

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE RALEO DE *Tectona grandis* L. f.
(TECA) EN UNA PLANTACIÓN DE OCHO AÑOS EN PUCALLPA

Tesis

para optar el título de:

INGENIERO FORESTAL

Presentado por:

LUIS DANIEL TELLO ALARCON

Tingo María – Perú.

2026



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°047-2026-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 24 de abril de 2026, a horas 11:00 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería en Forestal de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE RALEO DE *Tectona grandis* L.f. (TECA) EN UNA PLANTACIÓN DE OCHO AÑOS EN PUCALLPA”

Presentado por el Bachiller: **TELLO ALARCON, LUIS DANIEL** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO FORESTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 09 de mayo de 2026

Ing. MSc. ROBERT GILBERT PECHO DE LA CRUZ
PRESIDENTE

Dr. DAVID PRUDENCIO QUISPE JANAMPA
MIEMBRO

Ing. MSc. GUNTER BAZA PANDURO
MIEMBRO



Ing. JORGE LUIS VERGARA PALOMINO
ASESOR

Ing. MSc. CLEIDE SANTOS FLORES
ASESOR

Dr. JORGE RIOS ALVARADO
ASESOR



UNAS

VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE
INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE
CIENTÍFICO
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 157 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:


Ingeniería Forestal

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE RALEO DE <i>Tectona grandis</i> L. f. (TECA) EN UNA PLANTACIÓN DE OCHO AÑOS EN PUCALLPA	LUIS DANIEL TELLO ALARCON	10 % Diez	0 % Cero

Tingo María, 25 de mayo de 2026.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



**PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE RALEO DE *Tectona grandis* L. f.
(TECA) EN UNA PLANTACIÓN DE OCHO AÑOS EN PUCALLPA**

Autor	: Bach. Luis Daniel Tello Alarcon
Asesor (es)	: Ing. Mg. Sc. Cleide Santos Flores Ing. Jorge Luis Vergara Palomino Dr. Jorge Ríos Alvarado
Programa de investigación	: Química, Física y Anatomía Forestal
Línea de investigación	: Anatomía Forestal y Física forestal
Eje temático	: Propiedades mecánicas de la madera y otros materiales lignocelulósicos
Lugar de ejecución	: Laboratorio de materiales e insumos – CITE madera y del mueble
Duración del trabajo	: Fecha de inicio: febrero 2025 Fecha de término: enero 2026
Financiamiento	: S/. 5 066,00

Tingo María – Perú. 2026

DEDICATORIA

A mis padres, hermanos y abuelos, por ser en muchas ocasiones fuente de motivación para continuar hasta culminar la carrera profesional.

A mi mamá, Rosa Elvira, por su amor desmedido y palabras de aliento en momentos de incertidumbre.

A mi abuela María Aurora, por transmitirme, desde que tengo uso de razón, el valor de la educación.

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores; Cleide Santos, Jorge Vergara y Jorge Ríos, por su confianza y apoyo.

A Andrea Carrillo, Olga Loyola y los trabajadores de la empresa por permitirme obtener la materia prima que fue crucial para la ejecución de la investigación.

A Javier Ahrens, John Bartolo, José Ugarte y demás ingenieros del CITE madera y del mueble por su apoyo incondicional y asesoría técnica en la realización de los ensayos mecánicos y evaluaciones posteriores.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Marco Teórico.....	3
2.1.1. Madera	3
2.1.2. Características de la madera.....	3
2.1.3. Propiedades mecánicas de la madera	4
2.1.4. Factores que influyen en las propiedades mecánicas de la madera	7
2.1.5. Plantaciones forestales	11
2.1.6. Taxonomía de la teca.....	11
2.1.7. Descripción botánica.....	11
2.1.8. Distribución y ecología	12
2.1.9. Usos de la Teca.....	12
2.2. Estado del Arte	12
2.2.1. A nivel internacional	12
2.2.2. A nivel nacional.....	16
2.2.3. A nivel regional	17
2.2.4. A nivel local	17
III. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1. Lugar de ejecución	18
3.2. Materiales	19
3.2.1. Materiales de campo	19
3.2.2. Materiales y equipos de laboratorio	19
3.3. Métodos.....	20
3.3.1. Flexión Estática.....	20
3.3.2. Compresión paralela a la fibra	23
3.3.3. Tracción perpendicular a la fibra	25
3.4. Criterios de la investigación	27
3.4.1. Enfoque, tipo, nivel y diseño de la investigación	27
3.4.2. Población, muestra y tipo de muestreo	28

