

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**Validación de un método no destructivo
para medir módulo de elasticidad en trozas
de *Calycophyllum spruceanum* de una
plantación en Ucayali - Perú**

Presentado por:

Elizabeth Lucia Bustamante Orellana

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERA FORESTAL

Lima - Perú
2019

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos para calificar la sustentación del Trabajo de Tesis, presentado por la ex-alumna de la Facultad de Ciencias Forestales, Bach. ELIZABETH LUCIA BUSTAMANTE ORELLANA, titulado “VALIDACIÓN DE UN MÉTODO NO DESTRUCTIVO PARA MEDIR MÓDULO DE ELASTICIDAD EN TROZAS DE CALYCOPHYLLUM SPRUCEANUM DE UNA PLANTACIÓN EN UCAYALI - PERÚ”.

Oídas las respuestas a las observaciones formuladas, lo declaramos:

.....

con el calificativo de

En consecuencia queda en condición de ser considerada APTA y recibir el título de INGENIERA FORESTAL.

La Molina, 7 de Diciembre de 2018

.....
Mg. Sc. Miguel Melendez Cardenas
Presidente

.....
Mg. Sc. Manuel Chavesta Custodio
Miembro

.....
PhD. Carlos Reynel Rodriguez
Miembro

.....
Mg. Sc. Moises Acevedo Mallque
Asesor

.....
Mg. Sc. Luis Yoza Yoza
Coasesor

DEDICATORIA

A mi familia por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento

A mi asesor, el profesor Moisés Acevedo Mallque, por su incondicional apoyo, paciencia, dedicación y las enseñanzas brindadas.

A mi co-asesor, el profesor Luis Yoza Yoza, por sus aportes clave en este proceso y su disposición a resolver mis inquietudes.

A mi asesor externo, el Dr. Eloy Cuellar, quien me brindó la oportunidad de realizar este trabajo de investigación y me dio su apoyo durante todo el proceso.

A Piero, por su ayuda y completa disposición a realizar los ensayos en la prensa, por los días en la biblioteca y las palabras de aliento.

A Yanett y Haru, quienes siempre estuvieron dispuestas a brindarme su ayuda y compartir sus experiencias.

A Jorge Roberto, por sus consejos y orientación en el análisis estadístico, gracias por tu paciencia.

A mi mamá y papá, por ser mi guía y ejemplo. A Ale, Luis y mis abuelas, son mi motivo de lucha.

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.

RESUMEN

Se realizaron mediciones de módulo de elasticidad dinámico (MOE_D) y estático (MOE_E) en la especie *Calycophyllum spruceanum* (Capirona), a un contenido de humedad saturado ($CH > 30\%$). Se utilizaron los métodos de flexión estática y compresión paralela al grano para medir MOE_E en probetas, según las normas NTP; y un método acústico (no destructivo) para medir MOE_D en trozas según la ecuación ρV^2 , empleando el equipo Treasonic Timer para el cálculo de la velocidad de propagación de ondas (V), y dos métodos para el cálculo de la densidad (ρ), uno destructivo (probetas, según la NTP) y uno no destructivo (estimación de la densidad con el equipo Pilodyn). También fueron evaluadas las siguientes propiedades mecánicas: resistencia a la compresión paralela a las fibras (RM) y resistencia a la flexión estática (MOR). El objetivo principal de este estudio fue encontrar la relación existente entre los MOE_E y MOE_D . Mediante los análisis de regresión lineal, se encontró que las variables que mejor se asocian con MOE_F (MOE en flexión estática) y $MOE_{C//}$ (MOE en compresión paralela) son V y el MOE_{D2} (MOE hallado utilizando la densidad estimada con Pilodyn). Adicionalmente, se realizaron análisis de regresión lineal a diferentes niveles de corte, obteniendo como resultado un buen ajuste en las zonas basal e intermedia entre las variables regresoras y las variables respuesta.

Palabras clave: propiedades mecánicas, elasticidad, propiedades acústicas, sonido, equipo, penetrómetro.

ÍNDICE GENERAL

	Página
I. Introducción	1
II. Revisión de Literatura.....	3
1. Características de la especie.....	3
2. Características de la especie.....	3
2.1. Distribución y hábitat	3
2.2. Descripción de la madera	4
2.3. Características anatómicas.....	4
2.3.1. Macroscópicas.....	4
2.3.2. Microscópicas.....	4
2.4. Propiedades tecnológicas	4
2.4.1. Densidad	4
2.4.2. Propiedades mecánicas.....	5
2.4.3. Durabilidad natural y preservación.....	6
2.4.4. Trabajabilidad.....	6
2.4.5. Usos.....	7
3. Propiedades de la madera.....	7
3.1. Densidad.....	7
3.2. Propiedades mecánicas.....	8
4. Factores que afectan la resistencia mecánica	9
5. Comportamiento viscoelástico de la madera	11
6. Determinación de propiedades por métodos no destructivos.....	12
6.1. Determinación indirecta de la densidad.....	12
6.2. Evaluación de la velocidad de propagación de ondas en la madera.....	14
6.2.1. Antecedentes	15
6.2.2. Factores que influyen en la velocidad de propagación de ondas y módulo de elasticidad dinámico	17
III. Materiales y Métodos	21
1. Lugar de ejecución de los ensayos.....	21
2. Especie	21
3. Materiales y equipos.....	21
3.1. Evaluación de plantación y extracción de árboles.....	21
3.2. Preparación de probetas.....	21
3.3. Ejecución de ensayos mecánicos	22
3.4. Otros materiales.....	22
4. Metodología.....	23
4.1. Descripción de la zona de estudio.....	23
4.2. Selección y colección de muestras	24
4.3. Ensayos no destructivos en trozas.....	26
4.3.1. Evaluación con Pilodyn.....	27
4.3.2. Evaluación con Treeson Sonic Timer.....	29
4.4. Procesamiento de trozas y preparación de probetas	31
4.5. Ensayos destructivos y cálculo de módulo de elasticidad estático	33
4.5.1. Densidad y contenido de humedad.....	33
4.5.2. Módulo de elasticidad estático	34
4.6. Cálculo de módulo de elasticidad dinámico.....	35
4.7. Evaluación por niveles de corte	35

4.8.	Análisis estadístico	36
IV.	Resultados y discusión.....	39
1.	Densidad.....	39
2.	Módulo de elasticidad estático.....	42
3.	Velocidad de propagación de onda y módulo de elasticidad dinámico	44
3.1.	Módulo de elasticidad dinámico y estático.....	49
4.	Análisis de regresión entre variables.....	50
4.1.	Regresiones por niveles de corte.....	50
4.2.	Regresión $MOE_D - MOE_E$	51
4.3.	Regresión $V - MOE_E$	54
4.4.	Regresión $MOE_D -$ otras propiedades	56
4.5.	Interpretación global	56
V.	Conclusiones.....	59
VI.	Recomendaciones	61
VII.	Referencias bibliográficas.....	63
VIII.	Anexos.....	71

Índice de tablas

	Página
Tabla 1: Densidad básica de <i>Calycophyllum spruceanum</i> según distintos autores.	5
Tabla 2: Propiedades mecánicas de <i>Calycophyllum spruceanum</i> según distintos autores.....	6
Tabla 3: Coeficientes de correlación entre métodos destructivos y no destructivos en probetas de <i>Cedrelinga cateniformis</i>	17
Tabla 4: Información de la plantación en estudio.....	23
Tabla 5: Número de trozas por árbol y distribución por niveles de corte.....	31
Tabla 6: Valores promedio de densidad básica y densidad verde determinada por los diferentes métodos según el nivel de corte.....	39
Tabla 7: Análisis de varianza y prueba de Kruskal-Wallis entre niveles de corte.....	40
Tabla 8: Valores promedio de flexión estática y compresión paralela según el nivel de corte.....	43
Tabla 9: Análisis de varianza y prueba de Kruskal-Wallis entre niveles de corte.....	43
Tabla 10: Velocidad acústica y módulo de elasticidad dinámico medidos en trozas.....	44
Tabla 11: Valores promedio de la velocidad acústica y módulo de elasticidad dinámico según el nivel de corte.....	45
Tabla 12: Prueba de Kruskal-Wallis entre niveles de corte para velocidad y módulo de elasticidad dinámico.....	45
Tabla 13: Coeficientes de correlación, determinación y ecuación de regresiones a distintos niveles de corte empleando el MOE_F como variable respuesta.....	50
Tabla 14: Coeficientes de correlación, determinación y ecuación de regresiones a distintos niveles de corte empleando el $MOE_{C//}$ como variable respuesta.....	51
Tabla 15: Coeficiente de correlación y regresión para las regresiones descritas.....	54
Tabla 16: Coeficientes de correlación y determinación entre variables.....	56

Índice de figuras

	Página
Figura 1: Plantación de Capirona.....	24
Figura 2: Mapa de la plantación y ubicación de los árboles	25
Figura 3: Equipo Pilodyn y accesorios.....	26
Figura 4: Treesonic Timer y accesorios	27
Figura 5: Apoyo de pines en la superficie de la troza.....	28
Figura 6: Evaluación no destructiva con Pilodyn.....	28
Figura 7: Conexión de los sensores a los conectores <i>START</i> y <i>STOP</i>	29
Figura 8: Evaluación no destructiva con Treesonic Timer.	30
Figura 9: Disposición de los listones en la sección transversal de la troza	32
Figura 10: Vista tridimensional de listones de 2,5 x 2,5 cm en la troza	33
Figura 11: Probeta para medición de densidad y contenido de humedad	34
Figura 12: Distribución de niveles de corte en el árbol.....	36
Figura 13: Diagrama de cajas entre los métodos para determinar densidad	41
Figura 14: Gráfico de medianas con intervalos del 95% de confianza entre los métodos para determinar densidad.....	41
Figura 15: Gráfico de medias con intervalos del 95% de confianza entre los MOE_D	46
Figura 16: Diagrama de cajas de la velocidad de propagación por troza y árbol.....	48
Figura 17: Diagrama de cajas de módulo de elasticidad dinámico por niveles de corte.....	48
Figura 18: Valores promedio por troza de módulos de elasticidad dinámicos y estáticos	49
Figura 19: Recta de regresión entre MOE_{D1} vs MOE_F	52
Figura 20: Recta de regresión entre MOE_{D2} vs MOE_F	52
Figura 21: Recta de regresión entre MOE_{D1} vs $MOE_{C//}$	53
Figura 22: Recta de regresión entre MOE_{D2} vs $MOE_{C//}$	53
Figura 23: Recta de regresión entre V vs MOE_F	55
Figura 24: Recta de regresión entre V vs $MOE_{C//}$	55

Índice de anexos

	Página
Anexo 1 Constancia de identificación de especie	71
Anexo 2 Información de árboles evaluados en la plantación.....	72
Anexo 3 Información de trozas.....	73
Anexo 4 Fotografías de evaluación de árboles y trozas.....	74
Anexo 5 Especificaciones técnicas de los equipos empleados.....	75
Anexo 6 Tabla resumen de propiedades por troza	76
Anexo 7 Coeficientes de determinación de los Modelos de regresión lineal múltiple.....	78
Anexo 8 Clasificación de los coeficientes de correlación según Calzada (1982).....	79
Anexo 9 Fotografías de ensayos mecánicos	80

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, la manera más común de determinar las propiedades tecnológicas de la madera es empleando métodos destructivos que implican procedimientos engorrosos y tiempos excesivos para la obtención de resultados. Como contraparte, en la actualidad hay técnicas no destructivas que nos permiten obtener resultados inmediatos. Sin embargo, como lo menciona Nilsson (2014), es un gran desafío para la evaluación de propiedades de especies arbóreas el desarrollar métodos de evaluación rápidos, precisos y rentables para seleccionar los caracteres de calidad de la madera, sobre todo cuando en el país se está iniciando la aplicación de estas técnicas no destructivas en maderas de plantaciones con especies tropicales.

Al respecto, en el país es menester mencionar los trabajos realizados por Carnero (2007) y Sucksmith (2009), cuyos resultados promisorios demostraron que estas pruebas permiten evaluar el módulo de elasticidad en probetas de maderas tropicales aplicando métodos acústicos y vibratorios. El primero con frecuencias de 23 y 45 kHz; y el último, usando el análisis Fast Fourier Transform (FFT) en vibración transversal y longitudinal; aplicados para piezas de madera en condición seca al aire.

En el presente estudio se evalúan trozas con un equipo de medición acústica para determinar el módulo de elasticidad dinámico, parámetro importante para el control de calidad y clasificación de trozas. Esta técnica se aplicó en trozas de Capirona (*Calycophyllum spruceanum*) proveniente de una plantación de 19 años de edad. Los resultados, de acuerdo a su eficiencia, se pueden utilizar para la toma de decisiones tanto del silvicultor como del procesador de madera.

El objetivo general del estudio fue validar el uso del método acústico para medir módulo de elasticidad en trozas de Capirona, determinando el módulo de elasticidad dinámico longitudinal (MOE_D) mediante el uso del equipo Treasonic Timer, y el módulo de elasticidad estático (MOE_E) para flexión estática y compresión paralela mediante los métodos normalizados.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

1. CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE

2. CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE

Clasificación taxonómica

Según TROPICOS (2018):

Familia: Rubiaceae

Nombre científico: *Calycophyllum spruceanum* (Benth.) hook. f. ex K. Schum.

Nombre común: Capirona

Sinónimos: *Eukylista spruceana* Benth.

Otros nombres comunes: Capirona negra, Capirona de bajo

Nombres Internacionales: Pau mulato (Brasil); Guayabochi, Palo Blanco (Bolivia); Capirona de Altura, Guayabete (Colombia); Capirona, Corusicao (Ecuador). (ITTO 2018)

2.1. DISTRIBUCIÓN Y HÁBITAT

La Capirona (*Calycophyllum spruceanum*) es una especie que se encuentra en toda la región amazónica, en los países de Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador y Perú (Reynel *et al.* 2003). Se encuentra especialmente a lo largo del río Amazonas, donde forma agrupamientos casi homogéneos, llamados matas de palo mulato en Brasil o capironales en Perú (Santos *et al.* 2016). Chavesta (1995) menciona que, en el Perú, esta especie se distribuye en los departamentos de Loreto (Yurimaguas e Iquitos), Ucayali (Pucallpa) y Huánuco (Tingo María).

Reynel *et al.* (2003) menciona que esta especie es frecuente en zonas de bosques secundarios y se le puede encontrar también en los bosques primarios. Se le observa en ámbitos con pluviosidad elevada y constante, pero también en zonas con una estación seca marcada. Es una especie heliófita, frecuente en bosques secundarios pioneros y tardíos.

2.2. DESCRIPCIÓN DE LA MADERA

El tronco de Capirona recién cortado presenta albura y duramen poco diferenciado, la primera de color blanco cremoso y el segundo de color blanco pardo con vetas de color marrón claro. Acevedo y Kikata (1994) mencionan que, en condición seca, su albura es de color blanco cremoso y el duramen blanco amarillento y posee anillos de crecimiento diferenciados por bandas oscuras de forma regular. Presenta grano recto e irregular, de textura uniforme y fina, brillo medio. No posee olor ni sabor (Aróstegui 1974).

2.3. CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS

2.3.1. MACROSCÓPICAS

Chavesta (2005) indica que la madera presenta porosidad difusa con poros muy pequeños y numerosos, visibles con lupa de 10x, solitarios y múltiples radiales de 2 a 9 en proporción similar; parénquima indistinguible inclusive con lupa de 10x; radios no estratificados visibles con lupa de 10x.

2.3.2. MICROSCÓPICAS

Acevedo y Kikata (1994) describen que los vasos presentan diámetro tangencial de 39 a 145 μm y longitud entre 615 y 1190 μm ; platina de perforación poco a muy inclinada con perforación simple, punteado intervascular y radiovascular opuesto con puntuaciones ovaladas y abertura inclusa. El parénquima es del tipo apotraqueal difuso y no estratificado. Posee radios heterogéneos tipo II, en algunos casos radios fusionados, no estratificados, con altura entre 144 y 470 μm . Presenta fibras libriformes no estratificadas con un diámetro total de 22 μm , el grosor de la pared celular es de 6 μm y su longitud varía entre 1,306 y 2,150 μm .

2.4. PROPIEDADES TECNOLÓGICAS

2.4.1. DENSIDAD

En la Tabla 1 se muestran distintos valores de densidad básica (g/cm^3) de *Calycophyllum spruceanum* procedente tanto de bosque natural como de tres plantaciones establecidas en Perú.

Tabla 1: Densidad básica de *Calycophyllum spruceanum* según distintos autores.

Bibliografía	DB (g/cm³)	Procedencia	Edad (años)
Aróstegui (1974)	0,76	Bosque natural	-
JUNAC (1981)	0,74		-
Díaz <i>et al.</i> (s. f.)	0,64	Plantación	8
Pantigoso (2009)	0,61		9
Castro ¹	0,70		20

Según la clasificación de Aróstegui (1982) de maderas por su densidad, la Capirona de bosque natural es clasificada como una madera de densidad alta, caracterizándose por tener alta resistencia mecánica y buena durabilidad; mientras la madera procedente de las plantaciones de mencionadas es una madera de densidad media/alta, caracterizada por una resistencia mecánica y durabilidad moderada.

Acevedo (2011), refiere que la densidad verde de Capirona, a un contenido de humedad de 35% es de 1,03 g/cm³.

2.4.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

En la Tabla 2 se presentan los valores de resistencia para flexión estática y compresión paralela de la especie en estudio. La JUNAC (1981) y Acevedo (2011) muestran las propiedades obtenidas de árboles provenientes de bosque natural. Por otro lado, se indican resultados de estudios en plantaciones de 9 y 20 años de Pantigoso (2009) y Castro¹, respectivamente. La primera corresponde a una plantación ubicada en San Alejandro, Ucayali; mientras que la segunda en Curimaná, Ucayali.

Chavesta (2005) menciona que la madera de Capirona tiene altos valores en sus propiedades mecánicas las que están acorde con su alta densidad.

Pantigoso (2009) concluye que la plantación de Capirona de 9 años produce madera con valores promedios menores a los reportados para bosque natural, diferencias que se acentúan en densidad básica, dureza y compresión paralela.

¹ Castro, P. 24 oct. 2018. Caracterización físico mecánica de madera de Capirona (*Calycophyllum spruceanum*) proveniente de una plantación de 20 años, del distrito de Curimaná – Ucayali (correo electrónico). Lima, Perú, UNALM.

Tabla 2: Propiedades mecánicas de *Calycophyllum spruceanum* según distintos autores.

