucia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Caballé, G., Martínez, A., Díez, J., Letourneau, F. (2020). ¿Dónde está la madera estructural? Estudio de caso en Pino ponderosa. Recuperado de https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/80158/mod_resource/content/1/D%

- C3%B3nde%20est%C3%A1%20la%20madera%20estructural%20-%20Caball%C3%A9.pdf
- Campos, C. (2015). Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore; Cobán, Alta Verapaz. (Tesis de licenciatura, Universidad Rafael Landívar, Guatemala). Recuperado de <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjcem/2015/06/22/Campos-Christian.pdf>
- Carnero, P. (2007). Determinación preliminar del Módulo de elasticidad mediante el empleo de técnicas no destructivas para maderas tropicales peruanas (Trabajo de fin de grado, Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú).
- CATIE. (2000). Manejo de semillas de 100 especies forestales de América Latina [Versión Dx. Reader]. Recuperado de <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/2959?show=full>
- CATIE. (2003). Árboles de Centroamérica: Un Manual para Extensionistas [Versión Dx. Reader]. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/328404988/Libro-CATIE>.
- Chan, M. (2002). Los defectos naturales en la madera aserrada. *Ingeniería Revista Académica*. 6(001): 29-38.
- Claros, J., Baltazar, H., Trujillo, F., Araujo, M. (2017). Durabilidad natural de la madera de *Pinus oocarpa* y *Pinus tecunumanii* proveniente de plantaciones forestales en San Alberto, Oxapampa. *Revista Forestal del Perú*, 32(2): 70-77. doi: <http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v32i2.1038>
- Davalos, R., Ordoñez, V. (2010). Influencia de los nudos sobre la resistencia en flexión estática en madera de tamaño estructural. *Revista mexicana de ciencias forestales*. ISSN 2007-1132. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322011000500004
- Divos, F., Denes, L., Iñiguez, G. (2005) Effect of cross-sectional change of a board specimen on stress wave velocity determination. *Holzforschung*. Publicación anticipada en línea. doi: 10.1515/HF.2005.036
- Evangelista, F., Afanador, N. (2016). Un enfoque de polinomio de expansión de caos al análisis de la incerteza en elementos estructurales visco elásticos. *Dyna*. Publicación anticipada en línea. doi <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n199.53834>
- FAKOPP Enterprise. (s.f.). FAKOPP Microsecond Timer User´s Guide. Recuperado de https://fakopp.com/docs/products/mstimer/Fakopp_MT_Guide.pdf

- FAKOPP Enterprise. (2005). Fast Fourier Vibration analyzer: User's Guide. HU. Fakopp Enterprise publication.
- Falfán, M. (2011). Madera de reacción en canelo (*Drimys winteri*). (Tesis de licenciatura) Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Fathi, H., Kazemirad, S., Nasir, V. (2020). Lamb wave propagation method for non-destructive characterization of the elastic properties of wood. Publicación anticipada en línea. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107565>
- França, F., Amorim, T., Seale, R. (2019). Evaluación no destructiva de madera de pino amarillo con métodos de vibración. Recuperado de https://asorarevista.com.ar/modules/mod_flipbook_7/tmpl/book.html#p=62
- Gallo, J. (2014). Estudio comparativo de dos técnicas de secado natural de la especie *Pinus tecunumanii* Eguiluz & Perry en la ciudad de Villa Rica. (Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María). Recuperado de <http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/596/T.FRS-197.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- García, H. (2017). Propiedades mecánicas del Ulcumano (*Retrophyllum rospigliosii*) procedente de una plantación de 32 años de edad asociado a cultivo de café en Villa Rica – Perú (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima.
- Gifoni, V., Teixeira, A. (2002). Variabilidade genética na densidade básica da madeira de *Pinus tecunumanii* procedente do México e da América Central, no cerrado, 60, 104-113. Recuperado de <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr62/cap09.pdf>
- Gimenez, A., Moglia, J., Hernandez, P., Gerez, R. 2005. Anatomía de madera. [versión Dx. Reader]. Recuperado de <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/sd-1-anatomia-de-madera.pdf>
- Guariguata, M., Arce, J., Ammour, T., Capella, J. (2017). Las plantaciones forestales en Perú, reflexiones, estatus actual y perspectivas a futuro. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/317021930>
- Goche, J., Fuentes, M., Borja, A., Ramírez, H. (2000) Variación de las propiedades físicas de la madera en un árbol de *Abies religiosa* y de *Pinus ayacahuite var. veitchii*. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 6(1): 83-92. Recuperado de <https://revistas.chapingo.mx/forestales/phpscript/download.php?file=completo&id=N>
TU2