3.4.3. Factores de estudio y variable respuesta	29
3.4.4. Análisis estadístico	31
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1. Flexión estática a tres secciones de altura de <i>T. grandis</i>	32
4.1.1. Módulo de ruptura (MOR) (kg/cm ²).....	32
4.1.2. Esfuerzo al límite proporcional (ELP) (kg/cm ²).....	34
4.1.3. Módulo de elasticidad (MOE) (kg/cm ²).....	36
4.2. Compresión paralela a la fibra en tres secciones de altura de <i>T. grandis</i>	38
4.2.1. Resistencia máxima (RM) (kg/cm ²).....	38
4.2.2. Módulo de elasticidad (MOE) (kg/cm ²).....	40
4.2.3. Esfuerzo al límite proporcional (ELP) (kg/cm ²).....	41
4.3. Tracción perpendicular a la fibra en tres secciones de altura de <i>T. grandis</i>	43
4.3.1. Esfuerzo máximo de tracción (ET) (kg/cm ²)	43
V. CONCLUSIONES	46
VI. PROPUESTAS A FUTURO	47
VII. REFERENCIAS.....	48
ANEXOS	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página.
1. Clasificación de las propiedades mecánicas de la madera libre de defectos a un contenido de humedad de 12 %.....	5
2. Clasificación de la resistencia a la tracción perpendicular al grano.	6
3. Clasificación de la madera según su densidad expresada en g/cm ³	8
4. Taxonomía de <i>T. grandis</i>	11
5. Coordenadas de ubicación de árboles seleccionados de la plantación.	18
6. Número de probetas por cada ensayo mecánico.....	21
7. Operacionalización de variables.	30
8. Análisis de varianza del MOR (kg/cm ²) en flexión estática.	32
9. Análisis de varianza del ELP (kg/cm ²) en flexión estática.	34
10. Análisis de varianza del MOE (kg/cm ²) en flexión estática.	36
11. Análisis de varianza de RM (kg/cm ²) en compresión paralela a la fibra.	38
12. Análisis de varianza del MOE (kg/cm ²) en compresión paralela a la fibra.	40
13. Análisis de varianza del ELP (kg/cm ²) en compresión paralela a la fibra.	42
14. Análisis de varianza del ET (kg/cm ²) en tracción perpendicular a la fibra.	44
15. Valores obtenidos para las probetas de flexión estática.	57
16. Valores obtenidos para las probetas de compresión paralela a la fibra.....	59
17. Valores obtenidos para las probetas de tracción perpendicular.	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página.
1. Ubicación de los árboles seleccionados.	19
2. Secciones de altura de cada individuo.....	20
3. Dimensiones de la probeta de flexión estática por el método secundario.....	21
4. Tipos de posibles fallas en el ensayo de flexión estática.....	23
5. Dimensiones de la probeta de compresión paralela al grano.....	23
6. Posibles fallas en el ensayo de compresión paralela al grano.....	25
7. Dimensiones de la probeta de tracción perpendicular a la fibra.	26
8. Prueba de comparación de medias del MOR (kg/cm^2) para flexión estática.....	32
9. Prueba de comparación de medias del ELP (kg/cm^2) para flexión estática.....	34
10. Prueba de comparación de medias del MOE (kg/cm) para flexión estática.	36
11. Prueba de comparación de medias de RM (kg/cm^2) para compresión paralela a la fibra.	38
12. Prueba de comparación de medias del MOE (kg/cm^2) para compresión paralela a la fibra.....	40
13. Prueba de comparación de medias del ELP (kg/cm^2) para compresión paralela a la fibra.	42
14. Prueba de comparación de medias de ET (kg/cm^2) para tracción perpendicular a la fibra.	44
15. Identificación de árboles al azar.....	62
16. Georeferenciación de árboles.....	62
17. Acopio de trozas.....	63
18. Aserrado de trozas.....	63
19. Cepillado de trozas.....	64
20. Corte de trozas para la obtención de tablones.....	64
21. Obtención de tablones.	65
22. Codificación de tablones.	65
23. Secado al aire libre de madera.	66
24. Seguimiento del secado mediante pesado.	66
25. Peso de tablón.	67
26. Cepillado de tablones.	67
27. Codificación de listones.	68
28. Habilitación de probetas de flexión estática.	68
29. Probetas de flexión estática.	69
30. Probetas de compresión paralela.....	69
31. Probeta de tracción perpendicular.....	70
32. Medición y registro del centro de las probetas de flexión estática.....	70

33. Preparación de probeta.	71
34. Coloración de probeta en la prensa mecánica.	71
35. Ensayo de flexión estática.	72
36. Tipo de falla combinada en flexión estática.	72
37. Secado de los cubos obtenidos de las probetas de flexión estática.	73
38. Pesado de los cubos de las probetas de flexión estática.	73
39. Falla de división en cuña en ensayo de compresión paralela.	74
40. Pesado de probeta de compresión luego del ensayo.	74
41. Ensayo de tracción perpendicular.	75
42. Gráfico fuerza/deformación en tracción perpendicular.	75
43. Secado al horno para determinación del contenido de humedad.	76
44. Regulación de temperatura en el desecador.	76

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar algunas de las propiedades mecánicas de la madera de raleo de *Tectona grandis* provenientes de una plantación comercial de 8 años. Se colectó una muestra de cinco individuos de una parcela de 2 631 árboles, los cuales, promediaron dimensiones de 16 cm de diámetro y 15 m de altura total. Se realizó la evaluación comparativa en tres secciones de altura del fuste; a 2 m, 4 m y 6 m. En el ensayo de flexión estática (14,49 % de CH) para el MOR se evidenciaron diferencias estadísticas en las secciones a 2 m y 6 m, siendo esta última la de mayor valor con 1034,26 kg/cm². En el ensayo de compresión paralela (12,89 % de CH), existieron diferencias estadísticas en RM para las secciones a 2 m y 6 m, siendo esta última la mayor con un promedio de 504,32 kg/cm². Por último, en tracción perpendicular a la fibra (11,92 % de CH), por disponibilidad de madera, se extrajeron probetas de las secciones a 2 y 4 m, los valores de ET no presentaron diferencias significativas una de la otra, sin embargo, el valor mayor numérico se registró en la sección a 2 m con 47.38 kg/cm². En conclusión, la clasificación de resistencia para cada ensayo fue de “alta”, “media” y “media”, respectivamente.

Palabras clave: propiedades mecánicas, *Tectona grandis*, flexión estática.

ABSTRACT

The research objective was to determine some mechanical properties of thinning wood from *Tectona grandis* obtained from an 8-year-old commercial plantation. A sample of five individuals was collected from a plot of 2 631 trees, which averaged dimensions of 16 cm in diameter and 15 m in total height. A comparative evaluation was conducted across three stem height sections: 2 m, 4 m, and 6 m. In the static bending test (14.49% MC), statistical differences in MOR were observed between the 2 m and 6 m sections, with the latter yielding the highest value at 1,034.26 kg/cm². In the parallel-to-grain compression test (12.89% MC), statistical differences in CS were found for the 2 m and 6 m sections, the latter being the highest with an average of 504.32 kg/cm². Lastly, in the tension-perpendicular-to-grain test (11.92% MC), specimens were extracted from the 2 m and 4 m sections due to wood availability; TS values showed no significant differences, though the highest numerical value was recorded in the 2 m section at 47.38 kg/cm². In conclusion, the strength classification for each test was “high,” “medium,” and “medium,” respectively.

Keywords: mechanical properties, *Tectona grandis*, static bending.

I. INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales ocupan solamente el 10 % del área de bosques mundial, sin embargo, aportan más del 30 % de la producción de madera industrial en el mundo (Guariguata et al., 2017). Países como Argentina, Chile y Uruguay, actualmente obtienen más del 80 % del suministro de madera y otros productos forestales de plantaciones (SERFOR Perú, 2023). Por el contrario, Perú se abastece de casi 90 % de estos bienes de bosques naturales y su sector forestal es encabezado por el sobre aprovechamiento selectivo de especies, lo que aporta a una deforestación promedio anual de 150 000 ha (SERFOR Perú, 2023). Por esta razón, tanto el estado como empresas privadas realizan esfuerzos para fomentar la instalación de plantaciones forestales a fin de reducir la presión sobre los bosques y aportar al desarrollo sostenible del sector.