<i>Propiedad</i>	<i>Unidades</i>	<i>Procedencia</i>						
		<i>Bosque natural</i>			<i>Plantaciones</i>			
		<i>JUNAC (1981)</i>		<i>Acevedo (2011)</i>	<i>Pantigoso (2009)</i>		<i>Castro¹</i>	
		<i>12%</i>	<i>Verde</i>	<i>Verde</i>	<i>CH (%)</i>	<i>Promedio</i>	<i>CH (%)</i>	<i>Promedio</i>
<i>Flexión Estática</i>								
ELP	kg/cm ²	813	683	-	23,31	486,41	19,12	512,46
MOR		1312	1028	723,00		883,7		1010,26
MOE	t/cm ²	162	108	150,00		104,77		110,18
<i>Compresión Paralela</i>								
ELP	kg/cm ²	-	-	-	20,45	271,14	19,21	269,96
RM		660	500	283,00		372,34		413,26
MOE	t/cm ²	-	-	-		121,97		108,10

2.4.3. DURABILIDAD NATURAL Y PRESERVACIÓN

Gonzales (1970) y Valderrama (1993) señalan que esta especie es moderadamente resistente y no necesita un tratamiento de preservación. Chavesta (2005) agrega que es resistente al ataque de organismos biológicos.

En cuanto a la preservación, la albura presenta absorción alta, penetración parcial regular y de grado fácilmente penetrable; mientras que el duramen tiene buena absorción, penetración parcial irregular y de grado moderadamente penetrable. (Chavesta 2005)

2.4.4. TRABAJABILIDAD

Valderrama (1993) clasifica a la Capirona como una especie de comportamiento regular durante la trabajabilidad, especialmente con máquinas de carpintería. Esto debido a que origina problemas de desafilado de sierras y cuchillas por su alta densidad. Orrego (2010) encontró que la madera de plantaciones de Capirona de 9 años proporciona calidades de superficie similares a las reportadas en bosques naturales. Asimismo, el nivel de altura en el fuste no tiene efecto sobre el grado de calidad de la superficie maquinada. Chavesta (2005) agrega que es una madera de fácil aserrío y de buen comportamiento a la trabajabilidad.

2.4.5. USOS

La madera de Capirona puede ser usada para pisos, parquet, machihembrados, tarugos, construcciones pesadas, mangos de herramientas, ebanistería y artículos para productos lácteos. (Chavesta 2005)

3. PROPIEDADES DE LA MADERA

3.1. DENSIDAD

Igartúa *et al.* (2013) mencionan que la importancia de esta propiedad radica en la influencia que tiene sobre el rendimiento y la calidad del producto final y porque es fuertemente heredable, además de ser indicadora de muchas de las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

Notivol *et al.* (1992) señalan que la densidad de la madera es expresión relativa de los distintos elementos celulares que la componen (vasos, traqueidas, fibras, células de parénquima) y de la variación de su pared celular, lumen y espacios intercelulares. Fundamentalmente depende de tres factores: porcentaje de madera de otoño, tamaño de las células y del grosor de la pared celular.

Chimello, citado por Da Silva *et al.* (2009), señala que la densidad es un buen indicador de otras propiedades, así, maderas de mayor densidad corresponden en general a una mayor resistencia mecánica y un alto valor energético. León (2010) la considera como una de las propiedades físicas más importantes debido a la relación que tienen con otras propiedades y con la utilización de la madera. El mismo autor agrega que es el descriptor primario de mayor importancia en numerosas propiedades tecnológicas, independientemente si el objetivo es producción de madera sólida o pulpa.

Con respecto a la variabilidad de la densidad, Cobas *et al.* (2014) señalan que se ha demostrado que existen patrones de variación radial (médula-corteza) y patrones de variación axial (base-ápice) en el fuste, asociados a diferentes edades fisiológicas del cambium y por lo tanto a la formación de madera juvenil y madura. Silva y Nívar (2012) añaden que esta propiedad varía dentro de la planta, durante la vida de la planta y entre individuos de una misma especie; este último podría ser explicado por los factores del sitio, específicamente la cantidad de humedad presente en forma de precipitación o de cantidad de agua del suelo.

Megraw, citado por Pereyra y Gelid (2002), menciona que durante los primeros años el árbol produce madera con anillos de crecimiento anchos, donde hay una mayor proporción de madera temprana de baja densidad. Por otra parte, respecto a la altura, la densidad es mayor en la base y va disminuyendo hacia la copa.

3.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

Una propiedad mecánica se define como la resistencia que ofrece la madera bajo la aplicación de fuerzas o cargas a la que es sometida cuando está en uso (Aróstegui 1982 y Arroyo 1983). Existen tres tipos de esfuerzos primarios que pueden actuar sobre un cuerpo: esfuerzo compresivo, esfuerzo de tracción y por último el esfuerzo de cizallamiento; asimismo existe la combinación de los tres esfuerzos produciendo el efecto de flexión o pandeo (Arroyo 1983).

Hermoso (2001) menciona que entre las propiedades más importantes y necesarias para la clasificación de la resistencia de la madera son: resistencia a la flexión, módulo de elasticidad longitudinal en flexión y densidad. Otras propiedades igualmente importantes son: la resistencia a la tracción y compresión paralela y perpendicular, la resistencia al cortante y el módulo de elasticidad en cortante.

La flexión estática es la resistencia que ofrece la madera a una carga que actúa sobre una viga, la cual varía según los defectos de crecimiento, densidad, contenido de humedad, temperatura y duración de la carga. Se tienen 3 índices en esta propiedad: esfuerzo al límite proporcional (ELP), módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR). El primero indica que la carga aplicada es proporcional a la deformación; el segundo es un índice de la facilidad o dificultad que tienen las maderas para su deformación, donde un mayor MOE indicará una menor deformación; y el último indica el momento en el que se produce la falla. (Aróstegui 1982)

Con respecto a la compresión paralela al grano, el mismo autor señala que es la resistencia que ofrece cuando la madera actúa como una columna, siendo uno de los índices más importante la resistencia máxima (RM). Adicionalmente se obtiene el ELP y el MOE.

Soto *et al.* (2012) señala que en la madera se pueden determinar dos tipos de MOE, uno estático (MOE_E) y otro dinámico (MOE_D). Para el primer caso se utiliza un dispositivo que aplica una carga y registra la deflexión dentro del rango elástico, lo que permite calcular el MOE_E ; mientras que en el MOE_D se emplean dispositivos que facilitan el viaje de ondas

acústicas a través de la madera y registra la velocidad de tránsito de ellas, que junto con la densidad permiten obtener su valor. El mismo autor indica que se ha determinado que ambos módulos de elasticidad están bien correlacionados.

Navia (2006) señala que para que la medición del módulo de elasticidad sobre árboles en pie tenga validez tiene que existir una correlación significativa entre este método y la medición en trozas cortadas de estos mismos árboles o sobre pequeñas tablas libres de nudos. Wang *et al.* (2000) mencionan que varios autores han mostrado buenas correlaciones ($R^2 = 0,44$ a $0,89$) entre el MOE basado en la propagación de ondas y el MOE estático proveniente de pruebas tradicionales.

4. FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA MECÁNICA

Las diferencias en las propiedades mecánicas, la estabilidad dimensional o la durabilidad, pueden obedecer a razones poco evidentes tales como tipos y organización de las células dentro de los anillos de crecimiento, composición y cantidades de extractivos, orientación de las microfibrillas en las paredes celulares, o el espesor y la estructura de la pared secundaria (Arroyo 1983). León y Espinoza (2001) concuerdan con que las propiedades mecánicas guardan una estrecha relación con su estructura anatómica y se puede tener una visión global del posible comportamiento que experimente una madera dada ante determinado tipo de esfuerzos mediante el estudio de su estructura anatómica.

Probablemente la característica anatómica de mayor influencia en las propiedades de resistencia mecánica de la madera es el grosor de las paredes de las fibras, observándose que en aquellas maderas en donde se desarrollan fibras de paredes gruesas sus propiedades de resistencia son mayores a las de maderas con fibras de paredes delgadas; sin embargo, la resistencia mecánica es un conjunto de interacciones de las diferentes características anatómicas. (León y Espinoza 2001)

Schniewind, citado por León y Espinoza (2001), indica que la especie es un factor de gran importancia que influye en las propiedades mecánicas, incluso se presentan variaciones entre árboles y dentro del mismo árbol. El mismo autor añade que una gran parte de la variabilidad entre especies puede ser atribuida a las diferencias de peso específico.

Gutiérrez, citado por Chambergo y Aróstegui (1984), encontró que el módulo de ruptura en flexión estática, la resistencia máxima en compresión paralela y dureza de lados guardan

una relación lineal directa con el número de poros por mm^2 , y una relación inversa con el diámetro de la fibra.

León y Espinoza (2001) agregan que la longitud de las fibras ejerce un papel preponderante cuando se aplican esfuerzos en dirección paralela al grano (ej. resistencia a la compresión, la resistencia a la tensión y la dureza de los extremos); especies que desarrollen fibras de mayor longitud, van a desarrollar mayores valores en dichas propiedades.

Navia (2006) agrega que el ángulo microfibrilar es utilizado en la madera como indicador del módulo de elasticidad, contracción y ciertas características en papel. Además, indica que el ángulo de la microfibrilla de la capa S_2 es una de las principales variables que determinan las características mecánicas de la madera. A medida que el ángulo microfibrilar aumenta, el módulo de elasticidad disminuye. También advierte que es en la madera juvenil en donde el ángulo microfibrilar es mayor.

Por otro lado, los tratamientos silviculturales, tales como la manipulación del espacio entre árboles (distancia de siembra y posteriores aclareos) y la estimulación mediante el suministro de nutrientes y agua, han demostrado tener efectos significativos sobre algunas propiedades de la madera (Arroyo 1983).

Pashin y De Zeeuw (1980) señalan que los cambios por la edad o maduración del cambium, los factores genéticos y los factores ambientales tales como lluvias, temperatura y tratamientos silviculturales (los cuales afectan la disponibilidad de agua y nutrientes para el cambium) influyen en la actividad fisiológica del cambium.

El aumento de la oferta de madera proveniente de plantaciones de especies de rápido crecimiento manejadas en rotaciones cortas ha dado lugar a un aumento en la proporción de madera juvenil en las cosechas, donde las características de este tipo de maderas como la baja densidad, traqueidas cortas con lúmenes grandes, alto ángulo del grano, y alto ángulo microfibrilar, tiene como consecuencia una baja resistencia y módulo de elasticidad, además de pobre estabilidad dimensional comparada con la madera madura. (Lasserre *et al.*, citado por Navia 2006)

Vignote *et al.* (2013) mencionan que los primeros anillos que forma el árbol (madera juvenil), están constituidos por madera que posee unas características de comportamiento mecánico y físico diferentes a las del resto de la madera formada. Esta es más ligera, hasta

un 30 por ciento menor, con traqueidas o fibras más cortas, hasta un 100 por ciento menores, paredes celulares más delgadas, menor contenido en celulosa, más hemicelulosa, mayor desviación de la fibra, y una proporción más alta de madera de compresión que la madera de los pies ya maduros. El mismo autor añade que cuanto antes se poden o pierdan actividad las ramas del árbol, antes empezará a formar madera madura.

Los mismos autores aclaran que, fuera de los primeros años de crecimiento (madera juvenil), el turno de corta no influye directamente en la resistencia de la madera, manteniéndose relativamente constante.

5. COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO DE LA MADERA

Los materiales viscoelásticos lineales se caracterizan por tener un comportamiento intermedio entre un sólido elástico lineal (el cual cumple la ley de Hooke) y un fluido viscoso (que cumple la ley de Newton). Este comportamiento intermedio tiene capacidad de almacenar energía como un sólido elástico y disipar esta energía siguiendo la ley de los fluidos viscosos. (Evangelista y Afanador 2016)

Fombuena *et al.* (2017) explican que cuando en un material elástico aplica una carga y se mantiene constante, la deformación es instantánea y proporcional a la carga aplicada. Por el contrario, en un material puramente viscoso (fluido newtoniano), la deformación no es instantánea; es decir, la respuesta del material va a depender del tiempo y esta deformación no es reversible o recuperable.

Cornejo y Baettig (2009) señalan que la madera se comporta mecánicamente como un sólido viscoelástico, es decir, como un material que tiene un carácter elástico y también fluido, sobre todo en esfuerzos de larga duración.

El modelo elástico de la madera la idealiza como un sólido deformable Hookeano; no obstante, si intervienen otras variables físicas, aplicando el principio de superposición, el comportamiento de la madera puede idealizarse como viscoelástico, cuando interviene el factor tiempo; termoelástico, cuando la temperatura se hace presente; e higroelástico, cuando el contenido de humedad en la madera influye en el fenómeno elástico. (Sotomayor 2015)

Haines *et al.* (1996) mencionan que las propiedades viscoelásticas de la madera influyen en la diferencia de valores entre los módulos de elasticidad dinámicos y estáticos. Bodig y

Jayne, citados por Sotomayor y Villaseñor (2006), señalan que el carácter viscoelástico de la madera aumenta la rigidez aparente de las probetas debido a que la velocidad de carga en los métodos dinámicos es superior a la velocidad de carga en el método estático, por lo que se espera que el módulo de elasticidad dinámico sea mayor que el estático.

La velocidad de carga es un parámetro experimental que manifiesta el carácter viscoelástico de la madera. En otras palabras, la resistencia elástica aumenta cuando las deformaciones son provocadas por cargas súbitas o periódicas. Ese es el caso de las sollicitaciones dinámicas, tales como vibraciones y sollicitaciones de tipo acústico, por ejemplo, el ultrasonido y las ondas de esfuerzo. (Sotomayor 2015)

6. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES POR MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Ross (1999) define las pruebas no destructivas como una técnica para identificar las propiedades físicas y mecánicas de materiales sin alterar su capacidad de tener un uso final y emplear esta información para la toma de decisiones con respecto a las aplicaciones adecuadas. El mismo autor añade que esta tecnología de evaluación ha contribuido significativamente hacia la eliminación de las causas de frustración como lo son las quejas de los industriales, al ser la madera un material muy difícil de procesar, y del usuario de los productos, al no estar conformes con las distintas performances de los productos finales.

6.1. DETERMINACIÓN INDIRECTA DE LA DENSIDAD

Los métodos tradicionales de medida de la densidad implican la toma de probetas de árboles y la determinación del peso (a distintas condiciones de humedad) y volumen de las mismas (Kollman 1959). Notivol *et al.* (1992) añaden que, dada las características porosas e higroscópicas de la madera, se tropieza con ciertas dificultades al determinar el volumen por desplazamiento de fluidos, lo que demanda un tiempo elevado y no permite el manejo eficaz del gran número de muestras al que obliga este tipo de estudios. El mismo autor señala que, debido a esto, se recurren a procedimientos indirectos que permiten efectuar mediciones en árboles en pie, lo que implica un mayor rendimiento perdiendo precisión en los valores obtenidos por la estimación pero que, relativizada y para medidas comparativas, no presenta mayor importancia.

El equipo Pilodyn es un instrumento que determina la densidad de la madera y constituye un método indirecto que ha sido ampliamente usado en programas de mejoramiento forestal

alrededor del mundo (Hansen 2000). Kien *et al.* (2008) mencionan que merece ser el centro de atención por su simplicidad de uso y la relativa adecuación de la respuesta a los objetivos. Este equipo portátil dispara una aguja inyectora a fuerza constante, el cual permite medir la distancia de penetración de la aguja en la madera, siendo su valor inversamente proporcional a la densidad (Couto *et al.* 2013). Además de emplearse como una medida de densidad, la profundidad de penetración puede usarse también como medida de la intensidad y profundidad de la descomposición fúngica (Henriques *et al.* 2011).

En un estudio realizado por Giraldo *et al.* (2014), se validó el uso del equipo Pilodyn como criterio de selección y método alternativo para la valoración de la densidad en árboles en pie, efectuando el análisis en clones de *Eucalyptus pellita* F. Muell. La determinación de la densidad fue por tarugos y rodajas. Estos autores señalan que el uso de Pilodyn resulta en una estrategia poco eficiente para la estimación de la densidad en campo al nivel de árboles individuales debido a las modestas correlaciones; sin embargo, al nivel promedio de clones resulta ser muy eficiente, permitiendo evaluar de manera sencilla la densidad de clones sin incurrir en grandes esfuerzos de medición.

Lopez *et al.* (2010) encontró una correlación lineal altamente significativa entre densidad y Pilodyn en madera de *Grevillea robusta* ($R = -0,76$), explicando el modelo lineal el 57 por ciento del total de la variación observada al utilizar como variable dependiente la densidad y como variable independiente la profundidad de penetración del Pilodyn.

Monteoliva (s. f.), evaluó árboles clonales de Sauce (*Salix sp.*) de edades entre 7 – 8 años y 10 – 14 años, en diferentes sitios, para obtener una calibración del Pilodyn y predecir la densidad básica de la madera en pie. Con una densidad básica promedio de $0,41 \text{ g/cm}^3$ y una penetración promedio de 15 mm, se obtuvieron R^2 de 0,50 y 0,56 para los clones y sitio, respectivamente.

Panebra² realizó evaluaciones en madera de Tornillo y Capirona a tres condiciones de humedad (anhidro, equilibrio y saturado) en probetas y encontró buenas correlaciones entre densidad y penetración con el equipo Pilodyn. La penetración promedio para Tornillo fue de 20,52 mm, 12,76 mm y 13,18 mm, y para Capirona fue 8,89 mm, 5,69 mm y 3,68 mm, para

² Panebra, P. 27 nov. 2018. Evaluación no destructiva de la densidad en madera de plantaciones de dos especies forestales. (correo electrónico). Lima, Perú, UNALM.

las condiciones saturado, equilibrio y anhidro, respectivamente. La siguiente ecuación fue la establecida para la especie Capirona, con un R^2 de 0,76:

$$D = 1,34216 - 0,00997579 * P - 0,18032 * CH$$

Donde:

D : Densidad (g/cm^3)

P : Penetración (mm)

CH : Condición de humedad (1: Saturado; 2: Equilibrio; 3: Anhidro)

6.2. EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS EN LA MADERA

Dos propiedades fundamentales del material se miden con técnicas de onda de esfuerzo longitudinal: almacenamiento y disipación de energía. El almacenamiento de energía se manifiesta como la velocidad a la que una onda viaja en un material. En contraste, la velocidad a la que se atenúa una onda es una indicación de la disipación de energía. Jayne planteó la hipótesis de que estas propiedades están controladas por los mismos mecanismos que determinan el comportamiento estático de dicho material. (Wang *et al.* 2000)

Wang *et al.* (2000) mencionan que la propagación de ondas en la madera es un proceso dinámico que se relaciona internamente con las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Varios tipos diferentes de ondas pueden propagarse en estructuras de madera, como ondas longitudinales, ondas transversales y ondas de superficie (Rayleigh). De estas ondas, las ondas longitudinales viajan más rápido y son las más utilizadas para evaluar las propiedades de la madera.