- Hermoso, E., Fernández-Golfín, J., Díez, M., Mier, R. (2007). Aplicación de los ultrasonidos a la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera en rollo de pequeño diámetro, 59(506), 87-95. Recuperado de <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/download/511/586>
- Iñiguez, G. (2007). Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid). Recuperado de http://oa.upm.es/415/1/Francisco_Iniguez_Gonzalez.pdf
- Jacques, D., Marchal, M., Curnel, Y. (2004). Relative efficiency of alternative methods to evaluate wood stiffness in the frame of hybrid larch (*Larix × eurolepis* Henry) clonal selection. *Annals of Forest Science*. 61(1):35-43. Publicación anticipada en línea. DOI: 10.1051/forest:2003082
- Lasserre, J., Mason, E., W, Michael. (2004). The influence of initial stocking on corewood stiffness in a clonal experiment of 11-year-old *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry*. 44(2):18-23. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/261135508_The_influence_of_initial_stocking_on_corewood_stiffness_in_a_clonal_experiment_of_11-year-old_Pinus_radiata_DDon
- León, W. & Espinoza, N. (2001). Anatomía de la madera. [Versión Dx. Reader]. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/306102766/Anatomia-de-la-madera-Leon-Espinoza-de-Pernia-2001>
- Malhotra, V. & Cariño, N. (2004). Handbook on nondestructive testing of concrete. [Versión Dx. Reader]. Recuperado de <https://www.passeidireto.com/lista/79310476-tecnologia-de-la-madera/archivo/55142795-livro-completo-malhotra-carino-handbook-on-non-destructive-testing-of-concrete>
- Manavella, R., Guillaumet, A., Filippetti, M., Meyer, L. (2019) Determinación del módulo de elasticidad por ultrasonido y vibraciones en vigas de pino ponderosa. Recuperado de http://www.clem2019.uy/admin/files/clem2019/upload/files/F3-4620112-CLEM-2019_Roberto_Manavella-Final.pdf
- Mata, J. (2011). Influencia de la humedad de la madera en la evaluación de las propiedades mecánicas del pino silvestre mediante técnicas no destructivas. (Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica de Madrid). Recuperado de https://oa.upm.es/36492/1/PFC_JAIME_DE_LA_MATA_JIMENEZ.pdf

- Montero, M. (2013). Clasificación de madera estructural de gran escuadría de *Pinus sylvestris* L. mediante métodos no destructivos. (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid) Recuperada de https://oa.upm.es/15201/1/MARIA_JOSE_MONTERO_GARCIA_ANDRADE.pdf
- Montón, J. (2012). Clasificación estructural de la madera de *Pinus radiata* D. Don procedente de Cataluña mediante métodos no destructivos y su aplicabilidad en la diagnosis estructural. (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña). Recuperada de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/96423/TJLM1de3.pdf?sequence=1>
- Mora, C., Schimleck, L., Isik, F., Mahon, J., Clark, A., Daniels, R. (2009). Relationships between acoustic variables and different measures of stiffness in standing *Pinus taeda* trees. Publicación anticipada en línea. doi: 10.1139/X09-062
- Navia, F. (2006). Comportamiento del módulo de elasticidad en madera juvenil de *Pinus radiata* D. Don en tres condiciones de sitio. (Tesis de licenciatura, Universidad Austral de Chile). Recuperada de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/fifn325c/doc/fifn325c.pdf>
- Niemz, P., Aguilera, A., Roller, A. (1994). Velocidad de propagación del sonido en algunas especies creciendo en Chile y su relación con propiedades físicas. Publicación anticipada en línea. doi: 10.4206/bosque.1994.v152-08
- NTP (Normas Técnicas Peruanas). (2012). Selección y colección de muestras. NTP 251.008:1980. (Revisada el 2012). Lima, Perú.
- NTP (Normas Técnicas Peruanas). (2014). Método para determinar la densidad. NTP 251.011.2014. Lima, Perú.
- NTP (Normas Técnicas Peruanas). (2014). Método para determinar la flexión estática. NTP 251.017.2014. Lima, Perú.
- NTP (Normas Técnicas Peruanas). (2014). Método para determinar el contenido de humedad. NTP 251.010.2014. Lima, Perú.
- Ordoñez, R. (2002). Evaluación de las Propiedades Físico – Mecánicas de la especie Carahuasca (*Guatteria elata* R.E. Fries) proveniente de plantaciones de Jenaro Herrera. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima.
- Patiño, F. (2002). Propiedades físico – mecánicas de *Simarouba amara* Aubl. (Marupa) proveniente de plantaciones de diferentes edades. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima.