Ucayali es una de las regiones que lidera la promoción de las plantaciones forestales. Es así, que empresas como Tream Forestal E.I.R.L. se han destacado en los últimos años por su enfoque en la reforestación y producción sostenible de especies nativas e introducidas con alto valor comercial. De estas últimas, destaca *Tectona grandis* L. f. (teca), cuyas características la califican como madera de buena calidad, debido a su densidad media, alta durabilidad natural a agentes físicos y biológicos y, rasgos estéticos atractivos.

El interés por esta especie demanda prácticas de aprovechamiento óptimas, no obstante, un desafío que surge con relevancia en las operaciones silviculturales es el manejo de la madera de raleo, la cual, es a menudo subvalorada y comercializada sin algún valor agregado, por la principal razón de que no se cuentan con suficientes estudios tecnológicos para identificar sus mejores aplicaciones. Por tal, se realiza el siguiente cuestionamiento; ¿Cuáles serán las propiedades mecánicas de la madera de raleo de *Tectona grandis* L. f. en una plantación de ocho años en Pucallpa?

Conocer las propiedades mecánicas de la madera de raleo en cuanto a la flexión estática, compresión paralela y tracción perpendicular a la fibra permitirá proponer aptitudes de uso, estimar las condiciones de utilización y procesamiento adecuado de la especie, asignándole un mayor valor en la industria forestal del país.

Bajo este contexto, la presente investigación busca determinar las propiedades mecánicas de la madera de *T. grandis* L. f. (teca) proveniente del raleo en una plantación de 8

años en Pucallpa con el fin de optimizar el uso del recurso y contribuir con el desarrollo sostenible del sector forestal.

1.1. Objetivo general

Evaluar las propiedades mecánicas de la madera de raleo de *Tectona grandis* L. f. (teca), de una plantación de ocho años en Pucallpa.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar la flexión estática de la madera de raleo de *T. grandis* (teca) de una plantación de ocho años en Pucallpa.
- Determinar la comprensión paralela a la fibra de la madera de raleo de *T. grandis* (teca) de una plantación de ocho años en Pucallpa.
- Determinar la tracción perpendicular a la fibra de la madera de raleo de *T. grandis* (teca) de una plantación de ocho años en Pucallpa.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Madera

La madera, leño o xilema es la parte sólida del árbol que se encuentra debajo de la corteza (Giménez et al., 2005). Es un material orgánico de compleja estructura biológica cuyas funciones básicas dentro del árbol son la de conducir agua desde la raíz hasta las hojas, brindar soporte mecánico al individuo y servir de almacén de bioquímicos. Tiene tres tipos de tejidos para cumplir estas tareas; tejido vascular, tejido fibroso y tejido parenquimatoso, respectivamente. Además, la madera está compuesta de polímeros como celulosa, lignina, hemicelulosa y menores cantidades de inclusiones dentro de su estructura celular (Santiago et al., 2013; Ross, 2010).

2.1.2. Características de la madera

La madera, debido a su composición celular, es considerada un material heterogéneo con distintas propiedades de acuerdo con la dirección que se tome; transversal, tangencial y radial. Es un material poroso de origen biológico y, por lo tanto, biodegradable, además, posee buena resistencia térmica, acústica y eléctrica (Giménez et al., 2005). Por otra parte, las variaciones en las proporciones y características de sus polímeros y diferencias en la estructura celular hacen que la madera sea pesada o ligera, rígida o flexible. Es decir, la madera varía entre especies, individuos de una misma especie e, incluso dentro de un mismo árbol (Ross, 2010). Algunas de las características consideradas más importantes son la higroscopicidad y la anisotropía.

2.1.2.1. Higroscopicidad

La madera es higroscópica, es decir, tiene la propiedad de ganar y perder agua de acuerdo con las condiciones del ambiente, buscando un equilibrio constante. Este intercambio de humedad depende de la humedad relativa, la temperatura del aire y el contenido actual de humedad en la madera. Muchas propiedades físicas y mecánicas de la madera dependen del contenido de humedad, prefiriéndose generalmente seca ya que aumenta su durabilidad y performance (CITEmadera, 2009; Ross, 2010).

Esta propiedad se debe a que la pared celular está en su mayoría compuesta de celulosa y hemicelulosa, los grupos hidroxilo de estos hacen que las paredes celulares de la madera sean higroscópicas a pesar de que esta capacidad se ve limitada por la lignina; material que cementa las células y el cual, es hidrofóbico (Ross, 2010).

2.1.2.2. Anisotropía

La anisotropía confiere diferentes características y comportamientos físicos y mecánicos a la madera en las direcciones longitudinal, radial y tangencial de acuerdo con sus fibras. De esta manera, concede a la madera versatilidad para el diseño de productos estructurales y no estructurales (Alvares y Lerda, 2011).

La madera tiende a contraerse o hincharse por la pérdida o ganancia de humedad. Sin embargo, este cambio dimensional varía según la dirección de sus ejes. Sucede en mayor medida en la sección tangencial; en dirección de los anillos de crecimiento, aproximadamente la mitad de este valor en la sección radial; paralelo a los radios, y mínimamente longitudinalmente; a lo largo de la fibra. Esta propiedad de la madera no solo afecta su apariencia, si no también sus propiedades físico-mecánicas (CITEmadera, 2009; Giménez, 2005; Ross, 2010).

Por otra parte, Alarcón (2019), menciona a la ortotropía como un caso específico de anisotropía, se refiere a que la madera tiene tres ejes ortogonales entre sí, de manera que sus propiedades mecánicas son independientes en cada una de ellas; axial, radial y tangencial.

2.1.3. Propiedades mecánicas de la madera

Las propiedades mecánicas de la madera se refieren al comportamiento y resistencia de esta al ser sometida a distintas fuerzas o cargas externas. Debido a la característica ortotrópica y heterogeneidad de la madera, las propiedades mecánicas varían entre especies, individuos de la misma especie y partes de un mismo árbol. Conocer las propiedades mecánicas fomenta la clasificación de la madera, además de estimar con confiabilidad las mejores aptitudes de uso según su resistencia y deformación (Berger y Suirezs, 2010; Refort y Keil, 2012).

La madera es un material viscoelástico, es decir, se puede distinguir dos tipos de deformación; elástica y plástica. La primera se refiere a que la madera puede deformarse ante niveles bajos de esfuerzo y volver a su estado original al quitar la carga. Por otra parte, la plasticidad indica que, ante esfuerzos más altos, la madera sufre deformaciones permanentes (Aalto University - Wood Science, 2021; Ross, 2010).