Las técnicas de evaluación no destructiva de árboles en pie mediante propagación de ondas sonoras pueden predecir muchas propiedades y han ganado amplia aceptación en la industria de la madera para control de calidad y clasificación de productos (Wang *et al.* 2007; Auty y Achim 2008). Estas técnicas se caracterizan principalmente por su rapidez, bajo costo y por no afectar la estructura física del material en estudio. Entre otros métodos, el ultrasonido, las ondas de esfuerzo y las vibraciones transversales han demostrado su habilidad para

determinar la velocidad de onda y el módulo de elasticidad de la madera (Kawamoto y Williams 2002).

Recientemente se han desarrollado herramientas acústicas que miden el tiempo de vuelo (Tv) que demora en recorrer una onda una distancia conocida (Time-of-flight tools), como el TreeSonic (Fakopp Enterprise, Hungría). Estas herramientas, de enfoques no destructivos, sirven para medir rasgos importantes de la madera y consumen menos tiempo que el muestreo destructivo y, por lo tanto, son menos costosos (Nilsson 2014). El método de tiempo de vuelo relaciona la velocidad de una onda de estrés acústico en el tallo con el módulo de elasticidad dinámico (MOE_D) (Eckard *et al.* 2010). Soto *et al.* (2012) explica que estas metodologías se basan en la propagación de ondas de esfuerzo que viajan a través de una porción del fuste de un árbol o a lo largo de una troza.

Wang *et al.* (2007) señalan que el método de tiempo de vuelo (Tv) se basa en medir el tiempo de viaje de la onda de esfuerzo entre dos sensores acústicos ubicados a una distancia conocida. La velocidad se obtiene de la relación distancia (d) / tiempo (t) (Soto *et al.* 2012).

Bucur, citado por Auty y Achim (2008) señala que la relación entre la velocidad acústica, densidad y la rigidez de la madera es descrita por la siguiente ecuación de onda fundamental:

$$MOE_D = \rho * V^2$$

Donde:

MOE_D : Módulo de Elasticidad dinámico (Pa)

ρ : Densidad de madera (kg/m³)

V : Velocidad del sonido (m/s)

6.2.1. ANTECEDENTES

a. En árboles y trozas

Auty y Achim (2008) realizaron estudios de velocidad acústica (V) en dos plantaciones y un rodal de regeneración natural de *Pinus sylvestris* L. en el norte de Escocia para determinar si estas herramientas acústicas proporcionan predicciones confiables de las propiedades

mecánicas para esta especie. Mediante análisis de regresión entre la V y el módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) en flexión estática, demostraron una buena correlación entre la V y el MOE ($R^2 = 0,53$), y entre la V y el MOR ($R^2 = 0,59$). Las mismas relaciones se efectuaron utilizando V^2 y ρV^2 (donde ρ es la densidad verde; $MOE_D = \rho V^2$), sin embargo, los mejores resultados se obtuvieron utilizando sólo V. Los valores correspondientes de R^2 usando ρV^2 como predictor fueron 0,34 (MOE) y 0,46 (MOR).

En las especies Western hemlock y Sitka spruce, Wang *et al.* (2000) encontraron un R de 0,66 para la relación entre el MOE_D de árboles en pie y el MOE en flexión estática; y un R de 0,65 y 0,63 entre MOE_D y MOR para Western hemlock y Sitka spruce, respectivamente. Con respecto a la velocidad de onda medida, la primera especie presentó valores entre 2748 a 4175 m/s (MOE_D promedio de 9,44 GPa), y la segunda entre 2983 a 4224 m/s (MOE_D promedio 9,72 GPa).

Soto *et al.* (2012) estudiaron el MOE_D en árboles en pie y trozas de *Pinus radiata* de 28 años. Estos autores encontraron velocidades de propagación de árboles en pie, medido con el método acústico, de 3,61 km/s y 4,04 km/s; mientras que, en las trozas, las velocidades de propagación, medidas por método de resonancia, variaron entre 2,99 km/s y 3,20 km/s en trozas dentro de los primeros 5 m de altura del árbol, y entre 3,14 km/s y 3,36 km/s para trozas comprendidas entre los 5 m y 10 m. Con respecto a los MOE_D , los árboles en pie mostraron valores de 10,7 GPa (109 t/cm²) a 15,1 GPa (153 t/cm²), y de 7,8 GPa (79 t/cm²) a 9,4 GPa (95 t/cm²) en trozas de ambos niveles.

El INIA (2018) realizó estudios de módulo de elasticidad dinámico en dos plantaciones de Capirona de 19 años ubicadas en Tarapoto (San Martín) e Irazola (Ucayali), utilizando el equipo Treasonic Timer. En ellas, se encontraron MOE_D que variaron desde 36 579,68 a 126 166,91 kg/cm² en Tarapoto, y de 93 753,59 a 138 775,46 kg/cm² en Irazola. Las condiciones de pendiente pronunciada en Tarapoto resultan en una mayor variabilidad (CV=51,41%) de los datos, en comparación con Irazola (CV=9,59%). Además, se encontró que el crecimiento de madera de reacción como mecanismo de defensa frente a la pendiente influyen de manera proporcional en la velocidad de transmisión de ondas en los árboles y con ello el MOE.

b. En probetas

Niemz *et al.* (1994) ensayó distintas especies, entre latifoliadas y coníferas, provenientes de Chile, de densidades variables y en probetas de madera con el equipo Silvatest. En especies

latifoliadas de densidad entre 0,57 g/cm³ y 0,69 g/cm³, se encontraron velocidades de propagación entre 4476 m/s y 5049 m/s a un C.H. promedio de 11 por ciento. De manera análoga, en las coníferas de densidades y C.H. similares, se encontraron velocidades de propagación entre 4706 m/s y 5036 m/s. Los autores concluyen que al aumentar la densidad se produce un aumento de la velocidad del sonido.

Carnero (2007) realizó comparaciones entre MOEs longitudinales y transversales por métodos no destructivos y destructivos para probetas de 30 especies tropicales. Encontró que los equipos que miden tiempo de propagación de onda (Microsecond Timer y Ultrasonic Timer) presentan altos coeficientes de correlación que permiten predecir el MOE en flexión estática. Además, señala que el método de Vibración Transversal es un método eficaz en la determinación de MOE en flexión para maderas de distintas densidades.

Sucksmith (2009) ensayó el método de propagación de ondas longitudinal (23 kHz y 45 kHz) y el método de vibración longitudinal y transversal usando la transformación de Fourier rápida (FFT) en probetas de *Cedrelinga cateniformis* y encontró que ambos eran válidos y eficientes para estimar MOEs longitudinales y transversales. En la Tabla 3 se puede observar los coeficientes de correlación para cada comparación.

Tabla 3: Coeficientes de correlación entre métodos destructivos y no destructivos en probetas de *Cedrelinga cateniformis*

<i>Método destructivo</i>	<i>Método No destructivo</i>	<i>Coef. correlación</i>
Flexión estática	Propagación onda 23 kHz	0,88
Flexión estática	Propagación onda 45 kHz	0,88
Flexión estática	FFT Flexión	0,88
Flexión estática	FFT Vibración longitudinal	0,86
Compresión paralela	Propagación onda 23 kHz	0,84
Compresión paralela	Propagación onda 45 kHz	0,83
Compresión paralela	FFT Vibración longitudinal	0,79

FUENTE: Elaborado con base en Sucksmith (2009).

6.2.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO

Es necesario el considerar las diversas variables que influyen en el mecanismo de propagación de ondas en la madera, principalmente las características de microestructura y composición química del material. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que estas

características pueden ser alteradas en función de las especies (coníferas o latifoliadas), las condiciones de pudrición y tratamientos preservativos en el caso de piezas de madera. (Raquelé 2004)

La misma autora, citando a distintos autores (Bodig y Jane, Fengel y Wegener, Bucur y Bohnke, Bucur, entre otros) señala que se puede afirmar que la velocidad de propagación de ondas varía según los siguientes términos:

- Es mayor en la dirección longitudinal (propagación en dirección de las fibras) que en la radial (propagación en dirección de los radios), siendo menor aún en la dirección tangencial (propagación desorientada).
- Es mayor cuanto mayor es la longitud de las fibras.
- Es menor cuanto mayor es la porosidad y la permeabilidad de la pared celular, considerando una densidad constante.
- Es mayor cuanto mayor es la densidad, en cualquiera de las tres direcciones de la madera, considerando un contenido de humedad constante a lo largo de la muestra.
- Es mayor cuanto mayor es la continuidad de regiones cristalinas de la pared celular (mayor ocurrencia de celulosa), decreciendo con el aumento de regiones amorfas (mayor ocurrencia de lignifica y hemicelulosa).

Bucur (1995) señala que propiedades físicas de la madera como la densidad y la estructura de los anillos de crecimiento (proporción madera temprana y tardía) influyen en la propagación de ondas ultrasónicas. En cuanto a la densidad, menciona que no presenta una relación fuerte; por otro lado, se han encontrado resultados variables en relación con la proporción de madera temprana y tardía, reportando mayores velocidades en madera tardía de pino, y ninguna diferencia entre madera temprana y tardía en Sitka spruce.

Con respecto a la curvatura de los anillos, el mismo autor añade que estas influyen en la propagación de ondas transversales sólo en dirección tangencial, mas no en la dirección de los radios.

Raquelé (2004) añade que existe una fuerte relación entre la velocidad de propagación de ondas y la humedad, indicando que influyen en el efecto intrínseco de la rigidez y la

densidad de la madera. El agua libre aumenta la atenuación resultando en una disminución de la velocidad en las direcciones longitudinal, radial y tangencial.

Lindström *et al.*, citado por Navia (2006), encontró que el ángulo microfibrilar está fuertemente correlacionado (-0,78) con el módulo de elasticidad dinámico, indicando que las herramientas acústicas portátiles pueden ser usadas para la producción de árboles con bajo ángulo microfibrilar y asociarlo con la propensión a la deformación de la madera juvenil.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. LUGAR DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS

Los ensayos por métodos destructivos tuvieron lugar en el Laboratorio de Propiedades Tecnológicas de la Madera del Departamento de Industrias Forestales de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

Los ensayos por el método no destructivo en trozas se realizaron en las instalaciones del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA).

2. ESPECIE

Las muestras de madera corresponden a la especie *Calycophyllum spruceanum* (Capirona), que pertenece a una plantación experimental de 19 años de edad, ubicada en Ucayali.

3. MATERIALES Y EQUIPOS

3.1. EVALUACIÓN DE PLANTACIÓN Y EXTRACCIÓN DE ÁRBOLES

- Treasonic Timer marca FAKOPP
- Pilodyn 6J Forest marca TerraGes
- Cinta diamétrica
- Brújula
- GPS
- Motosierra

3.2. PREPARACIÓN DE PROBETAS

- Sierra cinta
- Garlopa
- Sierra circular

- Wincha
- Escuadra

3.3. EJECUCIÓN DE ENSAYOS MECÁNICOS

- Prensa Universal "Tinius Olsen" y accesorios
- Balanza de precisión de 0,1 g
- Vernier digital con precisión de 0,01 mm
- Cámara digital

3.4. OTROS MATERIALES

- Spray
- Rafia
- Plástico film
- Plumones para madera
- Lápices de cera

4. METODOLOGÍA

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El trabajo en campo se desarrolló en la plantación de 19 años de edad “Bancos de Conservación y Huertos Semilleros de Bolaina blanca (*Guazuma crinita*), Capirona (*Calycophyllum spruceanum*) y Pijuayo (*Bactris gasipaes*)”, ubicada al margen derecho del km. 98 de la carretera Federico Basadre, en dirección Pucallpa - Lima. Políticamente pertenece a la región Ucayali, provincia de Padre Abad, distrito de Irazola, localidad de San Alejandro. Geográficamente pertenece a la Cuenca del Río Amazonas. De acuerdo a la clasificación de Holdridge (1987), el área de estudio se encuentra dentro de la zona de vida bosque húmedo tropical (bhT).

Flores (2002) menciona que la temperatura promedio en la Estación Experimental Alexander Von Humboldt, distanciada a 12 km. del lugar de estudio, es 26,7° C; mientras que la temperatura máxima promedio y mínima promedio es de 29,3° C y 24° C, respectivamente. La humedad relativa promedio es de 78,9 por ciento y la precipitación promedio es de 3600 mm, siendo de noviembre a marzo los meses más lluviosos, y de abril a octubre los meses más secos. El mismo autor señala que los suelos son de origen sedimentario, de textura arcillosa a arcillo-arenosa, de pobre drenaje y fácilmente compactables, con un pH promedio de 5,1. La Tabla 4 presenta la información general de la plantación estudiada y en la Figura 1 se aprecia una fotografía de la misma.

Tabla 4: Información de la plantación en estudio

Fecha de instalación	1998
Tipo de plantación	Campo abierto
Distanciamiento	2,5 m x 2,5 m
Altitud	264 msnm
Pendiente	Suave
Información general	DAP promedio: 23 cm Altura total promedio: 22,5 m Altura comercial promedio: 13 m Algunos individuos con presencia de aletas hasta los 25-30 cm
Otras observaciones	Presencia de cacao alrededor de la plantación.

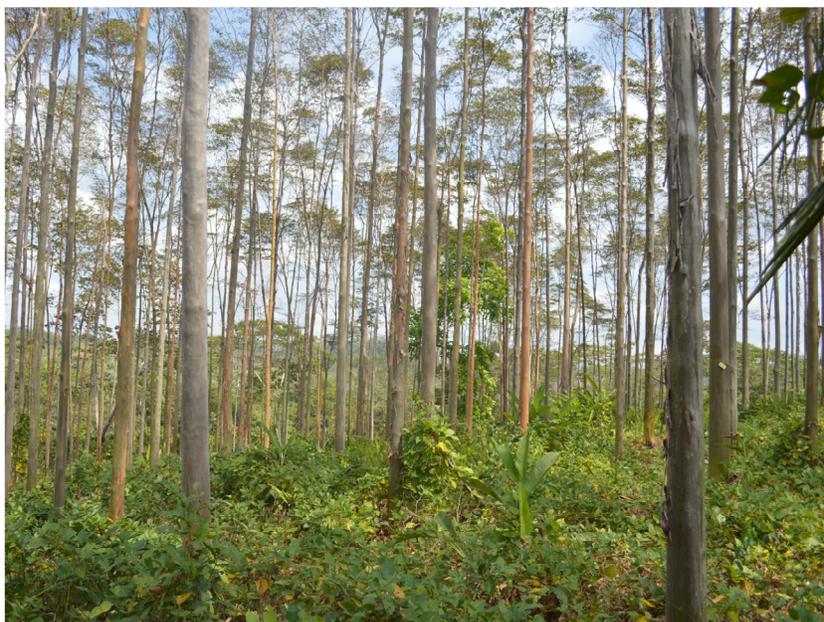


Figura 1: Plantación de Capirona

4.2. SELECCIÓN Y COLECCIÓN DE MUESTRAS

Se eligieron aleatoriamente 18 árboles de la plantación sin evidencia de daño o enfermedad y evitando el efecto de borde. Estos fueron evaluados tomando datos de diámetro a la altura del pecho (DAP = 1,30 m), altura comercial en metros (HC), penetración en milímetros al DAP y el tiempo de recorrido de una onda en microsegundos, con los equipos Pilodyn y Treasonic Timer, respectivamente. De los árboles evaluados, se seleccionaron tres individuos, los cuales fueron tumbados y seccionados en trozas de 1,5 m. La Figura 2 muestra la ubicación de la plantación, los árboles evaluados y los seleccionados para cortar.

La elección de los árboles a cortar consistió en los siguientes pasos:

- Se obtuvieron los promedios de los cuatro parámetros mencionados en el párrafo anterior.
- Se identificaron los árboles que tuvieron los valores más cercanos al promedio de cada parámetro.
- Se seleccionaron los tres árboles con más parámetros cercanos al promedio de todos los evaluados.

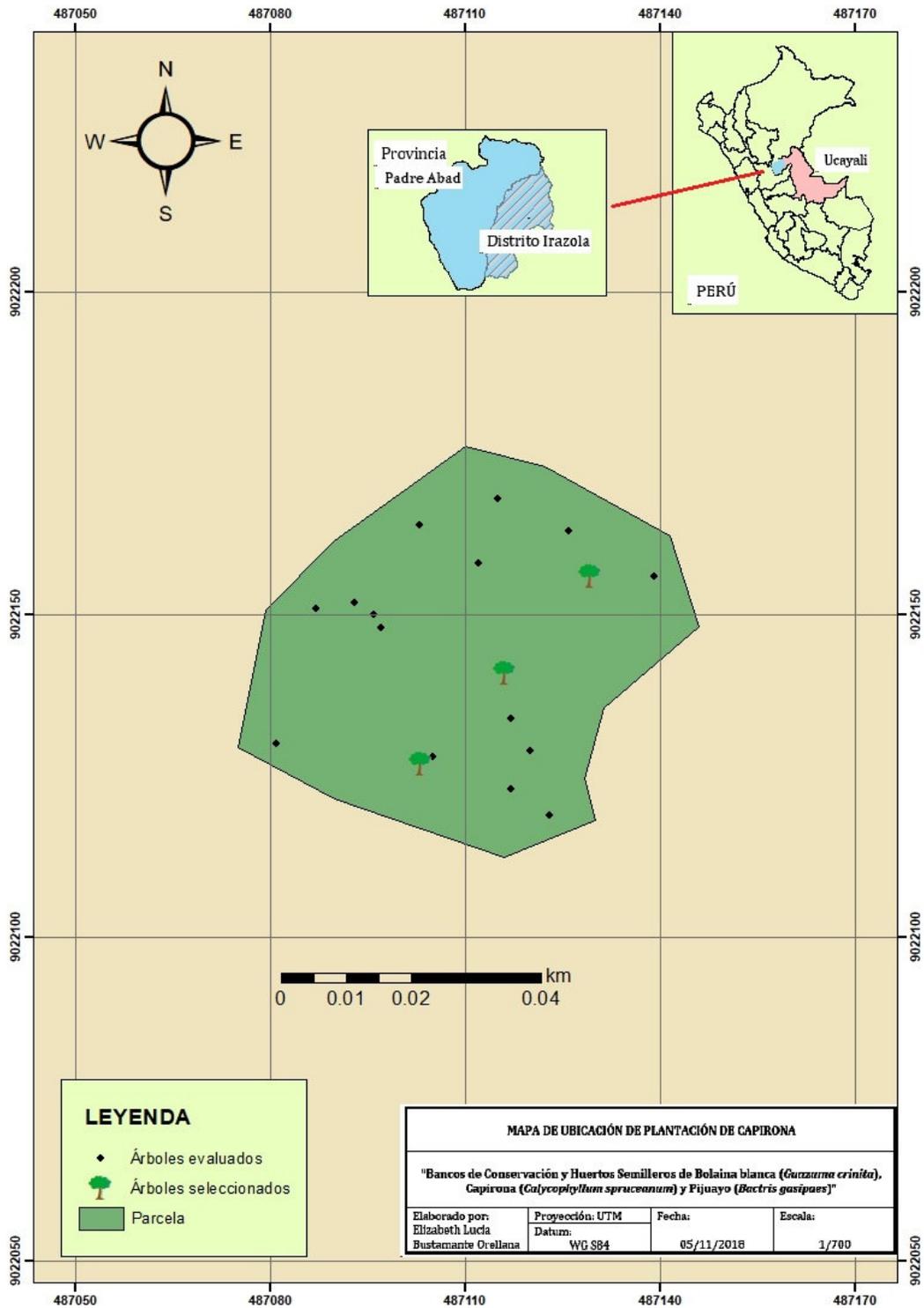


Figura 2: Mapa de la plantación y ubicación de los árboles

4.3. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN TROZAS

Los equipos Pilodyn (Figura 3) y Treasonic Timer (Figura 4) fueron utilizados para estimar densidad y calcular el módulo de elasticidad dinámico, respectivamente. Los ensayos no destructivos se llevaron a cabo en cada troza obtenida, efectuando cuatro mediciones en cada una de acuerdo a los ejes cardinales señalados en ellas (Norte, Sur, Este, Oeste).