- Pérez, A., Castro, R., Ohta, S. (2000). Ensayos de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos. Recuperado de https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=562
- Quispe, A. (2015). Semillas de *Pinus tecunumanii* “Pino Rojo”. Recuperado de http://arborizaciones.com/pluginfile.php/211/mod_folder/content/0/Pinus%20tecunumanii%20Eguiluz.pdf?forcedownload=1
- Ramírez, M., Valenzuela, L., Díaz, C. (2001). Propiedades mecánicas en flexión de la madera de *Pinus radiata*, creciendo en un sistema silvopastoral. Maderas. Ciencia y tecnología. 3(1-2):35-43. Recuperado de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2001000100004
- Ramos, H., Cuellar, J. (2018). Módulo de elasticidad de *Cedrelinga Cateniformis* d. de plantaciones empleando técnicas no destructivas. Revista Forestal Venezolana, 62(1): 59-68.
- Raquelé, T. (2004). Estudio de propiedades mecánicas de peças roliças de Eucalipto citriodora utilizando a técnica de ultra-som. (Tesis de licenciatura, Universidade de São Paulo) recuperado de: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-23102005-191431/publico/distatiana.pdf>
- Ross, R., Pellerin, R. (1994). Nondestructive testing for assessing wood members in structures. United States Department of Agriculture. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/238098392_Nondestructive_Nondestructive_Testing_for_Assessing_Testing_for_Assessing_Wood_Members_in_Wood_Members_in_Structures_Structures_A_Review_A_Review
- Rustom, A. (2012). Estadística descriptiva, probabilidad e inferencia. Una visión conceptual y aplicada. Recuperado de https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120284/Rustom_Antonio_Estadistica_descriptiva.pdf
- Soto, I., Valenzuela, L., & Lasserre, J. (2012). Efecto de la densidad de plantación inicial en el módulo de elasticidad dinámico de árboles en pie y trozas de una plantación de pino radiata de 28 años, en la zona de Arenales, Chile. Maderas ciencia y tecnología. 14(2): 209-224, 2012. doi: 10.4067/S0718-221X2012000200008
- Sotomayor, J. (2015). Comportamiento elástico de la madera. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Javier-Ramon-Sotomayor-Castellanos-2/publication/279551792_Comportamiento_elastico_de_la_madera/links/5596c48d08ae5d8f39328a29/Comportamiento-elastico-de-la-madera.pdf

- Sotomayor, J., Villaseñor, J. (2006). Comportamiento viscoelástico de la madera de *Prosopis* sp. *Madera y Bosques*, 12(2): 3-15
- Sucksmith, K. (2009). Evaluación del módulo de elasticidad por métodos no destructivos en la Madera *Cedrelinga cateniformis* Ducke proveniente de plantaciones del Bosque Nacional Alexander Von Humboldt. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima.
- Toro, M., Velásquez, J. (2005). Aplicaciones del ultrasonido en la evaluación no destructiva de la madera. *Copernico - Revista Arbitrada Interdisciplinaria*. 2(3), 273 – 282. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/258208568_Aplicaciones_del_ultrasonido_en_la_evaluacion_no_destruktiva_de_la_madera
- Trianoski, R., Monteiro, J., Iwakiri, S., Guilherme, J. (2014). Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de especies de *Pinus* tropicais. Recuperado de <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr101/cap02.pdf>
- TROPICOS (Tropical Missouri Botanical Garden). (13 de enero de 2020). *Pinus tecunumanii* F. Schwerdtf. ex Eguiluz & J.P. Perry. Recuperado de <https://www.tropicos.org/Name/24900830>
- Vásquez, A. (2003). La calidad de la madera y sus aplicaciones. [Versión Dx. Reader]. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/75281/angelamariavasquezcorrea.2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Videla, F. (2015) Determinación de módulos de elasticidad de madera para paneles CLT por métodos mecánicos y dinámicos. (Tesis de licenciatura, Universidad del Bio-Bio) Recuperado de http://repopib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/984/1/Videla_QUIJ%C3%B3n_Felipe_Antonio.pdf
- Vignote, S., Martínez, I. (2006). Tecnología de la Madera. 3rd Edición. Recuperado de <https://tecnologi.files.wordpress.com/2016/03/madera.pdf>
- Vignote, S., Martínez, I., Villasante, A. (2013). Silvicultura y calidad de madera. Recuperado de <http://oa.upm.es/21580/1/SiLVITCALIDADMADERA.pdf>
- Wang, X., Ross, R., McClellan, M., Barbour, R., Erickson, J., Forsman, J., McGinnis, G. (2001). Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. *Wood and fiber science*. 33(4), 2001. 522-533. Recuperado de <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2001/wang01b.pdf>

- Winck, R., Fassola, H., Suirezs, T., Videla, D., Area, M. (2014). Efecto del raleo sobre el módulo de elasticidad y módulo de rotura a la flexión estática de la madera de *Pinus taeda* L. XVI Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales – Silvicultura. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/280554683_EFECTO_DEL_RALEO SOBRE_EL_MODULO_DE_ELASTICIDAD_Y_MODULO_DE_ROTURA_A_LA_FLEXION_ESTATICA_DE_LA_MADERA_DE_Pinus_taeda_L