La resistencia de la madera ante diversos esfuerzos depende principalmente de la densidad, a su vez, del contenido de humedad (CH) y del tipo de madera. Al secar la madera hasta el punto de saturación de las fibras (PSF) no existen cambios significativos en su resistencia, solo en su peso, sin embargo, al ir disminuyendo la humedad, se pierde el agua presente en las paredes celulares. Esta pérdida genera que las fibras de la madera se acerquen unas a otras aumentando la resistencia y rigidez y, por lo tanto, la densidad. Asimismo, la presencia madera temprana o tardía también influye en la densidad de la madera (Askeland y Wright, 2017).

De esta manera, Dávalos y Bárcenas (1999) brindaron una clasificación de maderas mexicanas según sus propiedades mecánicas a un contenido de humedad seco (12 %) como se indica en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Clasificación de las propiedades mecánicas de la madera libre de defectos a un contenido de humedad de 12 %.

Clasificación	Flexión Estática		Compresión paralela
	MOE	MOR	RM
	kg/cm ² (*1000)	kg/cm ²	kg/cm ²
Muy Bajo	< 75	< 550	< 325
Bajo	76 – 105	551 – 800	326 - 450
Medio	106 – 125	801 – 1000	451 - 530
Alto	126 – 150	1001 - 1300	531 - 650
Muy Alto	> 150	> 1300	> 650

Nota: MOE; módulo de elasticidad, MOR; módulo de ruptura, RM; resistencia máxima.

Por otra parte, en la **Tabla 2** se muestra una clasificación de la resistencia a la tensión perpendicular a la fibra propuesta por Aróstegui et al. (1986), cuyos valores los obtuvo en su investigación de 40 especies del Bosque Nacional Alexander Von Humboldt.

Tabla 2. Clasificación de la resistencia a la tracción perpendicular al grano.

Clasificación	Tracción perpendicular al grano	
	ET	
	kg/cm ²	
Muy Baja	< 20	
Baja	21 - 40	
Media	41 - 60	
Alta	61 - 80	
Muy Alta	> 81	

Nota: ET; esfuerzo máximo de tracción.

2.1.3.1. Flexión estática

Se dice que una pieza de madera es sometida a este ensayo cuando se le aplica una carga que tiende a curvarla. Esto sucede en piezas con longitud mucho mayor con relación a su sección transversal, donde la carga es aplicada al centro de la pieza. Se producen tres tipos de esfuerzo básicos; compresión, tensión y corte. El primero sucede al acortar longitudinalmente la sección o cara donde se aplica la carga, la tensión, por su parte, ocurre en la parte inferior o contraria a la carga y, por último, el cizalle en el centro de la pieza (Berger y Suirez, 2010). Este ensayo resulta práctico para aplicaciones en vigas o largueros de diferentes elementos que tengan que resistir fuerzas de flexión (Ross, 2010).

En este ensayo se determinan el módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) para evaluar la resistencia a la carga. El MOE sirve para medir la rigidez del material y el MOR, para conocer cuál es la carga máxima que este puede resistir (Hiziroglu, 2016). Entre estos, se encuentra el Esfuerzo al Límite Proporcional (ELP), el cual indica el esfuerzo máximo al que la madera puede someterse en el campo elástico, es decir, que, sobre este valor, la madera sufre deformaciones permanentes.

2.1.3.2. Compresión paralela a la fibra

Es la resistencia que opone una pieza de madera a una carga aplicada en sentido transversal o paralelo a la dirección de la fibra que busca acortar su longitud y aumentar su sección. Se dice que esta resistencia es 7 veces mayor a que si la carga se aplicara en sentido perpendicular a la fibra (Berger y Suirezs, 2010). Este ensayo es necesario para la aplicación de cualquier tipo de columna o poste (Ross, 2010). En esta prueba se determina el valor de la resistencia máxima (RM), aunque también se puede determinar el MOE y ELP.

2.1.3.3. Tracción perpendicular a la fibra

En este ensayo, la pieza de madera es sometida a dos fuerzas iguales aplicadas en sentido contrario. La resistencia que opone la madera está dada por la adherencia de las fibras al ser tensionadas por dos fuerzas que tienden a separarlas. En este caso se calcula el valor de la tensión de corte a la tracción (Berger y Suirezs, 2010), del cual, se determina el esfuerzo máximo de tracción (ET).

2.1.4. Factores que influyen en las propiedades mecánicas de la madera

Existen principalmente dos componentes que influyen en el comportamiento y resistencia de la madera; las características naturales del material y las condiciones del ambiente de uso o aplicación del material (Berger y Suirezs, 2010; Ross, 2010).

2.1.4.1. Naturaleza del material

A pesar de que para realizar ensayos mecánicos se solicita madera sin defectos y con grano recto, las características del crecimiento natural del árbol hacen que los distintos productos obtenidos de la madera varíen en sus propiedades mecánicas. Por esta razón, es importante considerar estas características al evaluar y estimar el uso o performance de los productos de madera. La densidad básica, nudos, dirección del grano, madera de reacción, madera juvenil y extractivos, son los principales elementos a considerar (Berger y Suirezs, 2010; Ross, 2010):

a) Densidad básica

Es la relación que existe entre el peso de la madera seca (material leñoso) y su volumen húmedo. Anatómicamente, la disminución del tamaño de las cavidades celulares y aumento del grosor de las paredes celulares, en especial de las fibras, hace que las especies tengan más material sólido por unidad de volumen y, por lo tanto, mayor densidad. Esta propiedad es considerada una de las más importantes al ser un indicativo del comportamiento físico-mecánico de la madera. En ensayos como flexión, compresión y tracción paralela y perpendicular a la fibra, la madera aumenta su resistencia a mayor densidad básica (León, 2010; Kasal, 2004; Ross, 2010; Berger y Suirezs, 2010).

En la **Tabla 3** se presenta una clasificación de la madera de acuerdo con su densidad básica.

Tabla 3. Clasificación de la madera según su densidad expresada en g/cm³.