El promedio de las cuatro mediciones realizadas tanto para penetración como para el tiempo de recorrido de la onda en cada troza se asumió como el promedio total por troza debido a que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las orientaciones.

No se realizaron mediciones del contenido de humedad en las trozas, sin embargo, se asume que es mayor al 30 por ciento (saturado) ya que la evaluación se realizó a los pocos días del trozado de las mismas.



Figura 3: Equipo Pilodyn y accesorios

FUENTE: Tomado de INIA (2018).



Figura 4: TreeSonic Timer y accesorios

4.3.1. EVALUACIÓN CON PILODYN

El uso del Pilodyn se efectuó según Hansen (2000). Se apoyaron los pines del equipo en la superficie de la troza, en el punto medio (a 0,75 m), los cuales se ubicaron de manera paralela al eje longitudinal de ellas (Figura 5), seguidamente, se disparó la aguja de acero sobre la madera y se tomó una lectura de la profundidad de penetración en la escala señalada por el instrumento (mm) (Figura 6).

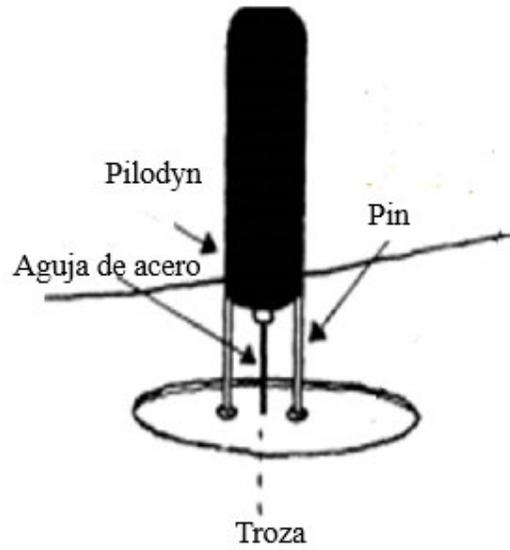


Figura 5: Apoyo de pines en la superficie de la troza

FUENTE: Adaptado de Hansen (2000).



Figura 6: Evaluación no destructiva con Pilodyn

La estimación de la densidad se realizó mediante la ecuación (1), establecida por Panebra²:

$$D = 1,34216 - 0,00997579 * P - 0,18032 * CH \quad (1)$$

Donde:

D : Densidad (g/cm³)

P : Penetración (mm)

CH : Condición de humedad (1: Saturado; 2: Equilibrio; 3: Anhidro)

4.3.2. EVALUACIÓN CON TREESONIC TIMER

La evaluación se realizó según el manual de usuario del equipo Treesonik Timer (Fakopp Enterprise 2005). Se conectaron los sensores de entrada y salida a los conectores *START* y *STOP* del temporizador (Figura 7). Posteriormente se introdujeron las puntas de los transductores en cada troza, distanciados de 0,8 m (0,4 m por arriba y abajo del punto medio de la troza) y se golpearon con un martillo sobre el sensor de entrada para generar la medición, realizando tres repeticiones por eje cardinal (Figura 8). Se tomó lectura del tiempo de propagación de la onda en la escala señalada por el equipo (μ s).



Figura 7: Conexión de los sensores a los conectores *START* y *STOP*.



Figura 8: Evaluación no destructiva con Treasonic Timer.

Empleando la lectura del tiempo de recorrido y la distancia entre los sensores, se calculó la velocidad del sonido a través del plano longitudinal del árbol según la ecuación (2) (Soto *et al.* 2012). Los datos de velocidad fueron corregidos en +4 m/s de acuerdo a especificaciones de Fakopp (Navia 2006).

$$V = D / t \quad (2)$$

Donde:

V : Velocidad del sonido (m/s)

D : Distancia entre los sensores (m)

t : Tiempo de propagación del sonido (s)

El módulo de elasticidad dinámico fue calculado de acuerdo a la ecuación (3) (Bucur, citado por Auty y Achim 2008). Sin embargo, para expresar los resultados de MOE_D en kg/cm^2 , el MOE_D se dividió entre el valor de la aceleración, $9,81 m/s^2$.

$$MOE_D = \rho V^2 \quad (3)$$

Donde:

MOE_D : Módulo de Elasticidad dinámico (Pa)

ρ : Densidad verde de madera (kg/m^3)

V : Velocidad del sonido (m/s)

4.4. PROCESAMIENTO DE TROZAS Y PREPARACIÓN DE PROBETAS

Se obtuvo un total de 26 trozas de 1,5 m de largo cada una, codificadas con el número de árbol, nivel de la troza (en función de la altura), además de marcar el Norte y la base. El número de trozas correspondiente por árbol y nivel se observan en la Tabla 5. En el Anexo 3 se presenta la información de cada troza evaluada.

Tabla 5: Número de trozas por árbol y distribución por niveles de corte

Árbol	N° trozas	Distribución de trozas por niveles		
		B	I	A
1	6	2	2	2
2	10	3	4	3
3	10	3	4	3

B: nivel basal; I: nivel intermedio; A: nivel apical.

Las probetas se elaboraron en CITE madera siguiendo lo establecido por las Normas Técnicas Peruanas de acuerdo al ensayo correspondiente.

La disposición de los listones del cual se obtuvieron las probetas se muestra en las Figuras 9 y 10. Con el objetivo de tener una correlación más certera entre los métodos no destructivos y los destructivos, las probetas correspondientes al ensayo de flexión estática, compresión

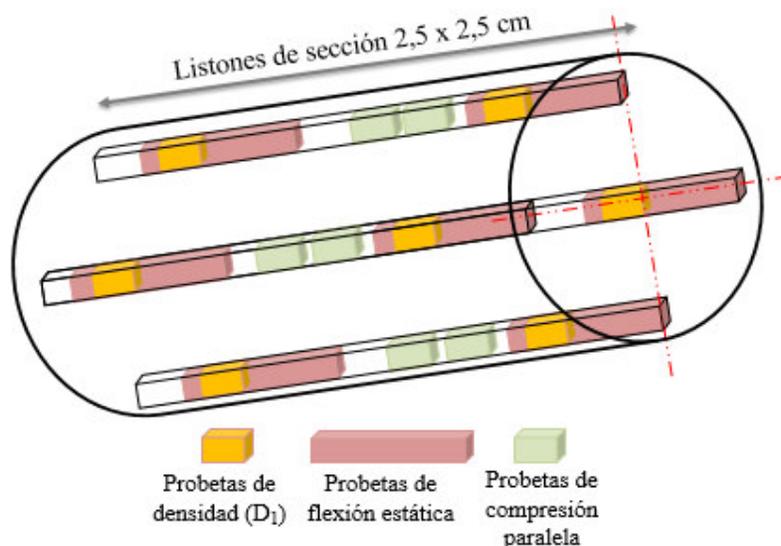


Figura 10: Vista tridimensional de listones de 2,5 x 2,5 cm en la troza

4.5. ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y CÁLCULO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO

4.5.1. DENSIDAD Y CONTENIDO DE HUMEDAD

La densidad verde (CH > 30%) fue determinada de dos maneras distintas. La primera corresponde a la metodología descrita en la Norma Técnica Peruana 251.011:2014, “MADERA. Método para determinar la densidad”, empleando la medición indirecta por inmersión en agua. Las probetas fueron extraídas de las probetas correspondientes a flexión estática luego de realizar este ensayo en la prensa universal, ubicadas lo más cerca posible a la falla (Figura 11). A la densidad hallada de esta manera se le denominó D₁. Estas probetas también fueron utilizadas para el cálculo de densidad básica (DB) y el contenido de humedad. Este último según la Norma Técnica Peruana 251.010:2014, “MADERA. Métodos para determinar el contenido de humedad”.

Debido a que el proceso de medición y ensayo de esta propiedad demanda un periodo de tiempo prolongado, el segundo método consiste en la estimación de la densidad empleando el equipo Pilodyn. De tal manera, se estimó la densidad mediante la ecuación (1) establecida por Panebra², a la cual se le nombró D₂. (Ver punto 4.3.1.)

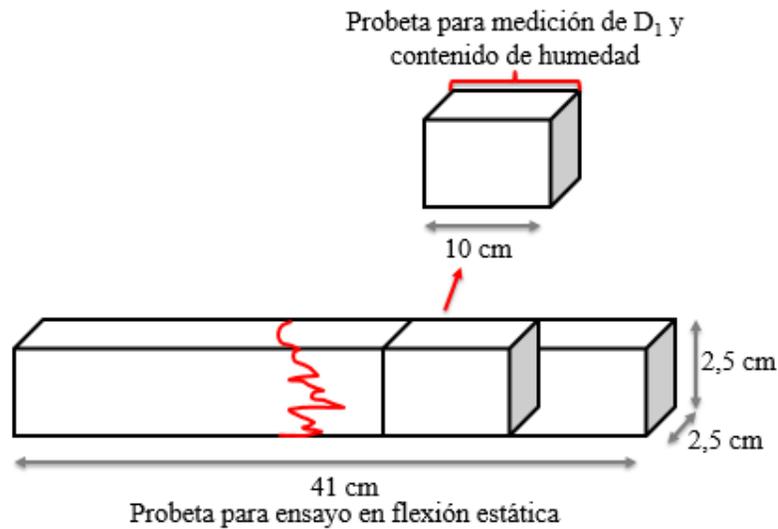


Figura 11: Probeta para medición de densidad y contenido de humedad

4.5.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO

El cálculo del MOE_E se llevó a cabo en condición verde ($CH > 30\%$) en dos propiedades, flexión estática, ecuación (4); y compresión paralela al grano, ecuación (5). Los ensayos se realizaron en una prensa universal según las Normas Técnicas Peruanas para cada propiedad: NTP 251.017:2014, “MADERA. Método para determinar la flexión estática”; y NTP 251.014:2014, “MADERA. Método para determinar la compresión axial o paralela al grano”. El promedio por troza para cada propiedad fue calculado en base a los resultados de todas las probetas que se obtuvieron de dicha troza.

$$MOE_F = (P L^3) / (4ae^3 Y) \quad (4)$$

Donde:

MOE_F : módulo de elasticidad en flexión (kg/cm^2)

P' : carga al límite proporcional (kg)

L : distancia entre los soportes, luz de la probeta (cm)

a : ancho de la probeta (cm)

e : espesor de la probeta (cm)

Y : deflexión en el centro de la luz al límite proporcional (cm)

$$MOE_{C//} = (P L) / (AD) \quad (5)$$

Donde:

MOE_{C//}: módulo de elasticidad en compresión paralela (kg/cm²)

P' : carga al límite proporcional (kg)

L : distancia entre las abrazaderas del deflectómetro (cm)

A : área de la sección transversal de la probeta calculada antes del ensayo (cm²)

D : deformación experimentada por la probeta al límite proporcional (cm)

4.6. CÁLCULO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO

El cálculo del MOE_D se realizó según el punto 4.3.2. del presente capítulo; empleando la velocidad de propagación y la densidad hallada por dos métodos, inmersión en agua (D₁) y estimación indirecta con Pilodyn (D₂) (ver punto 4.5.1.). De acuerdo a esto, se obtuvieron dos MOE_D, el primero en el cual se usó D₁, denominado MOE_{D1}; y el segundo en el que se usó D₂, denominado MOE_{D2}.

4.7. EVALUACIÓN POR NIVELES DE CORTE

Las trozas de los árboles fueron agrupadas en niveles de tal manera que cada uno tenga un número de trozas proporcional al total de la altura comercial (HC) de cada árbol. El nivel "B" corresponde a la parte basal, comprendido entre el 0 por ciento y 31 por ciento de la HC; el "I" corresponde a la zona intermedia, entre el 32 por ciento y 68 por ciento; mientras que el nivel "A", correspondiente a la zona apical, fue considerado del 69 por ciento al 100 por ciento de la HC.

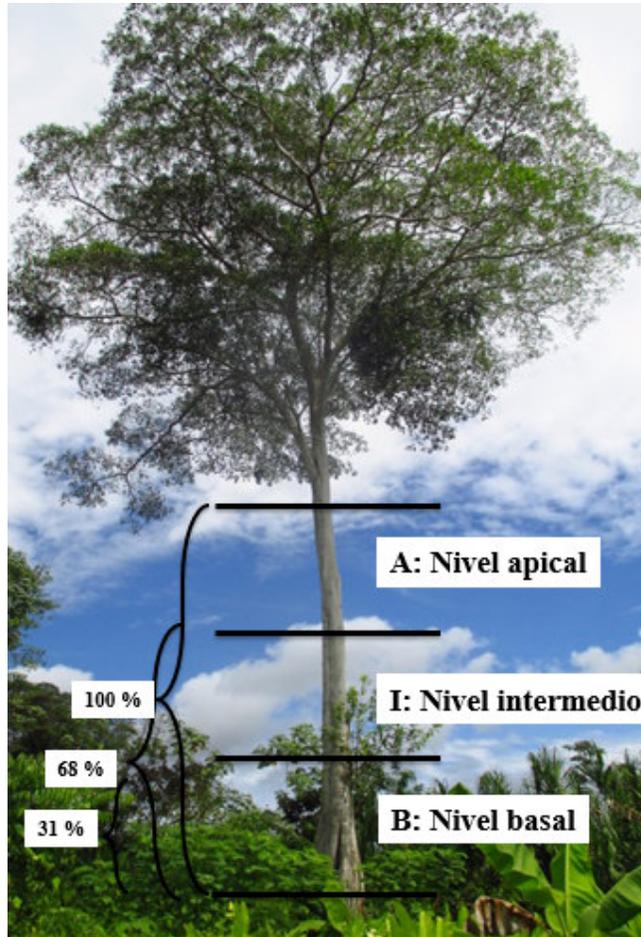


Figura 12: Distribución de niveles de corte en el árbol

4.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para describir la densidad, velocidad de propagación de ondas, el MOE_D y el MOE_E se realizó un análisis descriptivo utilizando medidas de posición (media, mínimo y máximo) y dispersión (coeficiente de variación).

La variación a nivel longitudinal de las propiedades se determinó a través de un análisis de varianza (ANOVA) para comprobar si existen diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) entre las medias de los niveles basal, intermedio y apical. Previo a la realización de estas comparaciones, se verificaron los supuestos de normalidad de los errores y homogeneidad de varianzas.

Cuando se encontraron diferencias significativas entre las medias de los niveles, se realizó una prueba de comparaciones múltiples mediante el test de Tukey para precisar qué niveles difieren entre sí.

Cuando no se cumplieron los supuestos de normalidad y/o homogeneidad de varianzas, se empleó la prueba de Kruskal-Wallis, correspondiente a los métodos no paramétricos. Con esta prueba se verificó si existen diferencias entre las medianas de los niveles de corte descritos para las propiedades en estudio. Para evaluar qué niveles difieren entre sí, se utilizó la prueba de Mann-Whitney con corrección de Bonferroni.

Con respecto a las tablas que presentan los ANOVA y las pruebas de Kruskal-Wallis, el asterisco que se encuentra en *Significancia* indica que se presentan diferencias estadísticamente significativas entre los niveles evaluados; por otro lado, *N.S.* indica que no existen diferencias significativas. Los grupos homogéneos se identifican según la letra que presenten en *Prueba de comparación*, aquellos niveles que compartan la misma letra no presentarán diferencias significativas.

Todas las pruebas estadísticas se realizaron empleando los programas Statgraphics Centurion y Past 3.04, a un nivel de significancia $\alpha=0,05$.

Una vez realizado los análisis descriptivos y comparativos, se procedió con los análisis predictivos mediante análisis de regresión lineal entre MOE_D y las propiedades mecánicas. Esto se hizo con el fin de estudiar el grado de asociación entre las variables, de esta manera establecer un nivel de validez del método no destructivo empleando el Treasonic Timer. De igual manera se realizaron regresiones entre V y las propiedades en estudio.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. DENSIDAD

Los resultados obtenidos por los distintos métodos para el cálculo de la densidad, de acuerdo a los niveles de corte, se presentan en la Tabla 6.

Se aprecia una tendencia de disminución del promedio de densidad básica (DB) con la altura. Por otro lado, en densidad verde, los promedios de I y A son iguales, pero menores que B, lo cual podría explicarse por el mayor contenido de humedad en A en comparación con I ya que, a un mayor contenido de humedad, se produce un incremento en el peso de la madera. Los resultados coinciden con lo planteado por Arroyo (1983) y Megraw (1985), quienes indican que la densidad disminuye conforme aumenta la altura. Gamez (2009) encontró el mismo comportamiento de la DB evaluada a distintos niveles de fuste en Capirona.