VIII. ANEXOS

ANEXO 1

INFORMACIÓN DE ÁRBOLES EVALUADOS EN LA PLANTACIÓN

Nº	ID	DAP (cm)	Altura total (m)	Altura comercial (m)	N	E	Altitud
1	23	32,6	28,67	6,52	471828	8816427	1614
2	27	30,3	27,52	9,69	471828	8816415	1639
3	28*	26,7	27,97	8	471824	8816405	1644
4	31	33,7	26,43	8,25	471822	8816399	1653
5	35*	34,7	22,35	8,13	471825	8816399	1660
6	38	35,8	29,3	10,17	471818	8816392	1660
7	44	34,5	27,21	12,51	471807	8816403	1663
8	46	31,9	23,6	8,36	471816	8816418	1635
9	51	40,5	32,9	8,72	471821	8816426	1635
10	53	27	31	19,09	471817	8816428	1635
11	55	27,5	26,14	8,12	471825	8816438	1590
12	56	30,5	27,56	11,79	471807	8816434	1589
13	59	32,5	22,47	4,88	471801	8816432	1645
14	60	27,6	24,03	5,28	471849	8816388	1641
15	62*	28,4	22,59	11,92	471803	8816428	1641
16	75	29,8	21,46	7,64	471804	8816424	1659
17	78	25	25,94	12,01	471813	8816411	1639
18	81	30,2	27,04	8,28	471784	8816416	1632

(*) Árboles cortados

ANEXO 2

INFORMACIÓN DE TROZAS

Código	Diámetro Mayor (cm)	Diámetro menor (cm)	Longitud (m)
28-1	26,5	24,7	155,8
28-2	24,7	24,3	161
28-3	23,7	23,7	157,1
28-4	23	22,2	160
28-5	23	21,1	157
28-6	23	22,5	163
28-7	20,6	19,5	162,2
35-1	37,6	33,5	155
35-2	33,8	32,2	160,4
35-3	31,8	30,6	160
35-4	31,5	29,8	156
35-5	29,6	28,8	160,8
35-6	28,5	27,6	160,8
35-7	27,7	25,5	161,4
62-1	29,1	26,7	158
62-2	26,5	26,2	157,6
62-3	26,1	25,5	156,6
62-4	25,2	25	157
62-5	24,4	23,7	157,4
62-6	23,7	23,3	154,8
62-7	23,2	22,5	152,8

ANEXO 3

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS

Equipo	Microsecond Timer
Marca	FAKOPP
Tiempo requerido para una medición	menos de 1 minuto
Error de medición de tiempo	± 3 microsegundos
Tamaño	45 x 82 x 150 mm
Peso	347 g
Consumo de potencia	320 mW
Caja del dispositivo	plástica, no resiste al agua
Pantalla	LCD de 4 dígitos
Sensores	Piezosensor SD02
Conectores del sensor	BNCRS232
Velocidad de transferencia en baudios	2400 bps
formato de datos	ASCII
Conectores del sensor	DIL 9, macho
Rango de temperatura de operación	0 - 40°C

Fuente: FAKOPP 2021 - <https://fakopp.com/es/product/mstimer/>

Equipo	Microfono de mesa
Marca	Teraware
Cable	1,7 m
Plug	3,5 mm
Sensibilidad	-43db ± 3db
Frecuencia	16 - 20000 Hz
Micrófono	Omnidireccional
Impedancia	2,2K

ANEXO 4

TABLA RESUMEN DE LAS PROPIEDADES POR PROBETA

N	Código	Contenido de humedad (%)	Densidad (g/cm ³)	Densidad básica (g/cm ³)	Velocidad (m/s)	MOEd1 (kg/cm ²)	Frecuencia (Hz)	MOEd2 (kg/cm ²)	MOEe (kg/cm ²)
1	35-1-o-e	57	0,76	0,48	4003	133045	557	107509	97655
2	35-2-e-b	118	0,97	0,44	4223	177475	558	128445	104438
3	35-7-s-b	46	0,71	0,49	4311	148067	572	111863	101825
4	35-2-o-a	103	0,90	0,45	4218	155984	559	115691	92761
5	35-3-s-c	61	0,74	0,46	4147	147676	559	111942	102076
6	35-4-e-b	151	0,99	0,40	3748	143356	476	97662	87873
7	62-1-o-b	35	0,64	0,47	4615	124940	662	107592	91856
8	28-7-o-a	117	0,90	0,42	4357	155302	614	131173	95362
9	62-4-s-b	75	0,63	0,36	3990	122560	509	82388	70838
10	35-1-o-e	78	0,84	0,47	3967	122474	534	91858	78039
11	35-3-s-c	110	0,96	0,46	4030	161404	475	97214	82401
12	35-2-o-b	112	0,85	0,40	4103	127480	543	92679	80492
13	35-1-o-a	121	0,99	0,45	3543	121932	464	84664	68516
14	35-1-o-a	101	0,97	0,48	3665	124921	490	92030	75596
15	35-6-n-a	156	1,05	0,41	3638	134447	462	90116	76104
16	35-7-s-b	44	0,63	0,44	3831	95394	511	71494	60785
17	35-3-s-a	127	1,00	0,44	4231	154828	558	111779	90242
18	35-2-e-b	111	0,97	0,46	4350	184705	559	129718	100750
19	62-4-s-b	128	0,85	0,37	4117	135777	509	86576	68260
20	62-4-s-c	152	0,93	0,37	4270	183713	522	115171	92183
21	62-4-s-c	102	0,79	0,39	4341	180022	570	129127	97801
22	62-1-o-a	113	0,98	0,46	4139	150234	570	122072	100403
23	35-2-o-b	119	1,06	0,49	4131	171223	569	137459	95519
24	35-2-e-b	64	0,63	0,38	4208	158637	555	115847	87583
25	62-4-s-c	54	0,62	0,40	4558	139292	674	128091	102762
26	62-1-o-a	119	0,76	0,35	3435	91486	455	66814	51786
27	62-5-s-a	186	1,03	0,36	4163	165062	498	99174	76725
28	35-2-o-a	119	0,96	0,44	3872	142354	490	94763	68784
29	35-2-o-a	143	0,98	0,40	4024	86466	537	64253	59362
30	35-2-o-b	47	0,53	0,36	4117	157180	533	112671	87966
31	35-6-n-a	117	0,92	0,42	3666	90761	497	68824	57035
32	62-4-s-b	81	0,70	0,39	4154	186024	534	129488	103688
33	35-2-e-b	125	0,95	0,42	4195	170218	558	126304	100312
34	35-1-o-a	119	0,97	0,44	4003	150520	568	130445	104496
35	35-2-o-a	63	0,91	0,56	3751	131566	454	82130	69048
36	35-2-o-a	124	0,89	0,40	3986	140484	543	111146	86979
37	35-6-n-a	122	0,92	0,41	3776	102169	544	88232	60866