Clasificación	Densidad (g/cm³)
Muy livianas	0,100 a 0,350
Livianas	0,351 a 0,550
Semipesadas	0,551 a 0,750
Pesadas	0,751 a 1,000
Muy pesadas	1,000

Fuente: Adaptado de Berger y Suirezs (2010).

b) Nudos

Los nudos son los restos de las ramas que se muestran en una pieza de madera. Existen de dos tipos; integrados y encapsulados, ambos disminuyen los valores de resistencia de la madera, ya que afectan la continuidad y cambio de dirección de las fibras. Los primeros se refieren a que la rama estaba viva cuando se formaron los anillos de crecimiento, es decir, estos se extendieron sin interrupciones integrando la madera del tronco con la madera de la rama. Los nudos encapsulados suceden cuando la rama estaba muerta cuando los anillos de crecimiento se formaron, estos usualmente alteran la dirección del grano más que los nudos integrados, afectando de en mayor medida a las propiedades mecánicas (Ross, 2010).

c) Dirección del grano

Aunque dependa del uso que se le va a dar a la madera, la mayor resistencia que una pieza de madera pueda dar se da en ángulos del grano más rectos o paralelos con el eje axial del árbol. Esto es, cuanto más inclinación haya en la fibra, menores valores se obtendrán en sus propiedades mecánicas (Ross, 2010). Los efectos de la inclinación del grano son menos severos en fuerzas de compresión que en las de tensión o tracción, esto se debe al comportamiento dúctil de la madera en compresión (Arriaga et al., 2023).

d) Madera de reacción

Es un tejido leñoso anormal que se forma como respuesta a la inclinación del tronco a fin de volver a una posición más normal, generalmente, esta es más densa y oscura que la madera normal por la mayor proporción de madera tardía, además, se la puede diferenciar en la sección transversal por un nudo excéntrico. En gimnospermas, es conocida como madera de compresión y se encuentra en la parte inferior de la inclinación. En angiospermas, se le llama madera de tensión y se encuentra en la parte superior de la inclinación (Ross, 2010).

e) Madera juvenil

Se produce cerca de la médula del tronco, tiene mayor ángulo de fibrillas lo que causa que la contracción longitudinal sea hasta 10 veces que la de madera adulta. En sus propiedades mecánicas, la relación del módulo de elasticidad, módulo de ruptura y máximo esfuerzo de tracción varía de 0,45 a 0,75, 0,5 a 0,9 y de 0,5 a 0,95, respectivamente (Ross, 2010). Por lo general, esta madera es considerada de menor calidad debido a sus propiedades mecánicas inferiores a la madera adulta (Flórez et al., 2014).

f) Madera adulta

La madera adulta se caracteriza por presentar mayor longitud y espesor de pared celular que la madera juvenil, además de tener menor ángulo micro fibrilar, lo que le otorga propiedades elásticas resistentes más elevadas. En plantaciones forestales, esta se atribuye a ciclos de corta más largos (Refort et al., 2024).

g) Extractivos

Son un conjunto de compuestos químicos de la madera, la mayoría de estos se encuentran en el duramen, entre los lúmenes de las células y las cavidades intercelulares, brindan un efecto de rigidez a las paredes celulares al aportar densidad y reducen la contracción de la madera (Arévalo y Hernández, 2008; Ávila y Herrera, 2012). Estos pueden ser aceites que dan color a la madera o minerales como sílice, actúan como protección contra en el entorno y patógenos, pueden comprender hasta el 10 % de la madera (Askeland y Wright, 2017). El módulo de ruptura y la resistencia en compresión paralela de algunas especies disminuye luego de quitar los extractivos (Ross, 2010).

2.1.4.2. Condiciones del ambiente

La resistencia mecánica de la madera también se ve influenciada por las condiciones del ambiente donde ejercen su aplicación, factores como el contenido de humedad de la madera en ese momento, la temperatura del ambiente, velocidad de la aplicación de la carga, duración de la carga y la exposición a químicos son los más importantes a considerar (Berger y Suirezs, 2010; Ross, 2010):

a) Contenido de humedad

Generalmente, las propiedades mecánicas de la madera aumentan cuando el contenido de humedad disminuye de 8 % a 15 % en pruebas como tracción paralela y perpendicular a la fibra, compresión paralela y perpendicular a la fibra y, flexión (Ross, 2010). Por otra parte, sobre el PSF, la resistencia se mantiene constante (Berger y Suirezs, 2010).

b) Temperatura

Comúnmente, la resistencia de la madera aumenta cuando la temperatura es baja y disminuye cuando las temperaturas son altas (Berger y Suirezs, 2010; Ross, 2010). Para las clases de servicio a las que se verá expuesta la madera, se consideran temperaturas medias de 20°C y entre 65 % y 85 % de humedad relativa, estos datos coinciden con los de las normas técnicas de ensayos mecánicos (Martínez, 2018).

c) Velocidad de aplicación de la carga

La velocidad de aplicación de la carga es estandarizada por cada norma técnica, sin embargo, a velocidades altas los valores de resistencia son mayores debido a la corta inercia de reacción que presenta la madera (Berger y Suirezs, 2010; Ross, 2010).

d) Duración de la carga

Para una pieza de madera que sostiene una carga por un periodo largo de tiempo, la carga de ruptura es mucho menor que la obtenida por ensayos mecánicos. Una pieza que sostiene una carga por 10 años es el 60 % menos que la obtenida en una prueba de flexión estática estandarizada. Es decir, la duración de la carga llega a menorar la resistencia de la madera porque sucede un efeto acumulativo sobre esta (Berger y Suirezs, 2010; Ross, 2010).

e) Exposición a químicos

El efecto de la exposición está en función del tipo específico de la sustancia química. Existen dos tipos de líquidos; los que producen hinchamiento y los que no. El agua, el alcohol y otros líquidos orgánicos no degradan químicamente la madera, pero la hinchan, y la afectación sobre su resistencia mecánica se refleja en la proporción de hinchamiento. Los aceites de petróleo y creosota no afectan las propiedades mecánicas de la madera. Por otra parte, el amoniaco reduce considerablemente la rigidez y resistencia en general, sin embargo, estas se recuperan una vez eliminada la sustancia (Ross, 2010).

2.1.5. Plantaciones forestales

La Ley Forestal y de Fauna Silvestre (2011) describe a las plantaciones forestales como áreas de terreno donde se han instalado especies forestales propias de la zona o especies introducidas para gozar de diversos fines, como producción de madera u otro producto forestal, protección, recreación o el beneficio de servicios ecosistémicos. Según la FAO (2021) a nivel mundial, existen cerca de 131 millones de hectáreas de plantaciones forestales y, de esta cantidad, el 44 % es de especies introducidas. En Perú, el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (2022), registró la cantidad de 88 944 ha de plantaciones.