Sólo D₂ cumplió con los supuestos de normalidad de los errores y homogeneidad de varianzas, por lo que se usó la prueba ANOVA. El análisis a nivel longitudinal para DB y D₁ se realizó mediante las pruebas Kruskal-Wallis y Mann-Whitney con corrección de Bonferroni al no cumplir con el segundo supuesto. Los resultados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 6: Valores promedio de densidad básica y densidad verde determinada por los diferentes métodos según el nivel de corte

		<i>Nivel</i>	<i>C.H. (%)</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mediana</i>	<i>C.V. (%)</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
<i>Densidad básica (g/cm³)</i>		B	58,15	0,71	0,71	4,67	0,61	0,77
		I	60,16	0,68	0,68	3,71	0,59	0,73
		A	64,20	0,66	0,66	3,96	0,61	0,71
<i>Densidad (g/cm³)</i>	<i>D₁</i>	B	58,15	1,12	1,12	3,57	1,00	1,21
		I	60,16	1,09	1,10	4,31	0,98	1,20
		A	64,20	1,09	1,08	5,45	0,96	1,21
	<i>D₂</i>	B	Saturado	1,06	1,06	0,73	1,05	1,07
		I	Saturado	1,05	1,05	0,70	1,04	1,07
		A	Saturado	1,05	1,05	0,82	1,03	1,07

Tabla 7: Análisis de varianza y prueba de Kruskal-Wallis entre niveles de corte

		<i>Prueba</i>	<i>Nivel</i>	<i>Significancia</i>	<i>Prueba de comparación</i>
<i>Densidad básica (g/cm³)</i>		Kruskal-Wallis	B	*	a
			I		b
			A		c
<i>Densidad (g/cm³)</i>	<i>D₁</i>	Kruskal-Wallis	B	*	a
			I		b
			A		b
	<i>D₂</i>	ANOVA	B	*	a
			I		b
			A		b

* : *Significativo*

De manera gráfica, se puede ver en la Figura 13 la variación de la densidad según los métodos empleados. La variación de D_2 (estimación con Pilodyn) es notoriamente menor en comparación con D_1 , además se aprecia que D_2 subestima la densidad. Esto se debe a que este equipo registra la profundidad de penetración de manera puntual, para la cual se pueden presentar distintas densidades. Notivol *et al.* (1992) indican que en la estimación por Pilodyn se pierde precisión en los valores obtenidos, pero no presenta mayor importancia para medidas comparativas. En la misma Figura también se observa la tendencia de disminución con la altura.

Mediante una prueba de Kruskal-Wallis se evidenció que ambos métodos arrojan diferencias estadísticas significativas para determinar densidad (Figura 14), por lo cual se decidió trabajar con los dos métodos para el cálculo del MOE_D .

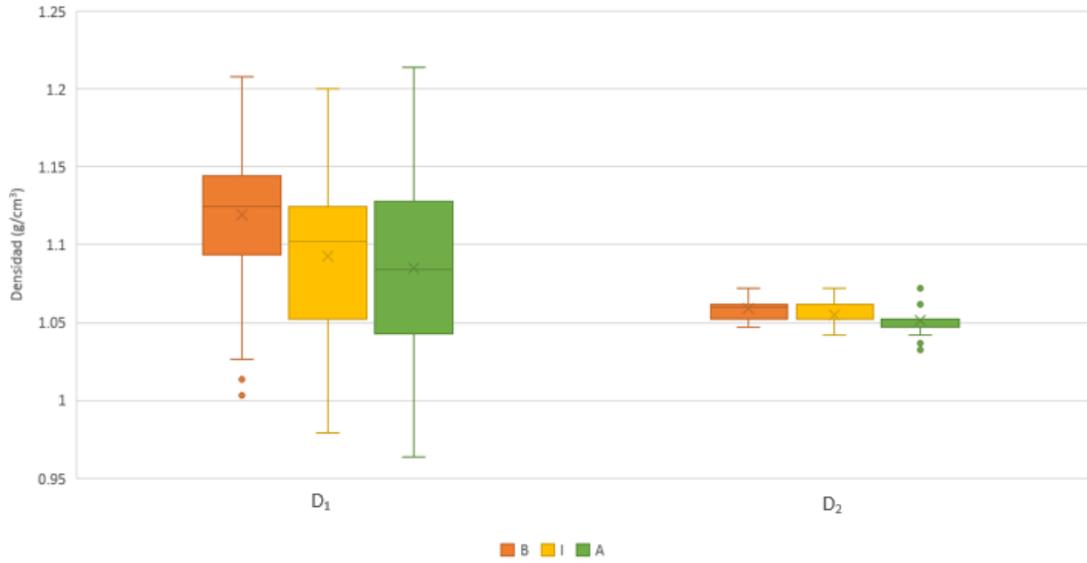


Figura 13: Diagrama de cajas entre los métodos para determinar densidad

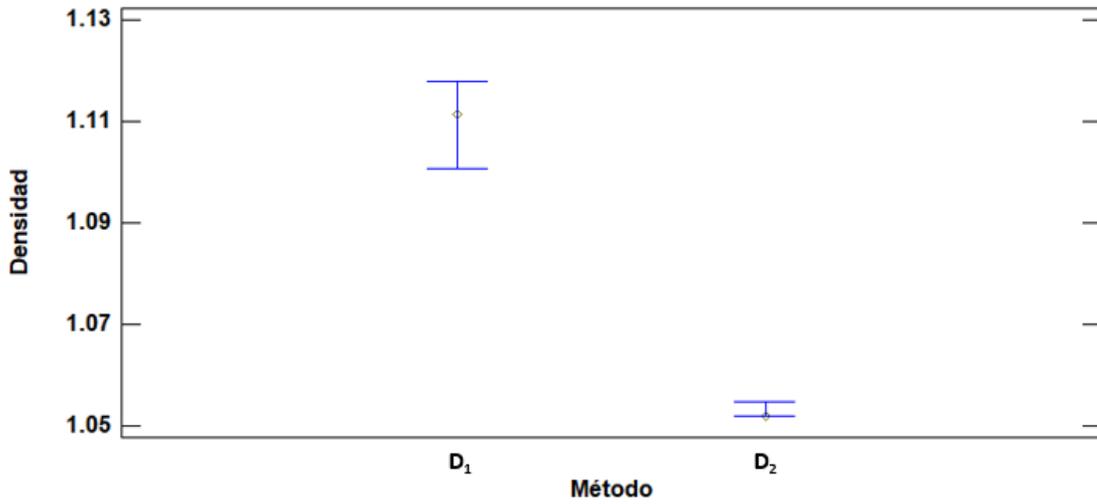


Figura 14: Gráfico de medianas con intervalos del 95% de confianza entre los métodos para determinar densidad

2. MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO

La Tabla 8 presenta los estadísticos descriptivos de los ensayos de flexión estática y compresión paralela; mientras que en la Tabla 9 se muestra el ANOVA y prueba de Kruskal-Wallis según los niveles de corte. Sólo ELP en flexión estática y MOE en compresión paralela cumplieron con los supuestos para realizar un ANOVA; las otras propiedades sólo cumplieron con el supuesto de normalidad de los errores, mas no el de homogeneidad de varianzas, de modo que se realizaron los test correspondientes a las pruebas no paramétricas.

Las pruebas de significancia indican que sólo existe diferencia significativa entre niveles de corte para las medianas de MOE y MOR en flexión estática.

En compresión paralela se observa un patrón de disminución de los promedios de las propiedades con respecto a la altura, sin embargo, esta reducción de los valores no es significativa estadísticamente. Por otro lado, en flexión estática sólo se observa esta tendencia en MOR, en contraste con las otras propiedades, las cuales presentan un aumento de B hacia I para luego disminuir en A.

Estos resultados muestran similitud con los que obtuvo Pantigoso (2009), quien encontró una escasa influencia de los niveles de corte sobre las propiedades mecánicas de Capirona procedente de una plantación de 9 años. Sólo se presentaron diferencias significativas en flexión estática, en la cual el nivel medio y apical eran similares pero diferentes del basal.

Tabla 8: Valores promedio de flexión estática y compresión paralela según el nivel de corte

<i>Propiedad</i>		<i>Nivel</i>	<i>C.H. (%)</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mediana</i>	<i>C.V. (%)</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Flexión estática (kg/cm²)	MOE x1000	B	58,18	123,69	125,71	14,42	86,14	159,60
		I	59,78	125,02	124,86	13,93	87,56	164,78
		A	64,20	117,49	117,60	8,67	92,56	139,96
	ELP	B	58,18	581,98	570,41	13,87	346,13	810,09
		I	59,78	601,14	603,21	13,01	441,73	798,66
		A	64,20	581,98	586,47	11,90	439,12	713,95
	MOR	B	58,18	1029,12	1025,29	12,60	673,62	1353,47
		I	59,78	1021,80	1018,80	10,99	707,51	1252,27
		A	64,20	970,33	987,17	9,57	721,70	1116,75
Compresión paralela (kg/cm²)	MOE x1000	B	63,09	163,54	163,54	17,35	102,14	223,68
		I	66,42	158,60	158,60	18,06	105,10	222,41
		A	68,42	158,29	158,29	19,38	102,95	223,95
	ELP	B	63,09	283,00	287,13	23,60	130,67	432,83
		I	66,42	271,70	272,93	18,23	171,36	443,04
		A	68,42	262,45	263,64	19,45	162,10	367,38
	RM	B	63,09	438,96	449,50	14,11	320,32	537,51
		I	66,42	435,78	438,33	10,24	307,79	535,10
		A	68,42	426,03	423,75	9,80	303,48	512,13

Tabla 9: Análisis de varianza y prueba de Kruskal-Wallis entre niveles de corte

<i>Propiedad</i>		<i>Prueba</i>	<i>Significancia</i>	<i>Prueba de comparación</i>
Flexión estática	ELP	ANOVA	N.S.	-
	MOR	Kruskal-Wallis	*	B: a I: a A: b
	MOE	Kruskal-Wallis	*	B: a I: a b A: b
Compresión paralela	ELP	Kruskal-Wallis	N.S.	-
	RM	Kruskal-Wallis	N.S.	-
	MOE	ANOVA	N.S.	-

N.S. : No significativo

* : Significativo

3. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO

Los valores de velocidad y MOE_D por troza se presentan en la Tabla 10. Cada MOE_D representa el módulo de elasticidad hallado con cada uno de los métodos de determinación de densidad, según se indica en el capítulo anterior. El MOE_{D1} es aquel en el que se usó D_1 (densidad hallada según la NTP), mientras que en MOE_{D2} se utilizó D_2 (densidad estimada con el equipo Pilodyn). Por otro lado, la Tabla 11 resume los valores de estas propiedades según el nivel de corte. En esta última se observa un aumento de los promedios desde la base (B) hacia la zona intermedia (I) para luego disminuir nuevamente hacia el ápice (A).

Tabla 10: Velocidad acústica y módulo de elasticidad dinámico medidos en trozas

<i>Nivel</i>	<i>N°</i>	<i>Velocidad (m/s)</i>	<i>$MOE_{D1} \times 1000$ (kg/cm²)</i>	<i>$MOE_{D2} \times 1000$ (kg/cm²)</i>
B	1	4098	184,77	179,94
	2	4311	204,36	199,36
	3	4250	207,81	196,10
	4	4548	232,57	224,06
	5	4641	242,70	233,25
	6	4329	221,44	201,97
	7	4613	246,58	231,27
	8	4520	235,40	220,71
I	9	4488	213,11	215,62
	10	4465	216,69	212,88
	11	4553	229,88	223,99
	12	4649	237,16	232,68
	13	4692	241,15	236,14
	14	4494	222,39	215,65
	15	4580	240,53	226,68
	16	4542	239,15	223,47
	17	4413	221,01	210,43
	18	4474	229,03	215,29
A	19	4474	210,12	211,70
	20	4395	205,68	205,52
	21	4536	224,00	220,45
	22	4372	206,98	205,11
	23	4455	213,40	213,21
	24	4427	225,48	211,28
	25	4211	206,45	191,13
	26	4240	205,86	193,75

Tabla 11: Valores promedio de la velocidad acústica y módulo de elasticidad dinámico según el nivel de corte

	<i>Nivel</i>	<i>Promedio</i>	<i>Mediana</i>	<i>C.V. (%)</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
<i>Velocidad</i>	B	4414	4424	4,60	4079	4892
	I	4535	4554	3,30	3900	4719
	A	4389	4392	3,46	3978	4710
<i>MOE_{D1} x1000 (kg/cm²)</i>	B	222,03	223,96	10,03	183,05	277,32
	I	229,18	233,10	6,84	172,62	252,73
	A	212,37	212,13	6,08	182,04	241,54
<i>MOE_{D2} x1000 (kg/cm²)</i>	B	210,91	210,97	9,52	178,27	260,10
	I	221,45	223,00	6,45	164,35	240,63
	A	206,64	207,14	6,67	170,54	237,71

Los resultados tanto de velocidad como de MOE_D no cumplieron con ningún supuesto, por lo cual se realizaron las pruebas no paramétricas. De acuerdo con la Tabla 12, existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de los niveles del MOE_D . De la misma manera se observa que se tienen diferencias significativas en la velocidad. En todos los casos, la pareja de niveles B-A son iguales, en cambio, las parejas B-I son iguales sólo en MOE_{D1} .

Tabla 12: Prueba de Kruskal-Wallis entre niveles de corte para velocidad y módulo de elasticidad dinámico

	<i>Nivel</i>	<i>Significancia</i>	<i>Prueba de comparación</i>
<i>Velocidad</i>	B	*	a
	I		b
	A		a
<i>MOE_{D1}</i>	B	*	a b
	I		b
	A		a
<i>MOE_{D2}</i>	B	*	a
	I		b
	A		a

* : *Significativo*

Por otro lado, un ANOVA realizado entre los dos MOE_D , muestra diferencias estadísticamente significativas entre ambas medias (Figura 15). Esto se debe directamente a la influencia de la densidad en el cálculo de cada MOE_D .

Soto *et al.* (2012) precisan que distintos autores, para determinar MOE_D , ya sea en trozas o en árboles en pie, asumen un valor de la densidad constante igual a 1000 kg/m^3 , calculan el promedio de los valores obtenidos por árbol y lo usan como una densidad constante para el rodal, o, simplemente, sólo usan la velocidad para evaluar tratamientos silviculturales. Sin embargo, concluye que dichas decisiones se deben limitar sólo a los casos en los que se tenga plena certeza que la densidad no está afectada por otros tratamientos.

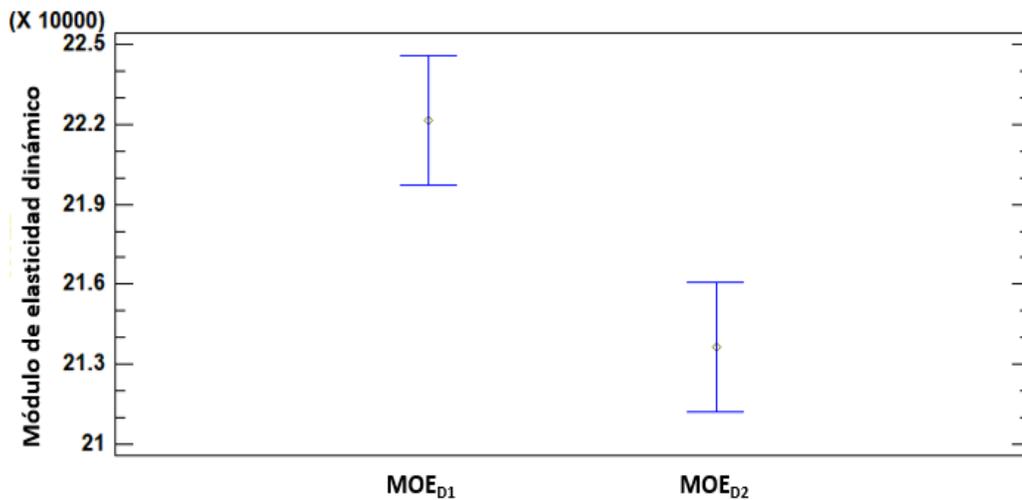


Figura 15: Gráfico de medias con intervalos del 95% de confianza entre los MOE_D

Las velocidades de propagación de ondas medidas en las trozas varían desde 4079 hasta 4719 m/s. Niemz *et al.* (1994) encontraron velocidades de propagación que variaron de 4476 a 6344 m/s en latifoliadas de densidades entre 0,48 y 0,9 g/cm^2 a un contenido de humedad equilibrio ($12\% \pm 3\%$); no obstante, debe tenerse presente las diferencias en el contenido de humedad.

La Figura 16 muestra el comportamiento de la velocidad por troza a lo largo de cada árbol, siendo la troza 1 la más cercana a la base y la 10 la más cercana al ápice; a excepción del árbol 1, en el cual, al sólo presentar 6 trozas, la 6 es la más cercana al ápice. Se puede observar que existe una tendencia de aumento desde las trozas basales hacia las trozas de la zona intermedia, para luego descender hacia el ápice.

La troza 1 de los tres árboles presentan valores inferiores de velocidad en comparación con sus consecutivas. Esto no guarda relación con lo expuesto por Raquelé (2004), quien indica que a mayor densidad se observa una mayor velocidad de propagación de ondas. Sin embargo, debe tomarse en cuenta otros factores como longitud de fibra, disposición e inclinación de elementos celulares, entre otros. Hay que mencionar, además, que la presencia de raíces tablares en la zona basal del árbol puede generar una ligera desviación del grano, lo que mostraría una menor velocidad en las trozas 1 evaluadas en cada árbol.

Este comportamiento es similar al encontrado por varios autores, quienes observaron velocidades de propagación mayores en la troza 2 con respecto a la 1 para pino radiata de 28 años (Soto *et al.* 2012) y pino ponderosa de 20 años (Caballé *et al.* 2016). Soto *et al.* (2012) atribuyen la diferencia al efecto del ángulo de la microfibrilla en la rigidez de la madera, el cual disminuyó desde la base hasta los 10 m de altura en los fustes.

Por otra parte, las trozas más cercanas al ápice poseen valores de velocidad más bajos, pudiendo ser, en primer lugar, por la presencia de nudos y/o protuberancias en esa zona, coincidiendo con lo señalado por Campos (1990), quien indica que las ondas longitudinales pueden ser distorsionadas por nudos y otros defectos de la madera, lo que influye directamente en la velocidad de propagación de ondas. Así mismo, podría explicarse por la mayor presencia de madera juvenil, caracterizada por una menor densidad y elementos fibrosos más cortos (Monteoliva 2013).

Otros factores a considerar por los cuales la velocidad de propagación de onda puede variar son el largo de las fibras, la porosidad y permeabilidad de la madera, la proporción de celulosa, hemicelulosa y lignina, entre otros (Raquelé 2004). Estos factores no fueron estudiados en el presente trabajo de investigación, sin embargo, se sabe que la composición anatómica de la madera no es uniforme dentro de un árbol ni entre árboles. Un reciente estudio de Bustamante (2016) indica que la Capirona presenta elementos vasculares muy variables, diámetro de elementos vasculares y longitud de fibras regularmente homogéneos, y espesor de pared de fibras regularmente variables. Estas características pueden determinar las variaciones de la velocidad.

Si se observa el diagrama de cajas del MOE_D por niveles de corte (Figura 17), el nivel basal (B) presenta una mayor variabilidad en los datos, lo cual se debe a los valores bajos de las

trozas 1. También se aprecia que el nivel apical (A) tiene una media y mediana menor que los otros niveles, lo cual fue explicado en el párrafo anterior.