N	Código	Contenido de humedad (%)	Densidad (g/cm3)	Densidad básica (g/cm3)	Velocidad (m/s)	MOEd1 (kg/cm2)	Frecuencia (Hz)	MOEd2 (kg/cm2)	MOEe (kg/cm2)
38	62-1-o-b	96	0,82	0,42	4234	166651	559	121724	92603
39	62-7-o	43	0,55	0,39	4023	107111	544	80472	67759
40	28-7-o-a	178	0,99	0,36	4097	153545	523	102028	78776
41	35-1-o-a	93	0,87	0,45	3863	120477	521	92442	75249
42	35-1-o-a	82	0,87	0,48	4336	164758	583	124872	104122
43	62-1-e	125	0,87	0,39	4115	151570	520	95515	78498
44	35-4-e-b	63	0,75	0,46	3985	126228	492	79929	64896
45	28-2-n-a	148	0,97	0,39	4142	164054	468	86307	70591
46	35-4-e-b	149	0,99	0,40	3742	141406	468	93322	77822
47	62-1-o-a	137	0,85	0,36	3524	97520	453	67807	58293
48	35-3-n-a	48	0,74	0,50	4438	147281	605	112979	115685
49	35-3-s-b	120	0,92	0,42	3914	148215	488	98863	89797
50	62-1-e	114	0,91	0,43	4245	144789	523	92275	83648
51	28-4-n-a	108	0,75	0,36	3946	117711	522	85865	72873
52	62-1-e	154	0,99	0,39	3978	104222	469	60990	74626
53	28-4-n-a	67	0,57	0,34	4295	114363	547	76112	66324
54	35-3-s-a	110	0,78	0,37	3573	114265	421	66325	60284
55	62-1-e	104	0,83	0,41	4168	138012	547	92787	85699
56	35-2-o-a	106	0,96	0,46	4313	179010	537	118395	103486
57	35-2-o-c	108	0,99	0,47	4208	180791	547	128059	117063
58	35-3-e-a	92	0,84	0,44	4943	180257	655	129804	118350
59	62-6-e-b	133	0,92	0,39	4369	176334	571	122199	102982
60	28-3-n-b	150	0,96	0,39	4375	178401	546	113683	100070
61	35-3-e-a	34	0,59	0,44	4613	127824	665	110637	97881
62	62-3-s-b	36	0,56	0,41	4704	120716	662	96719	91973
63	62-6-s-a	65	0,72	0,44	4301	94224	525	58787	74435
64	62-6-s-b	63	0,69	0,42	4674	167273	604	115378	102351
65	62-6-s-a	48	0,54	0,36	4324	135584	549	90120	79454
66	35-1-e-b	110	1,00	0,48	4306	178391	581	135633	107963
67	62-3-s-b	158	0,97	0,37	4255	183329	538	119459	96723
68	28-3-n-a	55	0,59	0,38	4383	136987	571	97927	87374
69	35-2-o-c	84	0,87	0,47	4306	161799	581	128063	117662
70	28-3-n-b	72	0,65	0,38	4532	144551	653	123012	99318
71	35-1-e-b	101	0,98	0,49	4232	173593	561	123401	108923
72	35-2-o-c	88	0,92	0,49	4315	150956	603	126853	110865
73	28-3-s	114	0,95	0,44	4661	226318	558	133960	110485
74	28-3-n-a	68	0,56	0,34	3879	85917	524	64600	55878
75	28-6-n	81	0,86	0,47	4742	204484	652	159081	135086
76	28-3-n-a	90	0,71	0,37	4051	110685	547	85673	66433
77	35-6-s	93	1,01	0,52	4201	192994	522	124923	109105
78	35-3-s-b	155	1,01	0,40	3832	148547	456	90012	76743
79	28-5-e	160	0,91	0,35	4142	185309	502	113872	80062
80	35-6-s	39	0,71	0,51	4074	142518	536	103986	88743