2.1.5.1. Raleo

El raleo es una actividad silvicultural que consiste en la eliminación gradual de árboles de rodales jóvenes y densos, donde se favorece el mejor crecimiento de los individuos restantes al evitar la alta competencia por agua, luz y nutrientes. Por otra parte, a partir del segundo raleo, cuando los árboles alcanzan los 14 metros de altura, se consiguen trozas de mejor calidad comparados con los del primer raleo (Meza y Torres, 2012).

2.1.6. Taxonomía de la teca

En la **Tabla 4** se presenta la descripción taxonómica de la especie *T. grandis*.

Tabla 4. Taxonomía de *T. grandis*.

Reino	Plantae
Filo	Tracheophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Lamiales
Familia	Lamiaceae
Género	<i>Tectona</i> L. f.

Fuente: GBIF (2023).

2.1.7. Descripción botánica

Es un árbol caducifolio de fuste recto con corteza de color castaño claro, áspera al tacto, delgada y con fisuras, alcanza 45 m de altura y 2 m de diámetro. Su raíz es larga, robusta y pivotante, forma varias raíces laterales, sus raíces son sensibles a la falta de oxígeno. Presenta hojas simples, opuestas entre 10 – 85 cm de longitud y entre 6 – 50 cm de ancho con pecíolos gruesos y nervios prominentes en ambas caras. Presenta inflorescencia en forma de panículas terminales de 40 – 100 cm de longitud, normalmente entre junio y setiembre. Sus

flores monoicas aparecen en panículas erectas y ramificadas entre 45- 60 cm de longitud. Sus flores perfectas están cubiertas de cierta pubescencia, cáliz grisáceo y 6 óvulos. Fruto subgloboso de color pardo claro y poca pubescencia; endocarpo duro con alrededor de 4 semillas, cada una de 0,6 cm de longitud (ITTO, 2024; Weaver, 2000).

2.1.8. Distribución y ecología

Es nativa del sudeste de Asia en Myanmar, India, Tailandia y Malasia. Sin embargo, ha sido plantada en Latinoamérica, África, Australia y otras regiones tropicales y subtropicales como plantaciones puras y también como sistemas agroforestales. Estas con fines comerciales y también para investigación, algunas bajo programas de mejoramiento genético (ITTO, 2024; Weaver, 2000).

2.1.9. Usos de la Teca

A comienzos del siglo XX, en lugares donde es nativa se usaba mucho para la construcción de edificaciones como casas, muelles y puentes. Actualmente, la madera de teca se usa para cubierta de barcos, aviones y buques de gran tamaño por su excelente estabilidad, se usa también para mueblería fina, pisos, construcciones en interior, marcos de puertas y ventanas. Se resalta su uso en cocinas, laboratorios, tinas y bañeras por su alta resistencia a los ácidos (ITTO, 2024; Weaver, 2000).

En Java, se realizan inciensos del aserrín de teca. Medicinalmente, una pasta hecha con el polvo de la madera se utiliza para afecciones como dolores de cabeza y tumores. Aceite de teca se usa como tónico para el cabello (ITTO, 2024).

2.2. Estado del Arte

2.2.1. A nivel internacional

Nájera-Luna et al. (2005) determinaron las propiedades mecánicas de *Quercus laeta* Liemb. (roble blanco) de Durango, México, cuya densidad básica fue de 0,68 g/cm³. En compresión paralela a la fibra, obtuvieron una RM de 455,7 kg/cm² (12 % CH) y una RM de 264,1 kg/cm² (46 % CH). En tensión perpendicular a la fibra las diferencias no fueron estadísticas, pero sí numéricas, registrando un ET de 65,6 kg/cm² (12 % CH) y un ET de 56,7 kg/cm² (48 % CH). Por último, en el ensayo de flexión estática obtuvieron diferencias estadísticas significativas para ambos contenidos de humedad; para el estado seco un MOR de

818,7 kg/cm² (12 % CH) y para el estado verde un MOR de 634,1 kg/cm² (37 % de CH), clasificándolos como resistencias Alta y Media, respectivamente.

Telles et al. (2017) realizaron ensayos mecánicos a la madera de *T. grandis* de 11 años provenientes de una plantación comercial en Michoacán, México. Colectaron 6 individuos con dimensiones promedio de 14,9 cm de diámetro y 13 m de altura total. Densidad básica de 0,59 g/cm³. En compresión paralela a la fibra presentaron una RM de 326,1 kgf/cm², ELP de 252,7 kgf/cm² y MOE de 182 053 kgf/cm², clasificándola como una resistencia alta, baja y muy alta, respectivamente. En tensión perpendicular registraron un ET de 41,2 kgf/cm², calificándola como resistencia media.

Rodríguez et al. (2014) investigaron las propiedades mecánicas de *T. grandis* provenientes de plantaciones comerciales en México. Recolectaron árboles de 9 y 15 años de Campeche, 21 años de Chiapas y 15 años de Tabasco. Los resultados en flexión estática fueron; 9 años de Campeche MOE de 85 911 kg/cm² y MOR de 938,1 kg/cm², 15 años de Campeche MOE de 94 690,8 kg/cm² y MOR de 1 101,3 kg/cm², Tabasco MOE de 96 658,9 kg/cm² y MOR de 1 091,1 kg/cm² y Chiapas MOE de 93 987,2 kg/cm² y MOR de 989,1 kg/cm². En compresión paralela a la fibra, los resultados fueron; 9 años de Campeche MOE de 74 449,5 kg/cm² y MOR de 356,9 kg/cm², 15 años de Campeche MOE de 102 461,1 kg/cm² y MOR de 489,5 kg/cm², Tabasco MOE de 108 579,4 kg/cm² y MOR de 438,5 kg/cm² y Chiapas MOE de 111 353 kg/cm² y MOR de 448,7 kg/cm².

Abarca (2021) determinó las propiedades mecánicas de la madera de nueve clones de caoba *Swietenia macrophylla* (caoba) de 8 años provenientes de una plantación en Sarapiquí, Costa Rica. Densidad básica de 0,486 g/cm³. Para flexión estática obtuvieron en promedio un MOR de 666,3 kg/cm² con un coeficiente de variación (C.V.) del 14,47 % y un MOE de 73 816 kg/cm² de con un C.V. del 15,91 %. Para compresión paralela a la fibra registraron una RM promedio de 388,9 kg/cm² con un C.V. de 15,1 %.