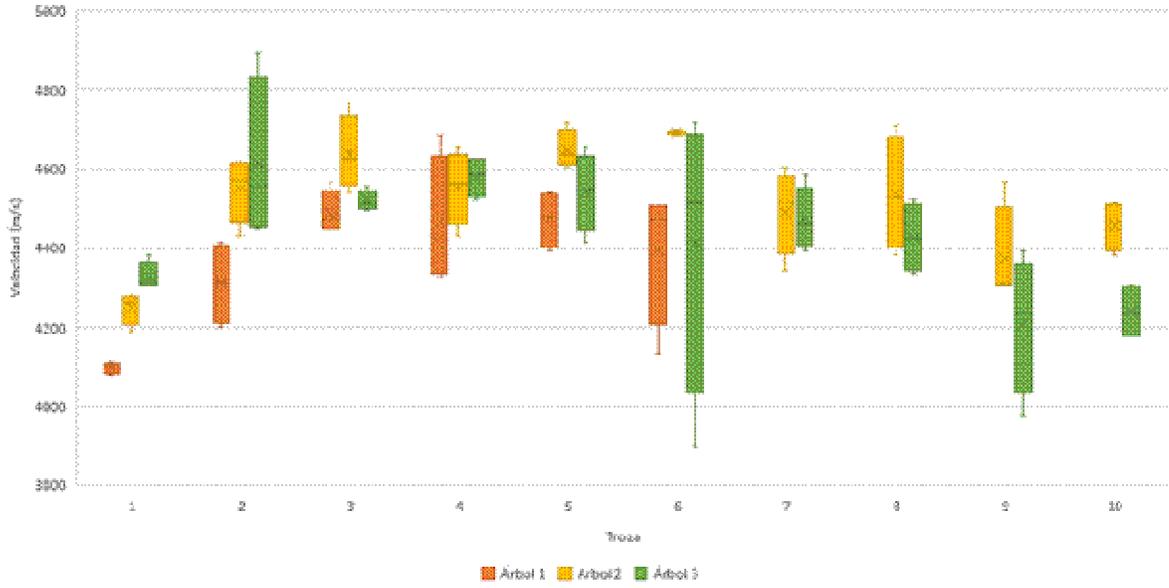


Figura 16: Diagrama de cajas de la velocidad de propagación por troza y árbol

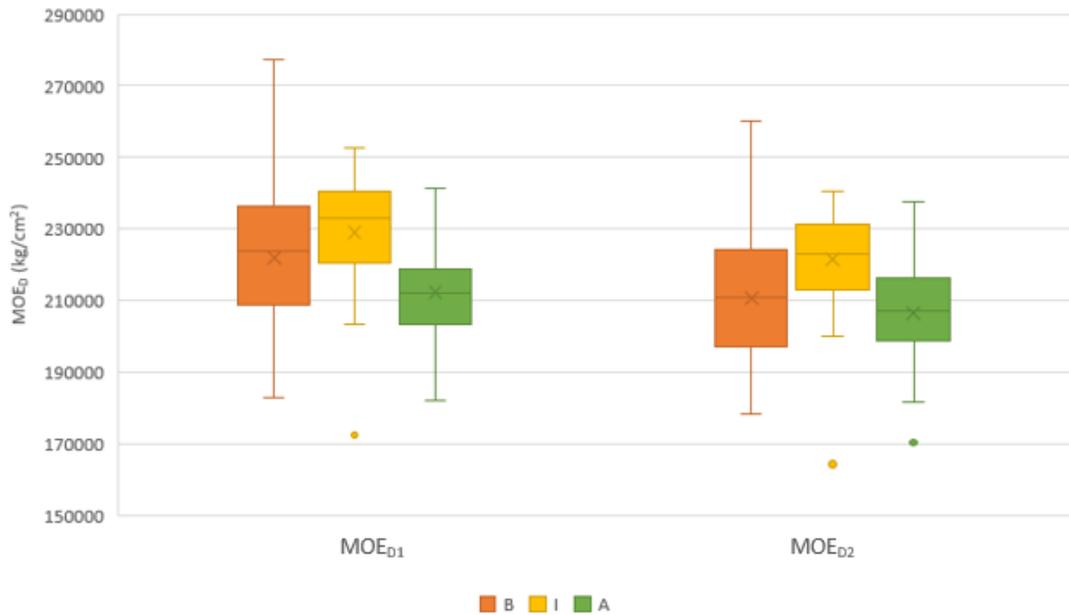


Figura 17: Diagrama de cajas de módulo de elasticidad dinámico por niveles de corte

3.1. MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO Y ESTÁTICO

La Figura 19 ilustra una comparación entre los módulos de elasticidad estáticos (MOE_F y $MOE_{C//}$) y dinámicos (MOE_{D1} y MOE_{D2}) por troza. Se aprecia que el MOE_D de cada troza es siempre mayor a su respectivo MOE_E . Esta diferencia de valores es de 78 por ciento entre MOE_D y MOE_F , y de 34 por ciento entre MOE_D y $MOE_{C//}$.

La diferencia entre los resultados podría ser explicada por la viscoelasticidad de la madera. Sotomayor y Villaseñor (2006) señalan que esta característica de la madera aumenta la rigidez aparente de las probetas debido a que la velocidad de carga en los métodos dinámicos es superior a la velocidad de carga en el método estático. Por esta razón, se espera que el módulo de elasticidad dinámico sea mayor que el estático.

De acuerdo a la figura mostrada, se puede decir que tanto los MOE_D como los MOE_E siguen un patrón de comportamiento similar, además de ser proporcionales (MOE_D siempre mayor que MOE_E). No obstante, es necesario recalcar que este comportamiento se analizará en las regresiones.

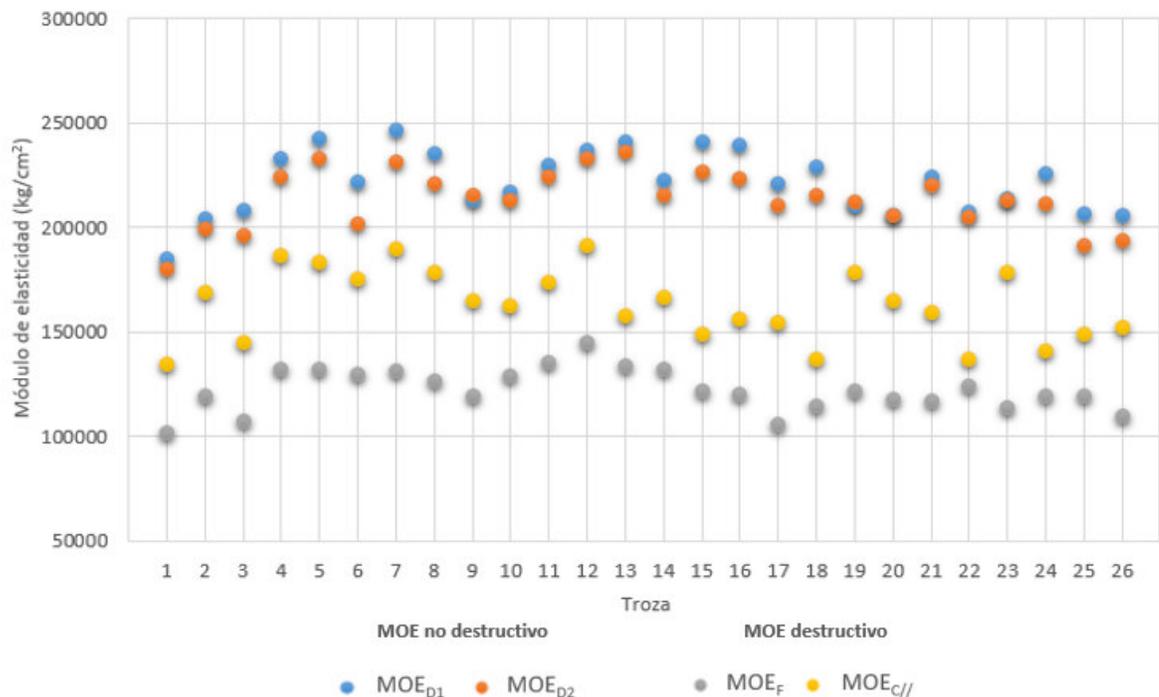


Figura 18: Valores promedio por troza de módulos de elasticidad dinámicos y estáticos

4. ANÁLISIS DE REGRESIÓN ENTRE VARIABLES

Se presentan diferentes análisis de regresión en los que se buscó encontrar relación entre los MOEs, teniendo como variable regresora los MOE_D y como variables de respuesta los MOE_E . Asimismo, se efectuaron regresiones entre la velocidad de propagación (variable regresora) y las propiedades mecánicas (variable respuesta). El modelo utilizado en todos los casos es el lineal ya que es el que mejor se ajustó a los datos.

4.1. REGRESIONES POR NIVELES DE CORTE

En primer lugar, se realizaron regresiones para cada nivel de corte. Sin embargo, debe considerarse que la cantidad de datos (8 o 10 dependiendo de la cantidad de trozas por nivel) es reducida para establecer relaciones aceptables, por lo que se empleó como un indicio del comportamiento.

Las Tablas 13 y 14 presentan los coeficientes de correlación (R), determinación (R^2) y las ecuaciones para de cada recta de regresión entre las variables. A pesar del reducido tamaño de muestra por nivel, se encontraron correlaciones significativas en el nivel basal e intermedio para todas las variables regresoras considerando MOE_F como variable respuesta. En el caso de $MOE_{C//}$, sólo se encontraron buenas correlaciones en el nivel basal.

Tabla 13: Coeficientes de correlación, determinación y ecuación de regresiones a distintos niveles de corte empleando el MOE_F como variable respuesta

Nivel	Variable regresora	Coef. Correlación (R)	Coef. Determinación (R^2)	Ecuación
B	V	0,88	0,78	$MOE_F = -118245 + 54,5122 * V$
I	V	0,78	0,61	$MOE_F = -296758 + 93,1581 * V$
A	V	0,25	0,06	$MOE_F = 74773,6 + 9,81819 * V$
B	MOE_{D1}	0,90	0,81	$MOE_F = 10873,4 + 0,502288 * MOE_{D1}$
I	MOE_{D1}	0,53	0,28	$MOE_F = 45639,7 + 0,349656 * MOE_{D1}$
A	MOE_{D1}	0,04	0,00	$MOE_F = 113469 + 0,0207019 * MOE_{D1}$
B	MOE_{D2}	0,87	0,76	$MOE_F = 7481,73 + 0,544871 * MOE_{D2}$
I	MOE_{D2}	0,78	0,61	$MOE_F = -63481,7 + 0,854998 * MOE_{D2}$
A	MOE_{D2}	0,21	0,04	$MOE_F = 98713,8 + 0,0927254 * MOE_{D2}$

V: velocidad de propagación; MOE_{D1} : módulo de elasticidad dinámico 1; MOE_{D2} : módulo de elasticidad dinámico 2; MOE_F : módulo de elasticidad en flexión estática.

Tabla 14: Coeficientes de correlación, determinación y ecuación de regresiones a distintos niveles de corte empleando el $MOE_{C//}$ como variable respuesta

<i>Nivel</i>	<i>Variable regresora</i>	<i>Coef. Correlación (R)</i>	<i>Coef. Determinación (R^2)</i>	<i>Ecuación</i>
B	V	0,91	0,83	$MOE_{C//} = -242187 + 93,4279*V$
I	V	0,37	0,14	$MOE_{C//} = -121973 + 62,487*V$
A	V	0,45	0,20	$MOE_{C//} = -120988 + 63,4558*V$
B	MOE_{D1}	0,91	0,82	$MOE_{C//} = -16549,6 + 0,841301*MOE_{D1}$
I	MOE_{D1}	-0,03	0,00	$MOE_{C//} = 171404 - 0,043659*MOE_{D1}$
A	MOE_{D1}	-0,08	0,01	$MOE_{C//} = 189332 - 0,149958*MOE_{D1}$
B	MOE_{D2}	0,90	0,81	$MOE_{C//} = -26824,2 + 0,934413*MOE_{D2}$
I	MOE_{D2}	0,35	0,12	$MOE_{C//} = 33461,7 + 0,578192*MOE_{D2}$
A	MOE_{D2}	0,39	0,15	$MOE_{C//} = 29959,6 + 0,617595*MOE_{D2}$

V: velocidad de propagación; MOE_{D1} : módulo de elasticidad dinámico 1; MOE_{D2} : módulo de elasticidad dinámico 2; $MOE_{C//}$: módulo de elasticidad en compresión paralela.

Se consideró realizar un análisis de regresión lineal múltiple para explicar MOE_F y $MOE_{C//}$ en función de las variables regresoras utilizadas hasta el momento e incluyendo el nivel de corte como un factor. Los resultados mostrados en el Anexo 7 indican que, en todos los casos, la variable *Nivel de corte* no es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95 por ciento, por lo que es considerable eliminar esa variable para simplificar el modelo.

El hecho de que el nivel de corte tenga un efecto en las regresiones simples para la base, y no en las múltiples como un factor, pone en evidencia la baja asociación de las variables respuesta y regresora sobretodo en el nivel apical. Los valores R en este nivel indican una baja bondad de ajuste de los modelos que pretenden explicar MOE_F y $MOE_{C//}$.

4.2. REGRESIÓN $MOE_D - MOE_E$

Las Figuras 19, 20, 21 y 22 muestran las rectas de regresión entre MOE_D vs $MOE_F/MOE_{C//}$, considerando todos los niveles en conjunto, la Tabla 15 presenta los coeficientes de determinación y correlación de las regresiones.

La variable que explica un mayor porcentaje de la variabilidad de MOE_F es MOE_{D2} , con un R^2 de 0,50. De igual manera para $MOE_{C//}$, MOE_{D2} explica en un 30 por ciento su variabilidad.