N	Código	Contenido de humedad (%)	Densidad (g/cm3)	Densidad básica (g/cm3)	Velocidad (m/s)	MOEd1 (kg/cm2)	Frecuencia (Hz)	MOEd2 (kg/cm2)	MOEe (kg/cm2)
81	62-4-s-a	149	0,91	0,37	3761	144721	468	94822	71787
82	28-5-e	178	1,07	0,39	3497	127836	408	71901	43840
83	28-4-n-a	46	0,60	0,41	4579	165375	627	128530	98005
84	35-3-s-a	107	1,04	0,50	4057	175430	511	116191	101531
85	35-3-s-a	134	1,05	0,45	3807	155594	478	102352	88083
86	35-6-n-b	135	1,02	0,43	3548	127761	477	97967	74724
87	28-4-n-b	91	0,80	0,42	4554	173499	627	139517	99183
88	35-6-n-b	134	0,99	0,42	3720	141463	441	87193	72023
89	28-4-n-a	151	1,07	0,43	4359	208599	537	131923	108112
90	35-2-e-a	67	0,65	0,39	4117	102563	581	86130	77297
91	35-3-s-a	74	0,75	0,43	4157	161888	536	113790	74536
92	35-3-s-a	92	0,96	0,50	4237	164136	570	124675	111528
93	62-4-s-a	95	0,70	0,36	4058	148364	510	97905	78990
94	62-7-e-a	39	0,49	0,35	4262	111800	548	78049	70946
95	35-3-s-a	60	0,65	0,41	4051	109225	536	80288	60445
96	35-3-s-a	122	0,92	0,41	4013	140624	537	104676	86063
97	35-7-s-b	114	0,90	0,42	3678	129913	471	89157	76420
98	35-7-s-b	38	0,64	0,47	3320	86380	402	52396	47832
99	35-1-e-a	111	0,89	0,42	4252	160164	522	100930	84068
100	35-1-o-a	82	0,71	0,39	3884	105013	502	74622	66991
101	62-5-s-a	123	0,86	0,39	4131	176773	491	104678	90695
102	62-5-s-a	43	0,57	0,40	4140	124797	569	97687	85766
103	35-1-o-a	71	0,81	0,48	4090	132780	546	100495	87799
104	62-1-o-b	61	0,76	0,47	4398	145098	593	110605	97660
105	35-1-o-a	73	0,68	0,39	4159	120945	578	98794	84022
106	35-1-e-a	103	0,84	0,41	4030	138460	546	105187	88234
107	35-1-o-a	64	0,75	0,46	4155	128966	525	87383	84261
108	35-1-e-a	106	0,87	0,42	4194	136931	558	100507	99085
109	62-1-o-b	131	0,97	0,42	4103	159519	537	114199	99176
110	35-7-s-b	50	0,74	0,49	4270	129881	602	109473	116135
111	35-3-s-a	63	0,64	0,39	3950	88565	553	73333	67595
112	62-4-s-a	138	0,95	0,40	4136	168712	544	112019	95288
113	28-5-e	95	0,73	0,38	3973	114813	546	84101	73363
114	28-2-n-a	126	0,87	0,39	4145	153976	503	97239	85336
115	35-3-n-a	72	0,78	0,45	3921	118451	572	109105	99709
116	35-2-o-a	104	1,04	0,51	4153	171072	537	123011	106546
117	35-2-e-b	118	1,02	0,47	4194	184803	542	128261	117271
118	35-3-n-b	144	1,05	0,43	3993	175091	487	109242	98952
119	35-3-n-b	143	1,03	0,42	3933	157995	499	107644	92478
120	35-2-o-a	89	1,01	0,53	4155	181554	539	129376	110295
121	35-4-e-b	149	0,94	0,38	3465	123700	434	81005	70725
122	35-2-o-a	90	0,72	0,38	3833	107074	485	71654	65163
123	35-2-e-b	123	1,02	0,46	4087	165354	533	116505	103148