Castro y Raigosa (2000) determinaron las propiedades mecánicas de la madera de *T. grandis* de 17 años provenientes de una plantación en San Joaquín de Abangares, Costa Rica. Colectaron 3 árboles de un área de plantación de 5 ha. La densidad básica fue de 0,58 g/cm³ y el CH de 12%. En flexión estática registraron un ELP de 587 kg/cm², MOR de 991 kg/cm² y MOE de 112 000 kg/cm². En compresión paralela al grano, se registró una RM de 492 kg/cm². Además, indicaron que, debido a sus características, la madera de teca se puede utilizar

en la construcción de embarcaciones, artesanías, muebles de interior y exterior y, pisos y parquet.

Medina et al. (2020) determinaron las propiedades mecánicas de álamos de cortinas forestales en Río Negro, Argentina. Colectaron 5 individuos de *Populus nigra cv thaisiana* (álamo chileno), 5 de *Populus x canadensis* (conti 12) y 5 de boleana *Populus alba L. var. bolleana* Lauche Otto (boleana). Las densidades básicas fueron 0,39 g/cm³, 0,44 g/cm³ y 0,45 g/cm³, respectivamente. En flexión estática el álamo chileno registró un MOR de 680,2 kg/cm² y MOE de 87 309,6 kg/cm², boleana un MOR de 757,5 kg/cm² y MOE de 99 399,9 kg/cm² y, conti 12 un MOR de 778,2 kg/cm² y MOE de 104 723 kg/cm².

Alvis-Gordo et al. (2017) evaluaron las propiedades mecánicas de la madera de *Ocotea brevipetiolata* van der Werff (uraco) provenientes de Putumayo, Colombia. Densidad básica de 0,54 g/cm³, considerándola medianamente pesada. Los resultados se ajustaron a un 12 % de CH. En flexión estática, se registró un ELP de 626 kg/cm², MOR de 990 kg/cm² y MOE de 164 539 kg/cm². En compresión paralela a la fibra, se registró un ELP de 325 kg/cm², MOR de 574 kg/cm² y MOE de 250 432 kg/cm².

Betancur et al. (2000) determinaron las propiedades mecánicas de la *T. grandis* de Puerto Libertador, Colombia. Densidad básica de 0,55 g/cm³. El ELP, MOR y MOE para flexión estática fue de 670 kg/cm², 905,1 kg/cm² y 104 400 kg/cm², respectivamente. Para compresión paralela a la fibra el ELP fue de 367,7 kg/cm² y MOR de 444,2 kg/cm².

Nugshi (2021) determinó las propiedades mecánicas de la madera de *Hevea brasiliensis* (caucho) de Los Ríos, Ecuador. Densidad básica de 0,46 g/cm³. Recolectó tres árboles y evaluó cada uno a tres niveles de altura; base, medio y ápice. Los resultados promedio de flexión estática fueron ELP de 309,8 kg/cm², MOR de 309,8 kg/cm² y MOE de 56 338,6 kg/cm². Para compresión paralela a la fibra un ELP de 201,4 kg/cm².

Acosta (2023) analizó las propiedades mecánicas de la madera de *Cedrelinga catenaeformis* (tornillo) provenientes de distintos aserraderos en Napo, Ecuador. Los resultados para flexión estática fueron: para el aserradero T20 obtuvo un MOE de 109 344 kg/cm² (densidad seca al aire 0,68 g/cm³) y para el aserradero T11 un MOE de 79 077,2 kg/cm² (densidad seca al aire 0,62 g/cm³), ambas maderas a 17 % CH. Por otra parte, en compresión paralela a la fibra obtuvo para el aserradero T20 un MOE de 45 477,9 kg/cm² (densidad seca al

aire $0,72 \text{ g/cm}^3$) y 21 % CH y para el aserradero T11 un MOE de $36\,757,8 \text{ kg/cm}^2$ (densidad seca al aire $0,63 \text{ g/cm}^3$) y 29 % CH.

Sánchez (2021) analizó las propiedades mecánicas de la madera de *Eucaliptus sp.* (eucalipto) provenientes de diversos cantones en Tungurahua, Ecuador. Densidad básica de $0,55 \text{ g/cm}^3$. En flexión estática, la madera de Baños registró un MOE de $112\,226,7 \text{ kg/cm}^2$ (15,54 % CH), la madera de Píllaro un MOE de $112\,933,6 \text{ kg/cm}^2$ (15,82 % CH), la de Cevallos un MOE de $102\,857,9 \text{ kg/cm}^2$ (15,73 % CH), la de Quero un MOE de $61\,294,6 \text{ kg/cm}^2$ (16,93 % CH) y la de Ambato un MOE de $74\,850,5 \text{ kg/cm}^2$ (17,6 % CH).

Crespo et al. (2008) compararon las propiedades mecánicas de *T. grandis* provenientes de Quevedo y Balzar, Ecuador. De Quevedo, recolectaron 5 árboles de 22 años y de Balzar, 5 árboles de 18 años. El peso específico básico fue de 0,48 y 0,52, respectivamente. La madera de Quevedo registró para flexión estática un MOR de $830,5 \text{ kg/cm}^2$ (bajo) y MOE de $106\,553,49 \text{ kg/cm}^2$ (medio) y para compresión paralela a la fibra un MOR de $426,9 \text{ kg/cm}^2$. La madera de Balzar en flexión estática registró un MOR de $755,5 \text{ kg/cm}^2$ y MOE de $93\,449,7 \text{ kg/cm}^2$, ambos de resistencia baja y, compresión paralela un MOR de $388,18 \text{ kg/cm}^2$ (muy bajo). Por último, indicaron que, por su mediana densidad, esta madera es apta para su uso en fabricación de muebles y gabinetes, pisos, puertas y ventanas, herramientas agrícolas y entablados.

Flórez et al. (2014) caracterizaron la madera joven de *T. grandis* de 13 años de una plantación en Brasil. Dimensiones medias en diámetro de 20,4 cm y altura total de 12,49 m y, densidad básica de $0,54 \text{ g/cm}^3$, clasificándola como madera pesada. En flexión estática el MOE fue de $133\,032,2 \text{ kg/cm}^2$. En compresión paralela a la fibra, la RM fue de $479,3 \text{ kg/cm}^2$ y el MOE de $69\,014,4 \text{ kg/cm}^2$.