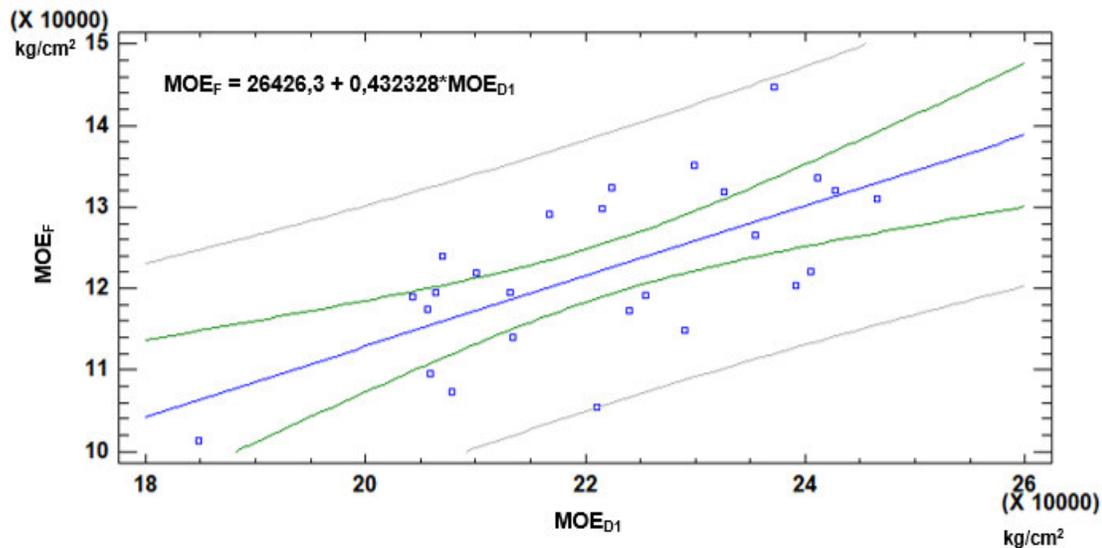


Figura 19: Recta de regresión entre MOE_{D1} vs MOE_F

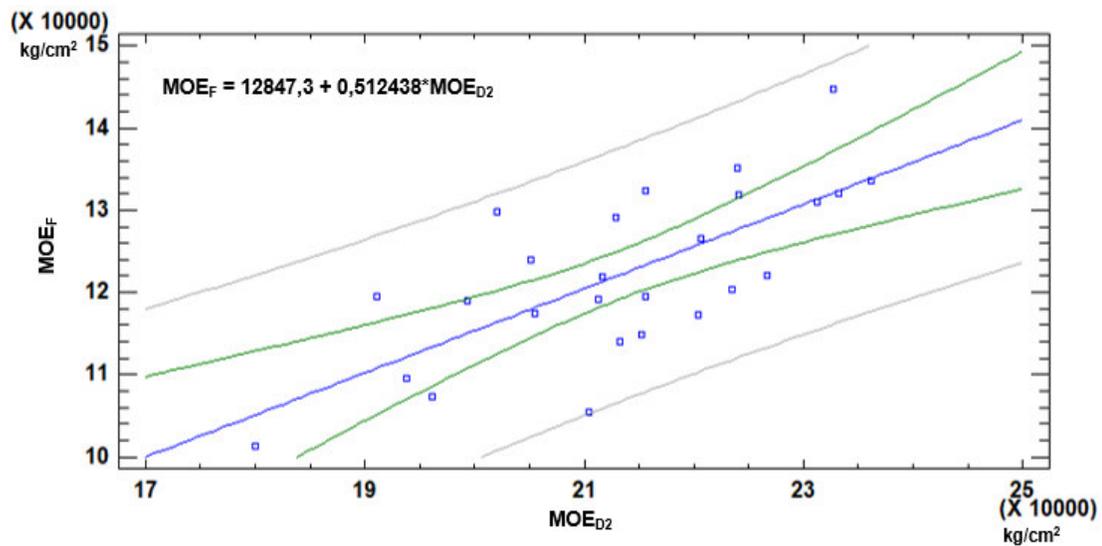


Figura 20: Recta de regresión entre MOE_{D2} vs MOE_F

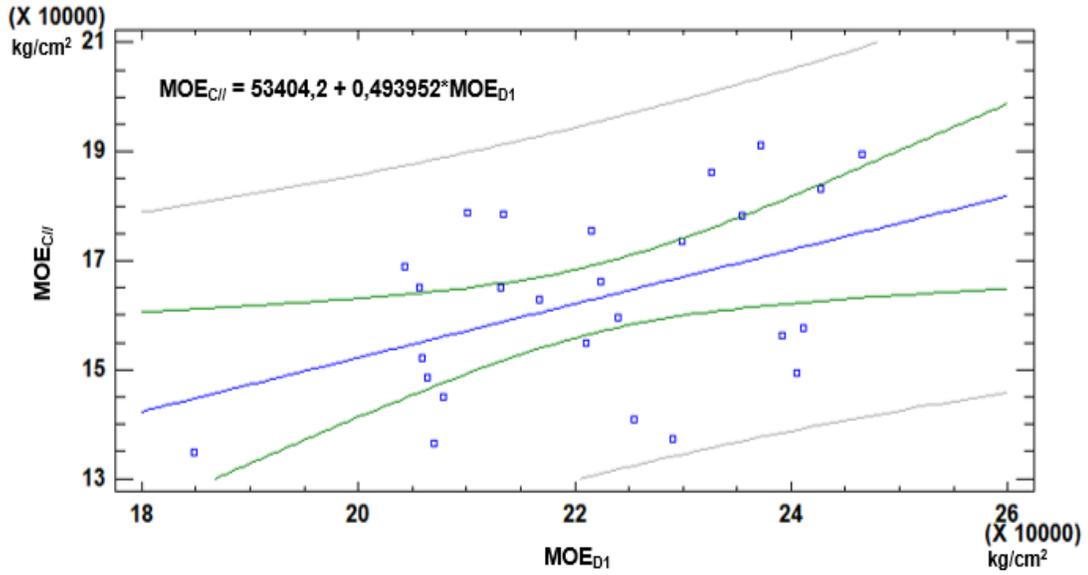


Figura 21: Recta de regresión entre MOE_{D1} vs MOE_{CII}

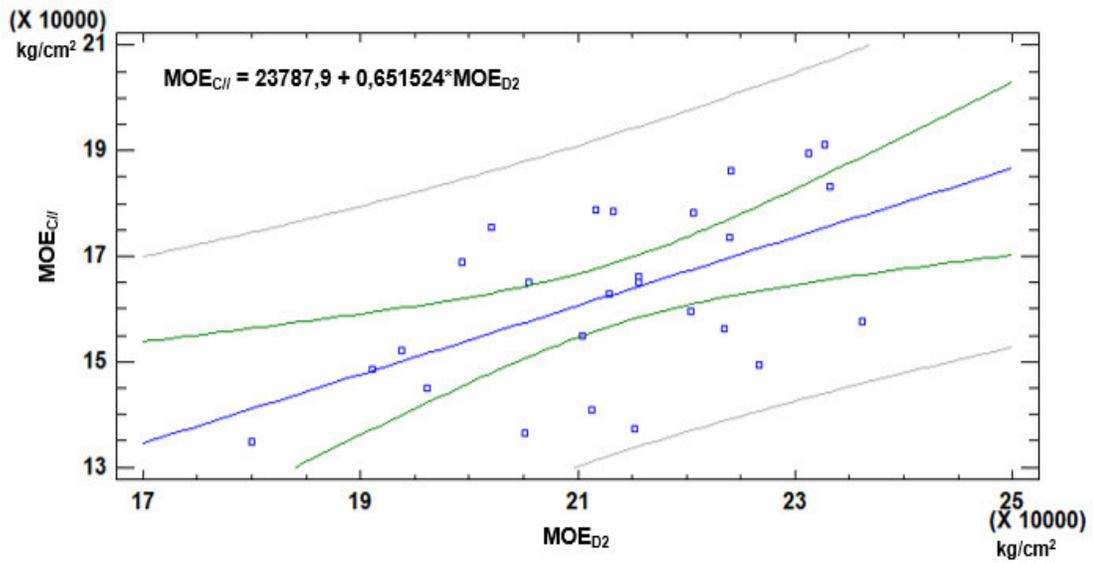


Figura 22: Recta de regresión entre MOE_{D2} vs MOE_{CII}

Tabla 15: Coeficiente de correlación y regresión para las regresiones descritas

Variable respuesta	Variable regresora	Coef. Correlación (R)	Coef. Determinación (R²)
MOE _F	MOE _{D1}	0,65	0,42
MOE _F	MOE _{D2}	0,71	0,50
MOE _{C//}	MOE _{D1}	0,45	0,20
MOE _{C//}	MOE _{D2}	0,55	0,30

MOE_F: módulo de elasticidad en flexión estática; *MOE_{C//}*: módulo de elasticidad en compresión paralela; *MOE_{D1}*: módulo de elasticidad dinámico 1; *MOE_{D2}*: módulo de elasticidad dinámico 2.

4.3. REGRESIÓN V – MOE_E

El uso de V, en vez de MOE_D (ρV^2) es de consideración debido a que este último se ve influenciado por el comportamiento de la densidad. Varios autores asumen el valor de la densidad como una constante, ya sea en trozas o árboles en pie; o calculan el promedio de los valores obtenidos por árbol y lo usan como una densidad constante para el rodal; o simplemente usan la V o V² (Soto *et al.* 2012).

Por lo expuesto, se presentan las regresiones entre V vs MOE_F y V vs MOE_{C//} en las Figuras 23 y 24, respectivamente. El primer modelo indica que V explica el 51 por ciento la variabilidad de MOE_F, con una bondad de ajuste (R) de 0,71; mientras que el segundo modelo muestra que V sólo explica el 30 por ciento la variabilidad de MOE_{C//}, una bondad de ajuste de 0,55, obteniendo una relación débil.

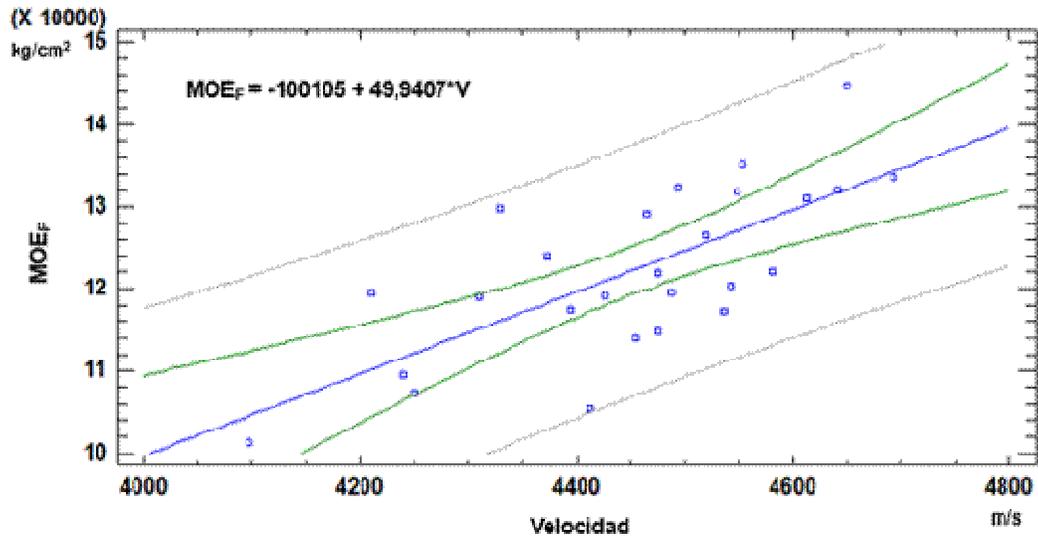


Figura 23: Recta de regresión entre V vs MOE_F

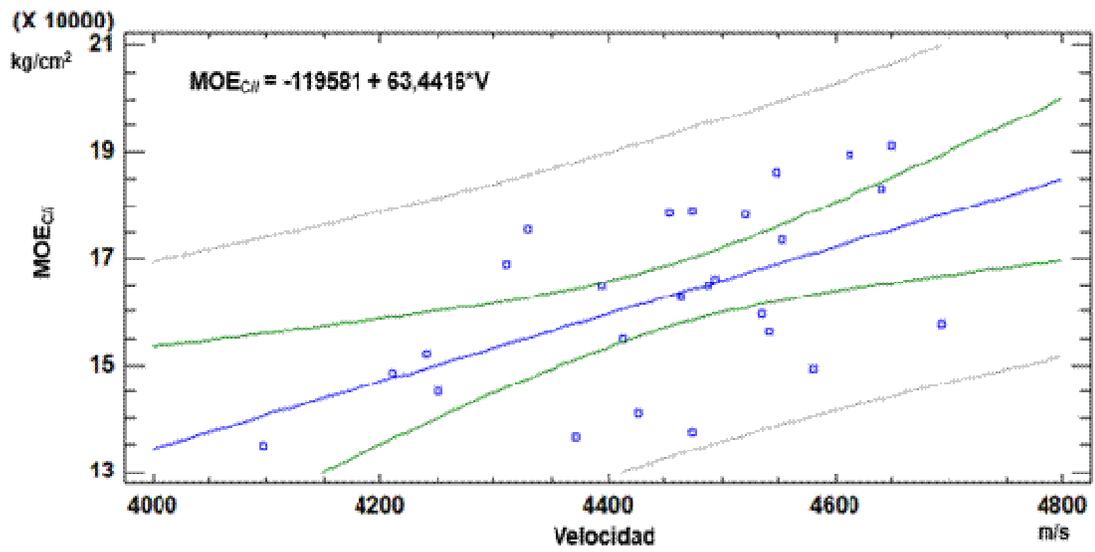


Figura 24: Recta de regresión entre V vs MOE_{CII}

4.4. REGRESIÓN MOE_D – OTRAS PROPIEDADES

La Tabla 16 muestra los coeficientes y ecuaciones de las regresiones, utilizando el MOE_D y la V como variables regresoras. En general se aprecian asociaciones débiles entre las variables. La variable MOE_D es la que explica una mayor variabilidad del MOR y RM.

Tabla 16: Coeficientes de correlación y determinación entre variables

<i>Variable respuesta</i>	<i>Variable regresora</i>	<i>Coef. Correlación (R)</i>	<i>Coef. Determinación (R^2)</i>	<i>Ecuación</i>
MOR	V	0,60	0,36	$MOR = -33.3778 + 0,233888*V$
MOR	MOE_{D1}	0,61	0,38	$MOR = 506,783 + 0,0022612*MOE_{D1}$
MOR	MOE_{D2}	0,62	0,38	$MOR = 479,059 + 0,00247742*MOE_{D2}$
RM	V	0,52	0,27	$RM = -73,2467 + 0,115057*V$
RM	MOE_{D1}	0,65	0,42	$RM = 136,613 + 0,00136436*MOE_{D1}$
RM	MOE_{D2}	0,56	0,32	$RM = 163,904 + 0,00128867*MOE_{D2}$

MOR: módulo de ruptura; RM: resistencia máxima; V: velocidad; MOE_{D1} : módulo de elasticidad dinámico 1; MOE_{D2} : módulo de elasticidad dinámico 2.

4.5. INTERPRETACIÓN GLOBAL

Analizando las regresiones obtenidas, se presentan resultados variables. En primer lugar, todos los coeficientes de correlación (R) para las asociaciones de variables en el nivel apical (A) son clasificados como muy bajos y bajos. Por otro lado, todos los R de las variables asociadas en los niveles basal (B) e intermedio (I) son altos, a excepción del nivel I en compresión paralela, el cual presenta R bajos. La clasificación de los coeficientes de correlación según Calzada (1982), se presenta en el Anexo 8.

Estos resultados pueden deberse a diversos factores. En primer lugar, a pesar de que las probetas se extrajeron de la misma zona de la troza en la que se evaluó con Treasonic, estas no necesariamente contienen la madera por la que viajaron las ondas de sonido, sobretodo en trozas con defectos como protuberancias y nudos. Al momento de aserrar de las trozas, aquellas que sean menos cilíndricas o más amorfas, eliminarán más madera de los cantos para poder obtener tablas y listones para las probetas, por lo que ahí se genera un error en la correlación, ya que este equipo toma mediciones sólo en los primeros anillos más cercanos a la circunferencia de la troza. A esta razón podría atribuírsele el hecho de que existen muy

bajas relaciones entre las variables en el nivel A y, por ende, explican muy poco la variabilidad de las variables respuesta.

Por otra parte, la velocidad es una buena variable para explicar MOE_F , con la cual se puede explicar el 51 por ciento de su variabilidad. Para el caso de las propiedades de resistencia, MOE_{D1} y MOE_{D2} explican una mayor variabilidad de ellas en comparación con la velocidad, esto debido a la influencia directa que presenta la densidad en este tipo de propiedades.

Las regresiones en las que se empleó el MOE_{D2} dieron como resultado buenas bondades de ajuste, por lo que la estimación de la densidad con Pilodyn podría ser un buen complemento al determinar el MOE_D , de tal manera que se disminuye el tiempo de procesamiento de muestras en laboratorio.

La inclusión de la variable *Nivel de corte* al modelo aumenta ligeramente el valor de los R^2 en comparación con las regresiones simples (Anexo 7). Sin embargo, estadísticamente este aumento no fue significativo. Además, debe tomarse en cuenta que, al agregar variables a un modelo lineal, el coeficiente de correlación y de determinación siempre aumentan, por lo que es importante no tomar como único criterio de selección de modelos el valor de R o R^2 (Cervantes *et al.* 2006).

Niemz *et al.* (1994) encontró que, relacionando la velocidad del sonido y elasticidad/resistencia a la flexión, se presentan diferencias entre los niveles de correlación encontrados para latifoliadas y coníferas, siendo notoriamente mayores en coníferas. Esto se deba probablemente a la estructura mucho más variable en latifoliadas.

V. CONCLUSIONES

- 1) Las variables que mejor se asocian con MOE_F y $MOE_{C//}$ son la velocidad de propagación de ondas y MOE_{D2} , con un R de 0,71 entre MOE_F y las variables regresoras; y un R de 0,55 entre $MOE_{C//}$ y las mismas.
- 2) Las estimaciones de MOE_E para trozas de la zona basal e intermedia son aceptables utilizando el Treasonic Timer.
- 3) Las asociaciones de variables en el nivel apical son influenciadas fuertemente por las protuberancias y nudos que presentó esa zona.
- 4) La velocidad de propagación de ondas es un buen indicador de las propiedades mecánicas para la madera en estudio.

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios de caracterización anatómica junto con los de resistencia mecánica, de tal manera que se pueda reconocer la influencia de ellos en los resultados de las mediciones no destructivas.
- Implementar una evaluación visual en trozas, identificando defectos que afecten la velocidad de propagación de ondas.
- Emplear un tamaño de muestra de árboles mayor; asimismo se debe realizar un seguimiento a la plantación para evaluar el comportamiento en el tiempo.
- Utilizar otros métodos para determinar velocidad de propagación y MOE_D en trozas, como el de resonancia.
- Evaluar la clasificación de trozas por su calidad según la velocidad de propagación de ondas en ellas.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo, M. 2011. Características tecnológicas de las maderas peruanas. Lima, Perú, UNALM. Sin publicar.
- Acevedo, M; Kikata, Y. 1994. Atlas de maderas del Perú. Lima, Perú, UNALM - Universidad de Nagoya Japón.
- Aróstegui, A. 1974. Estudio tecnológico de maderas del Perú (Zona Pucallpa): características tecnológicas y usos de la madera de 145 especies del país. Lima, Perú, UNALM. v. 1.
- _____. 1982. Recopilación y análisis de estudios tecnológicos de maderas peruanas. Proyecto PNUD/FAO/PER/81/002 Fortalecimiento de los Programas de Desarrollo Forestal en Selva Central. Lima, Perú.
- Arroyo, J. 1983. Propiedades físico mecánicas de la madera. Texto para estudiantes de Ingeniería Forestal. UNIANDES. Mérida, Venezuela.
- Auty, D; Achim, A. 2008. The relationship between standing tree acoustic assessment and timber quality in Scots pine and the practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 81(4):475-487.
- Bucur, V. 1995. Acoustics of wood. CRC Press Incs. New York, Estados Unidos.
- Bustamante, K. 2016. Caracterización anatómica de la madera y el carbón de cinco especies forestales para su identificación. Tesis Ing. Forestal. Lima, Perú, UNALM.
- Caballé, G; Santaclara, O; Diez, JP; Gonda, H; Martinez, A. 2016. Efecto del manejo forestal sobre calidad de madera del pino ponderosa: evaluación por métodos acústicos en árboles en pie, trozas y tablas. Conference paper.
- Calzada, J. 1982. Métodos estadísticos para la investigación. Ed. Milagros S.A. Lima, Perú.

- Campos, A. 1990. Módulo de elasticidad dinámico y esfuerzo de compresión paralela a la fibra en ciertas coníferas canadienses. *Ciencia e investigación forestal*. 4(2):145-158.
- Carnero, P. 2007. Determinación preliminar del módulo de elasticidad mediante el empleo de técnicas no destructivas para maderas tropicales peruanas. Tesis Ing. Forestal. Lima, Perú, UNALM.
- Cervantes, A; Marqués, MJ; Rivera, P. 2006. Análisis estadístico. Un enfoque práctico con Statgraphics. Ciudad de México, México, UNAM.
- Chambergó, A; Aróstegui, A. 1984. Influencia de los elementos xilemáticos en las propiedades físico-mecánicas de 45 maderas del Perú. *Revista forestal del Perú*. 12(1-2):1-16.
- Chavesta, M. 1995. Maderas para parquet. Lima, Perú, UNALM. 101p.
- _____. 2005. Maderas para pisos. Lima, Perú, UNALM.
- Cobas, AC; Area, MC; Monteoliva, S. 2014. Patrones de variación de la densidad de la madera y morfometría celular de *Salix babylonica* para la determinación de la edad de transición entre madera juvenil y madura. *Maderas, Ciencia y Tecnología*. 16(3):343-354.
- Cornejo, J; Baettig, R. 2009. Evolución del módulo de elasticidad longitudinal entre 10°C y 100°C en piezas de *Pinus radiata* usando una técnica de evaluación no destructiva. *Maderas, Ciencia y tecnología*. 11(2):153-160.
- Couto, AM; Trugilho, PF; Andrade, T; De Paula, T; Aparecida, V. 2013. Modeling of basic density of wood from *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* using nondestructive methods. *Cerne*. 19(1):27-34.
- Da Silva, LB; Ribeiro dos Santos, FA; Gasson, P; Cutler, D. 2009. Anatomia e densidade básica da madeira de *Caesalpinia pyramidalis* Tul. (Fabaceae), espécie endêmica da caatinga do Nordeste do Brasil. *Acta Botanica Brasilica*. 23(2):436-445.
- Díaz, M; Pecho de la Cruz, RG; Guarda, D. S. f. Variación de las propiedades físicas de *Calycophyllum spruceanum* (Benth) Hooker F. ex Chuman (Capirona) de una plantación de ocho años en la zona de Tingo María, Perú. Tingo María, Perú, UNAS.