N	Código	Contenido de humedad (%)	Densidad (g/cm3)	Densidad básica (g/cm3)	Velocidad (m/s)	MOEd1 (kg/cm2)	Frecuencia (Hz)	MOEd2 (kg/cm2)	MOEe (kg/cm2)
124	35-2-o-a	58	0,64	0,41	3988	106236	556	86464	74697
125	28-5-e	142	0,90	0,37	3539	123494	430	71925	61581
126	35-3-n-a	108	0,95	0,46	3863	155898	490	103352	93534
127	35-3-n-b	125	0,94	0,42	3493	131408	431	89627	81693
128	28-5-e	182	0,94	0,33	3837	130908	509	91003	81526
129	28-3-n-b	72	0,67	0,39	4622	149683	620	111669	100299
130	28-6-n	104	0,90	0,44	4337	154596	600	121950	103629
131	35-1-e-b	99	0,94	0,47	4220	171238	579	132850	113684
132	28-3-n-a	127	0,94	0,41	4390	172328	547	112565	95934
133	62-3-n	138	0,97	0,41	3667	144419	438	85796	66845
134	62-7-e-b	34	0,53	0,39	4487	105283	649	90979	92514
135	35-2-o-d	76	0,96	0,55	4321	177934	611	150105	110244
136	62-7-e-b	156	0,90	0,35	4059	166278	479	95199	86132
137	28-3-n-a	70	0,71	0,42	4574	148455	663	130916	102829
138	62-6-e-b	143	1,01	0,41	4104	174042	499	108002	96775
139	35-1-e-b	97	0,87	0,44	4331	155813	596	122488	107838
140	35-1-e-b	98	0,89	0,45	4173	155594	570	123272	101933
141	62-6-n	131	0,89	0,39	3564	113356	467	82436	63992
142	28-6-n	82	0,78	0,43	4454	172312	578	121273	112115
143	28-3-n-b	88	0,74	0,39	4447	163640	611	128835	105705
144	62-6-s-b	76	0,77	0,44	4527	125188	638	57155	79377
145	35-2-o-d	108	1,06	0,51	4294	198034	567	146403	140971
146	35-2-o-d	78	0,98	0,55	4407	185760	609	147641	132942
147	28-3-n-a	38	0,61	0,44	4629	133160	663	116944	113255
148	35-7-s-c	74	0,80	0,46	3489	110815	450	75303	72048
149	62-7-e-b	79	0,64	0,36	4255	149549	525	94658	85271
150	62-6-s-b	159	1,02	0,39	4248	191203	513	115057	102169
151	28-3-n-b	38	0,62	0,45	4449	122048	620	100310	99885
152	62-7-e-b	37	0,59	0,43	4245	108029	602	91430	84296
153	35-3-e-a	140	0,99	0,41	4406	171513	573	122568	94272
154	62-3-n	54	0,65	0,43	3968	102373	526	74107	65785
155	62-5-s-b	161	1,02	0,39	4189	186456	509	114096	92645
156	62-6-s-a	38	0,52	0,38	4332	105994	612	86785	71195
157	62-5-s-b	38	0,56	0,40	4435	125647	561	83712	76518
158	62-6-e-b	163	1,05	0,40	3750	150686	500	109960	90761
159	35-7-s-c	118	1,02	0,47	3564	140322	465	98553	90428
160	62-3-n	36	0,62	0,46	3840	83999	556	73929	57795
161	35-3-e-a	61	0,67	0,42	3297	71944	470	60257	49888
162	62-6-e-b	87	0,88	0,47	4462	172505	580	122024	88577
163	35-3-s-c	77	0,79	0,44	4010	130295	529	95944	81006
164	28-4-n-b	127	0,92	0,41	4162	155503	555	115202	95927
165	35-6-n-a	48	0,75	0,51	4178	140527	625	130350	104349
166	62-7-e-a	164	1,02	0,39	3933	153355	488	102461	86575

N	Código	Contenido de humedad (%)	Densidad (g/cm3)	Densidad básica (g/cm3)	Velocidad (m/s)	MOEd1 (kg/cm2)	Frecuencia (Hz)	MOEd2 (kg/cm2)	MOEe (kg/cm2)
167	62-7-o	44	0,59	0,41	3731	93724	525	77656	65028
168	62-1-o-b	89	0,80	0,43	4596	168263	613	126580	99318
169	35-6-n-a	47	0,74	0,50	4161	137257	587	113934	101060
170	35-1-o-e	89	1,01	0,54	4451	201325	598	151275	135016
171	35-7-s-b	119	0,90	0,41	3425	104942	507	97341	70880
172	35-3-n-a	132	0,86	0,37	3725	123494	449	74342	67285
173	35-1-o-e	74	0,98	0,56	4332	184749	612	155051	132839
174	28-4-n-b	146	1,01	0,41	4327	191233	532	120924	108283
175	62-4-s-a	55	0,57	0,37	4153	88408	586	74501	76958
176	35-1-o-a	75	0,86	0,49	3635	109632	474	77950	86567
177	35-6-s	100	0,81	0,40	3581	107351	432	67239	62287
178	35-3-n-b	71	0,80	0,47	4259	144832	604	121468	121921
179	35-1-o-a	68	0,74	0,44	3294	78783	427	55112	50830
180	62-1-n	154	1,13	0,44	3959	170798	514	113741	105640
181	62-3-s-a	140	0,90	0,38	4461	176470	531	105613	104278
182	35-3-n-b	150	1,05	0,42	3922	166533	476	103227	90346
183	35-3-n-b	137	0,97	0,41	3843	141401	490	98241	92677
184	28-5-e	161	1,09	0,42	4328	191302	509	101554	103091
185	28-4-n-b	101	0,87	0,43	4624	210175	579	137123	129006
186	28-5-o	179	0,99	0,36	3916	162110	472	98720	92876
187	35-3-n-b	129	1,03	0,45	4036	169021	526	121631	106463
188	35-1-e-a	93	0,89	0,46	4159	155819	530	105500	94432
189	35-3-n-a	63	0,62	0,38	3788	92782	539	79281	79473
190	35-1-o-a	78	0,97	0,54	3783	141399	503	106992	104971
191	62-1-o-a	110	0,92	0,44	4127	161474	552	120139	105578
192	35-1-e-a	101	0,82	0,40	4023	129261	550	101771	93661
193	62-7-o	94	0,83	0,43	3681	134283	465	90054	85477
194	62-3-s-a	74	0,74	0,43	4731	174965	624	126397	122170
195	35-6-s	42	0,65	0,46	3284	80655	435	60591	49957
196	35-2-o-b	118	0,89	0,41	3903	142636	491	97020	93582
197	62-3-s-a	90	0,73	0,39	4605	164387	573	107513	96443
198	35-2-o-b	66	0,75	0,45	4048	128074	559	102898	103353
199	35-1-o-e	79	0,94	0,52	4173	162478	603	142100	133569
200	62-4-s-b	80	0,68	0,38	4077	124075	521	85110	73020
201	35-6-s	43	0,64	0,45	3415	77731	456	58349	49416