- Eckard, JT; Isik, F; Bullock, B; Li, B; Gumpertz, M. 2010. Selection efficiency for solid wood traits in *Pinus taeda* using time-of-flight acoustic and micro-drill resistance methods. *Forest Science*. 56(3):233–241.
- Evangelista, F; Afanador, N. 2016. Un enfoque de polinomio de expansión de caos al análisis de la incerteza en elementos estructurales visco elástico. *DYNA*. 83(199):172-182.
- Fakopp Enterprise. 2005. TreeSonic Microsecond Timer: users guide. Agfalva, Hungary.
- Flores, Y. 2002. Crecimiento y productividad de plantaciones de seis especies forestales nativas de 20 años de edad en el Bosque Alexander Von Humboldt, Amazonía Peruana. Tesis Mg. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE.
- Fombuena, V; Boronat, T; Sánchez-Nácher, L; García-Sanoguera, D; Balart, R. 2017. Utilidad de los modelos de viscoelasticidad en el aprendizaje de la ingeniería de materiales poliméricos. *MSEL*. 10(1):137-148.
- Gamez, J. 2009. Evaluación de las características físicas del *Calycophyllum spruceanum* (Benth) Hooker F. ex Chuman "CAPIRONA" a tres niveles del fuste, en la zona de Tingo María – Perú. Tesis Ing. Recursos naturales renovables. Tingo María, Perú, UNAS.
- Giraldo, DL; Nieto, VM; Sarmiento, M; Borralho, N. 2014. Estimación indirecta de la densidad de la madera mediante el uso de Pilodyn en la selección de clones de *Eucalyptus pellita* F. Muell. *Colombia forestal*. 17(2):181-192.
- Gonzales, VR. 1970. Durabilidad natural de 53 especies forestales de Yurimaguas. *Revista Forestal del Perú*. 4(1-2):1-25.
- Haines, DW; Leban, JM; Herbé, C. 1996. Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood Science and Technology*. (30):253-263.
- Hansen, CP. 2000. Application of the pilodyn in forest tree improvement. Copenhagen, Dinamarca, UPOCH. Technical note n° 55.

- Henriques, DF; Nunes, L; Machado, JP; de Brito, J. 2011. Timber in Buildings: Estimation of Some Properties using Pilodyn and Resistograph. International Conference on Durability of Building Materials and Components (12, 2011, Porto, Portugal).
- Hermoso, E. 2001. Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L. Tesis. Madrid, España, ETSI Montes.
- Holdridge, L. 1987 Ecología basada en zonas de vida. San José, Costa Rica, IICA. 216p.
- Igartúa, DV. 2013. Propiedades xilotecnológicas de *Acacia melanoxylon* implantada en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires – Argentina. Tesis PhD. Buenos Aires, Argentina, UNLP.
- INIA (Instituto Nacional de Innovación Agraria). 2018. Comportamiento del módulo de elasticidad de Capirona (*Callycophyllum spruceanum*) determinado con métodos no destructivos en plantaciones de 19 años. Lima, Perú. Informe técnico n° 03.
- ITTO (International Tropical Timber Organization). 2018. (en línea). Consultado el 20 de oct. 2018. Disponible en <http://www.tropicaltimber.info/specie/pau-mulato-callycophyllum-spruceanum/>
- JUNAC (Junta del Acuerdo de Cartagena). 1981. Tablas de propiedades físicas y mecánicas de la madera de 20 especies de Bolivia. Lima, Perú. 46p.
- Kawamoto, S; Williams, RS. 2002. Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood-based composites - a review. USDA, Forest Products Laboratory. General Technical Report 134.
- Kien, N; Jansson, G; Harwood, C; Almqvist, C; Thinh, H. 2008. Genetic variation in wood basic density and pilodyn penetration and their relationships with growth, stem straightness, and branch size for *Eucalyptus urophylla* in Northern Vietnam. New Zealand Journal of Forestry Science. 38(1):160–175.
- Kollman, F. 1959. Tecnología de la Madera y sus aplicaciones. Ministerio de Agricultura. Dirección General de montes, caza y pesca fluvial. Instituto Forestal de Investigaciones, Experiencias y Servicios de la madera. Madrid, España.
- León, WJ; Espinoza, N. 2001. Anatomía de la madera. Mérida, Venezuela, ULA.

- _____. 2010. Anatomía y densidad o peso específico de la madera. *Revista Forestal Venezolana*. 54(1):67-76.
- Lopez, JA; Vera, CD; Genes, PY. 2010. Estimación de la densidad de la madera de *Grevillea robusta* a una edad juvenil utilizando Pilodyn. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Monteoliva, S. S. f. Determinación de densidad de la madera de sauces con Pilodyn: calibración. Tercer Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina (2011, Patagonia, Argentina). La Plata, Argentina, UNLP.
- _____. 2013. Madera juvenil: características y modelos de variación en coníferas y latifoliadas. *Sociedad argentina de botánica*. Conference paper.
- Navia, FJ. 2006. Comportamiento del módulo de elasticidad en madera juvenil de *Pinus radiata* D. Don en tres condiciones de sitio. Tesis Ing. Forestal. Valdivia, Chile, UACH.
- Niemz, P; Aguilera, A; Rolleri, A. 1994. Velocidad de propagación del sonido en algunas especies creciendo en Chile y su relación con propiedades físicas. *Bosque*. 15(2):49-54.
- Nilsson, O. 2014. Growth and modulus of elasticity of selected pines species and hybrids three years after planting in South Africa. Master thesis. Alnarp, Suecia, SLU.
- Notivol, E; Gil, LA; Pardos, JA. 1992. Una metodología para la estimación de la densidad de la madera de árboles en pie y su grado de variabilidad en *Pinus pinaster* ait. *Investigación agraria: Sistemas y recursos forestales*. 1(1):41-47.
- NTP (Normas Técnicas Peruanas). 2014. Método para determinar la compresión axial o paralela al grano. NTP 251.014. Lima, Perú.
- _____. 2014. Método para determinar la densidad. NTP 251.011. Lima, Perú.
- _____. 2014. Método para determinar la flexión estática. NTP 251.017. Lima, Perú.
- _____. 2014. Métodos para determinar el contenido de humedad. NTP 251.010. Lima, Perú.
- Orrego, D. 2010. Trabajabilidad de la madera de Capirona (*Calycophyllum spruceanum*) procedente de plantaciones de la Cuenca del río Aguaytia en la región de Ucayali-Perú. Tesis Ing. Forestal. Lima, Perú, UNALM.

- Pantigoso, J. 2009. Propiedades físicas y mecánicas de la capirona (*Calycophyllum spruceanum* (Benth) hook ex Schumann) procedente de una plantación experimental en San Alejandro Ucayali-Perú. Tesis Ing. Forestal. Lima, Perú, UNALM.
- Pashin A; De Zeeuw, C. 1980. Textbook of wood technology. 4th. Ed. Me GrawHill, New York, US.
- Pereyra, O; Gelid, M. 2002. Estudio de la variabilidad de la densidad básica de la madera de *Pinus taeda* para plantaciones de Misiones y norte de Corrientes. Revista Floresta. 33(1):3-19.
- Raquelé, T. 2004. Estudio de propiedades mecánicas de pecas rolicas de eucalipto citriodora utilizando a técnica de ultra-som. Tesis mestre em ciência e engenharia de materiais. Sao Carlos, Brasil, USP.
- Reynel, C; Pennington, RT; Pennington, TD; Flores, C; Daza, A. 2003. Árboles útiles de la Amazonia peruana y sus usos. Lima, Perú, Darwin initiative- ICRAF.
- Ross, RR. 1999. Using sound to evaluate standing timber. International Forestry Review. 1(1):43-44.
- Santos, AB; Ribeiro-Oliveira, JP; Carvalho, CM. 2016. Sobre a botânica, a etnofarmacologia e a química de *Calycophyllum spruceanum* (Benth.) Hook. f. ex K. Schum. Revista Brasileira de Plantas Mediciniais. 18(1):383-389.
- Silva, FM; Návar, JJ. 2012. Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México. Madera y Bosques. 18(1):77-88.
- Soto, L; Valenzuela, L; Lasserre, JP. 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):209-244.
- Sotomayor, JR. 2015. Comportamiento elástico de la madera. Morelia, México, UMSNH.
- Sotomayor, JR; Villaseñor, JM. 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 de *Cedrelinga cateniformis* Ducke proveniente de plantaciones del Bosque Nacional Alexander Von Humboldt. Tesis Ing. Forestal. Lima, Perú, UNALM.
- TROPICOS (Tropical Missouri Botanical Garden). 2018. (en línea). Consultado el 14 oct. 2018. Disponible en <http://www.tropicos.org/Name/27904047>
- Valderrama, H. 1993. Características tecnológicas y uso Industrial de nuevas especies forestales de la Amazonía Peruana. *Folia Amazónica*. 5(1-2):77-97.
- Vignote, S; Martínez-Rojas, I; Villasante, A. 2013. Silvicultura y calidad de madera. Conference Paper.
- Wang, X; Ross, RJ; Carter, P. 2007. Acoustic assessment of wood quality in standing trees. Part 1. Acoustic behavior. *Wood and Fiber Science*. 39(1): 28-38.
- Wang, X; Ross, RJ; McClellan, M; Barbour, RJ; Erickson, JR; Forsman, JW; McGinnis, GD. 2000. Strength and stiffness assessment of standing trees using a nondestructive stress wave technique. USDA, Forest Products Laboratory. Research Paper 585.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1

CONSTANCIA DE IDENTIFICACIÓN DE ESPECIE

	UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA		
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES: FAX: 349-2041, TEF: 349-5647 / 349-5669, Anexo .203 APDO.456 - LA MOLINA LIMA PERU			
<u>CONSTANCIA</u>			
<p>El que suscribe, JEFE DEL LABORATORIO DE ANATOMÍA DE LA MADERA, deja constancia que, de acuerdo con los estudios anatómicos efectuados, las muestras de madera proporcionadas por la Bach. ELIZABETH LUCIA BUSTAMANTE ORELLANA, ex alumno de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria la Molina, empleadas en su trabajo de tesis titulado: "Validación de un método no destructivo para medir módulo de elasticidad en trozas de <i>Calycophyllum spruceanum</i> de una plantación en Ucayali - Perú"; corresponden a:</p>			
Muestras	Nombre Común	Nombre Científico	Familia
1	Capirona	<i>Calycophyllum spruceanum</i> (Benth) Hooker f. ex Schumann	Rubiaceae
2	Capirona	<i>Calycophyllum spruceanum</i> (Benth) Hooker f. ex Schumann	Rubiaceae
Atentamente,			
			
Ing. Manuel Chavesta Custodio Lab. Anatomía de la Madera			
La Molina, 16 de Noviembre de 2018			

ANEXO 2

INFORMACIÓN DE ÁRBOLES EVALUADOS EN LA PLANTACIÓN

<i>N°</i>	<i>DAP (cm)</i>	<i>HT (m)</i>	<i>HC (m)</i>
1	26,50	23,50	16,50
2	22,60	22,00	15,50
3	21,00	21,00	15,00
4	23,40	21,00	14,00
5	22,50	21,50	14,00
6 (*)	18,80	19,00	9,00
7	25,00	24,00	6,50
8 (*)	24,30	22,00	14,00
9	25,20	20,00	11,00
10	22,10	22,50	15,00
11	29,90	24,00	12,00
12	16,10	20,00	13,50
13	25,50	24,00	14,00
14 (*)	24,50	25,00	16,00
15	24,20	24,00	13,50
16	22,20	24,00	11,50
17	23,00	24,00	11,00
18	19,80	23,50	8,00

(*) Árboles cortados

ANEXO 3

INFORMACIÓN DE TROZAS

<i>Nivel</i>	<i>N°</i>	<i>Árbol</i>	<i>Troza</i>	<i>Diámetro 1 (cm)</i>	<i>Diámetro 2 (cm)</i>	<i>Diámetro prom. (cm)</i>	<i>Longitud (m)</i>
B	1	1	1	22,00	17,40	19,70	1,54
	2	1	2	17,50	15,90	16,70	1,54
	3	2	1	28,90	23,20	26,05	1,54
	4	2	2	23,30	22,80	23,05	1,54
	5	2	3	22,30	21,30	21,80	1,54
	6	3	1	28,30	23,60	25,95	1,52
	7	3	2	23,60	22,20	22,90	1,53
	8	3	3	22,15	20,50	21,33	1,54
I	9	1	3	15,90	15,10	15,50	1,54
	10	1	4	15,10	14,30	14,70	1,54
	11	2	4	21,20	20,00	20,60	1,55
	12	2	5	19,80	18,80	19,30	1,55
	13	2	6	18,80	18,60	18,70	1,53
	14	2	7	18,00	17,00	17,50	1,55
	15	3	4	20,60	20,30	20,45	1,52
	16	3	5	20,40	19,35	19,88	1,55
	17	3	6	18,90	17,50	18,20	1,54
	18	3	7	17,40	16,70	17,05	1,55
A	19	1	5	14,10	12,90	13,50	1,54
	20	1	6	13,00	12,70	12,85	1,55
	21	2	8	17,15	16,20	16,68	1,55
	22	2	9	15,60	15,10	15,35	1,55
	23	2	10	15,10	14,45	14,78	1,54
	24	3	8	16,70	15,90	16,30	1,54
	25	3	9	15,40	14,80	15,10	1,54
	26	3	10	14,70	14,50	14,60	1,53

ANEXO 4

FOTOGRAFÍAS DE EVALUACIÓN DE ÁRBOLES Y TROZAS



Evaluación en plantación



Evaluación de trozas

ANEXO 5

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS

Treesonic Timer Marca Fakopp

Dimension	36 x 84 x 184 mm
Weight	2,9 kg
Sleeping down time	30 seconds
Time resolution	1,2 microsecond
Batery	One piece of 9V block
	Capacity: 100 mAh (typical)
	Operation time: 10-12 hours
Power requirement	75 Mw
Water resistant	IP65 protection

FUENTE: Tomado de Fakopp Enterprise (2005)

Pilodyn marca TerraGes

Fuerza de choque	6 J (Nm)
Profundidad de penetración	Hasta 40 mm
Diámetro del pin	2,0 o 2,5 mm
Peso	1,25 kg
Dimensiones:	
Diámetro	50 mm
Largo	420 mm

FUENTE: Tomado de Hansen (2000)

ANEXO 6
TABLA RESUMEN DE PROPIEDADES POR TROZA

N°	Nivel	DB (g/cm³)	D₁ (g/cm³)	D₂ (g/cm³)	Velocidad (m/s)	MOE_{D1} (kg/cm²)	MOE_{D2} (kg/cm²)	MOE_F (kg/cm²)	MOE_{C//} (kg/cm²)	MOR (kg/cm²)	RM (kg/cm²)
1	A	0,704	1,079	1,051	4098	184773,56	179944,37	101350,76	134774,71	932,34	352,49
2	A	0,679	1,078	1,052	4311	204355,85	199361,67	119007,78	169008,52	1027,02	432,40
3	A	0,714	1,128	1,065	4250	207805,23	196097,63	107316,23	145040,24	928,95	449,66
4	A	0,700	1,102	1,062	4548	232573,45	224059,81	131901,42	186176,41	1090,90	507,68
5	A	0,704	1,105	1,062	4641	242701,32	233254,71	131961,21	183260,57	1107,98	452,50
6	A	0,743	1,159	1,057	4329	221443,43	201966,56	129804,43	175626,56	1071,14	474,56
7	A	0,709	1,136	1,066	4613	246578,35	231265,40	131036,02	189376,50	1029,45	493,45
8	A	0,700	1,130	1,060	4520	235402,00	220710,92	126487,86	178181,35	992,86	438,36
9	B	0,660	1,037	1,050	4488	213114,00	215618,37	119487,20	165069,31	982,91	415,61
10	B	0,659	1,066	1,047	4465	216688,96	212880,94	129134,53	162788,70	963,16	409,20
11	B	0,694	1,087	1,060	4553	229878,70	223986,73	135177,31	173686,67	1102,63	465,51
12	B	0,690	1,076	1,056	4649	237155,91	232682,60	144686,82	191070,28	1078,67	464,11
13	B	0,672	1,074	1,052	4692	241147,44	236137,00	133538,21	157519,92	1077,76	477,00
14	B	0,656	1,080	1,047	4494	222389,91	215652,00	132464,38	166242,57	1065,72	438,63
15	B	0,693	1,124	1,060	4580	240531,69	226675,11	122021,12	149257,79	999,37	444,69
16	B	0,698	1,137	1,062	4542	239151,45	223473,33	120435,56	156325,02	1021,94	409,39
17	B	0,700	1,113	1,060	4413	221014,68	210427,51	105346,79	154896,69	932,28	444,55
18	B	0,687	1,122	1,055	4474	229027,19	215291,08	114851,30	137197,85	1006,18	417,33
19	C	0,637	1,029	1,037	4474	210117,71	211704,86	121862,54	178705,11	978,78	407,33
20	C	0,639	1,044	1,043	4395	205684,95	205523,91	117517,07	165127,31	953,77	397,53
21	C	0,676	1,068	1,051	4536	223999,51	220445,50	117220,68	159504,78	1005,52	440,61
22	C	0,637	1,062	1,052	4372	206978,41	205108,17	123944,87	136554,23	1014,23	414,29

Continuación Anexo 6

N°	Nivel	DB (g/cm3)	D1 (g/cm3)	D2 (g/cm3)	Velocidad (m/s)	MOED1 (kg/cm2)	MOED2 (kg/cm2)	MOEF (kg/cm2)	MOEC// (kg/cm2)	MOR (kg/cm2)	RM (kg/cm2)
23	C	0,656	1,054	1,053	4455	213404,51	213207,75	114093,17	178411,85	946,88	454,76
24	C	0,687	1,128	1,057	4427	225483,90	211275,65	119128,58	140995,34	959,31	443,64
25	C	0,676	1,142	1,057	4211	206446,30	191125,01	119540,27	148553,26	1005,77	427,21
26	C	0,671	1,123	1,057	4240	205859,30	193747,79	109598,03	152177,02	933,82	443,25

ANEXO 7

COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

<i>Variable respuesta</i>	<i>Variable regresora</i>	<i>Coef. Determinación (R^2)</i>
MOE _F	V, Nivel	0,53
MOE _{C//}	V, Nivel	0,37
MOE _F	MOE _{D1} , Nivel	0,42
MOE _{C//}	MOE _{D1} , Nivel	0,24
MOE _F	MOE _{D2} , Nivel	0,51
MOE _{C//}	MOE _{D2} , Nivel	0,35

ANEXO 8

CLASIFICACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE CORRELACIÓN SEGÚN CALZADA (1982)

<i>Coefficiente de correlación (R)</i>	<i>Clasificación</i>
0,2 - 0,3	Muy bajo
0,4 - 0,5	Bajo
0,6 - 0,7	Alto
0,8 - 1,0	Muy alto

ANEXO 9

FOTOGRAFÍAS DE ENSAYOS MECÁNICOS



Ensayo en prensa



Fallas de probetas en flexión estática



Fallas de probetas en compresión paralela