ANEXO 5

COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE

Variable respuesta	Variable regresora	Coef, Determinación (R^2)
MOEe	Velocidad	0,47
MOEe	MOE _{d1}	0,60
MOEe	Frecuencia	0,38
MOEe	MOE _{d2}	0,81

ANEXO 6

PRUEBA T-STUDENT ENTRE LOS MOE_{d1} HALLADOS EN CARA RADIAL Y TANGENCIAL

	<i>158593,96</i>	<i>152009,47</i>
Media	158217,20	153744,51
Varianza	1189309750,6	1016967934,2
Observaciones	6	9
Varianza agrupada	33,00	33,00
Diferencia hipotética de las medias	1103138842,4	
Grados de libertad	8	
Estadístico t	0,00	
P(T<=t) una cola	64,00	
Valor crítico de t (una cola)	0,55	
P(T<=t) dos colas	0,29	
Valor crítico de t (dos colas)	1,67	
	0,59	
	2,00	

ANEXO 7

PRUEBA ANOVA ENTRE MOE_e, MOE_{d1} y MOE_{d2}

Tabla ANOVA para MOE por METODO

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	3,30294E11	2	1,65147E11	279,71	0,0000
Intra grupos	3,54252E11	600	5,90421E8		
Total (Corr.)	6,84546E11	602			

ANEXO 8

PRUEBA DE TUKEY ENTRE MOE_e, MOE_{d1} y MOE_{d2}

TUKEY HSD/KRAMER						alpha		0,05		
<i>group</i>	<i>mean</i>	<i>n</i>	<i>ss</i>	<i>df</i>	<i>q-crit</i>					
MOEe	89027	201	7,224E+10							
MOEd1	144196	201	1,8503E+11							
MOEd2	103116	201	9,6979E+10							
		603	3,5425E+11	600	3,314					
Q TEST										
<i>group 1</i>	<i>group 2</i>	<i>mean</i>	<i>std err</i>	<i>q-stat</i>	<i>lower</i>	<i>upper</i>	<i>p-value</i>	<i>mean-crit</i>	<i>Cohen d</i>	
MOEe	MOEd1	55169,34	1713,89	32,19	49489,51	60849,16	-4,93161E-13	5679,83	2,27	
MOEe	MOEd2	14088,82	1713,89	8,22	8408,99	19768,65	2,99459E-08	5679,83	0,58	
MOEd1	MOEd2	41080,52	1713,89	23,97	35400,69	46760,34	-4,93161E-13	5679,83	1,69	

ANEXO 9

ANÁLISIS DE RESIDUALES

Modelo	Normalidad		Homocedasticidad	
	KS	p-valor	X ²	p-valor
MOE vs MOE Microsecond	0,09	0,052	2,32	0,12
MOE vs Velocidad	0,06	0,43	2,76	0,097
MOE vs MOE FFT	0,06	0,38	0,93	0,33

ANÁLISIS DE COEFICIENTES DE REGRESIÓN

MOE vs velocidad

Coefficients:

```

                Estimate Std, Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -75997,185  12582,065   -6,04 7,44e-09 ***
jc$moe_vel   40,311      3,064   13,16 < 2e-16 ***

```

Signif, codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

MOE vs MOE ms

Coefficients:

```

                Estimate Std, Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 1,932e+04  4,135e+03   4,672 5,48e-06 ***
jc$moe_ms   4,834e-01  2,806e-02  17,225 < 2e-16 ***

```

Signif, codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

MOE vs FFT

Coefficients:

```

                Estimate Std, Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 8,783e+03  2,790e+03   3,149 0,00189 **
jc$moe_fft  7,782e-01  2,646e-02  29,410 < 2e-16 ***

```

Signif, codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1