Rivero y Moya (2006) investigaron las propiedades físico-mecánicas de la madera de *T. grandis* de 8 años de plantaciones experimentales en Cochabamba, Bolivia. Colectaron 5 árboles en total con diámetro promedio de 23,8 cm y altura total promedio de 20,6 m. Densidad de $0,58 \text{ g/cm}^3$ al 12 % CH. En flexión estática obtuvieron un MOR de $963,6 \text{ kg/cm}^2$ y MOE de $105\,313,21 \text{ kg/cm}^2$, en compresión paralela a la fibra obtuvieron un MOR de $460,59 \text{ kg/cm}^2$.

2.2.2. A nivel nacional

Osis y Muñoz (2022) estudiaron las propiedades mecánicas de las maderas de *Eucalyptus globulus* (eucalipto), *Cupressus lusitánica* (ciprés) y pino *Pinus radiata* (pino) en Apurímac. Se acondicionaron las probetas a un CH de 12 %. La densidad básica promedio del eucalipto fue de 0,89 g/cm³, del pino 0,57 g/cm³ y, del ciprés 0,44 g/cm³. Los resultados de compresión paralela para el eucalipto fueron; RM de 424,7 kg/cm², ELP de 312,6 kg/cm² y MOE de 83 314,7 kg/cm², para el pino fueron; RM de 291 kg/cm², ELP de 225,6 kg/cm² y MOE de 54 210 kg/cm² y, para el ciprés fueron; RM de 215,4 kg/cm², ELP de 68,7 kg/cm² y MOE de 40 282 kg/cm². Para flexión estática, los resultados para el eucalipto fueron; ELP de 963,7 kg/cm², MOR de 1 351,7 kg/cm² y MOE de 72 840,8 kg/cm², para el pino fueron; ELP de 715 kg/cm², MOR de 975,4 kg/cm² y MOE de 46 997 kg/cm² y, para el ciprés fueron; ELP de 538,9 kg/cm², MOR de 793,9 kg/cm² y MOE de 47 242 kg/cm².

Rosales (2023) determinó las propiedades mecánicas de la madera de *Pinus maximinoi* (pino) de 19 años provenientes de una plantación en Oxapampa. Para el ensayo de flexión estática registró un ELP de 132,1 kg/cm², MOE de 89 200 kg/cm² y MOR de 390 kg/cm² (densidad básica de 0,41 g/cm³). Para el ensayo de compresión paralela a la fibra registró una, ELP de 107,1 kg/cm², RM de 185,4 kg/cm² y MOE de 84 500 kg/cm² (densidad básica de 0,39 g/cm³). Indicó que todos los resultados de los ensayos clasifican resistencia muy baja.

Álvarez (2019) evaluó las propiedades mecánicas de la madera de *T. grandis* de 32 años de una plantación en Chanchamayo. Seleccionó 5 árboles de un área de 5,84 ha con dimensiones promedio de diámetro de 29,38 cm y altura comercial de 10,13 m. La densidad básica fue de 0,56 g/cm³ y 12 % CH. En flexión estática los resultados fueron; ELP de 555,4 kg/cm², MOR de 952,2 kg/cm² y MOE de 115 600 kg/cm². Para compresión paralela se registró el ELP de 313,5 kg/cm², RM de 458,5 kg/cm² y MOE de 120 900 kg/cm². En de tensión perpendicular a la fibra en la cara tangencial, se registró un ET de 41,5 kg/cm². Por último, recomendó la madera para ebanistería, cajonería pesada, parquet, mueblería, estructuras y carpintería de obra.

2.2.3. A nivel regional

Aguilar (2019) evaluó las propiedades mecánicas de la madera de raleo de *Guazuma crinita* (bolaina) a dos niveles de altura; base y medio de una plantación de 6 años. La densidad básica fue de $0,34 \text{ g/cm}^3$. Los resultados para de flexión estática fueron en promedio un ELP de $164,4 \text{ kg/cm}^2$, MOR de $376,9 \text{ kg/cm}^2$ y MOE de $61\ 000 \text{ kg/cm}^2$. Para compresión paralela a las fibras se registró en promedio un ELP de $140,9 \text{ kg/cm}^2$, RM de $208,9 \text{ kg/cm}^2$ y MOE de $73\ 128 \text{ kg/cm}^2$. La clasificación de resistencia para los resultados fue muy baja.

2.2.4. A nivel local

Santisteban (2024) determinó las propiedades mecánicas de la madera de copal *Dacryodes peruviana* (Loes.) H. J. Lam (copal) a tres niveles de altura, provenientes de un bosque reservado. La densidad básica fue $0,55 \text{ g/cm}^3$. En el ensayo de flexión estática, no existió diferencia significativa en la base, medio y ápice para el MOE, MOR y ELP, sin embargo, numéricamente el mayor valor obtenido fue de la base con $117\ 958,3 \text{ kg/cm}^2$, $1\ 142,4 \text{ kg/cm}^2$ y $376,8 \text{ kg/cm}^2$, respectivamente. De la misma manera, para compresión paralela no existieron diferencias estadísticas, pero sí numéricas, siendo el mayor valor de la base, con un ELP de $733,9 \text{ kg/cm}^2$ y RM de $611,3 \text{ kg/cm}^2$.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

Las muestras de estudio de *T. grandis* se obtuvieron de una parcela de la plantación forestal de la empresa Huayruro Agroindustrial Inmobiliaria S.R.L. cuya gestión y operación estuvo cargo de la empresa Tream Forestal E.I.R.L. La ubicación de la parcela fue en el km 20 de la carretera Federico Basadre, distrito de Campo Verde, región Ucayali. La habilitación de las probetas para los ensayos mecánicos se realizó en el Laboratorio Taller de Aprovechamiento y Maquinaria Forestal (LATAMF) de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS). Posteriormente, la ejecución y evaluación de los distintos ensayos mecánicos se efectuó en el Laboratorio de Materiales e Insumos del CITEmadera y del mueble, ubicado en el distrito de Villa el Salvador, Lima.

Como se muestra en la **Tabla 5** las coordenadas de ubicación geográfica de los árboles seleccionados son las siguientes:

Tabla 5. Coordenadas de ubicación de árboles seleccionados de la plantación.

Árbol	DAP (cm)	Coordenadas UTM		Altitud (m.s.n.m.)
		Este	Norte	
1	15,8	532078,91	9066763,39	152
2	15,6	532091,16	9066807,16	153
3	15,7	532128,01	9066775,19	152
4	15,3	532248,56	9066797,76	152
5	16	532266,33	9066715,16	152

Nota: proyección UTM: Universal Transversal Mercator; Huso: 18, Zona S; DATUM: WGS84.

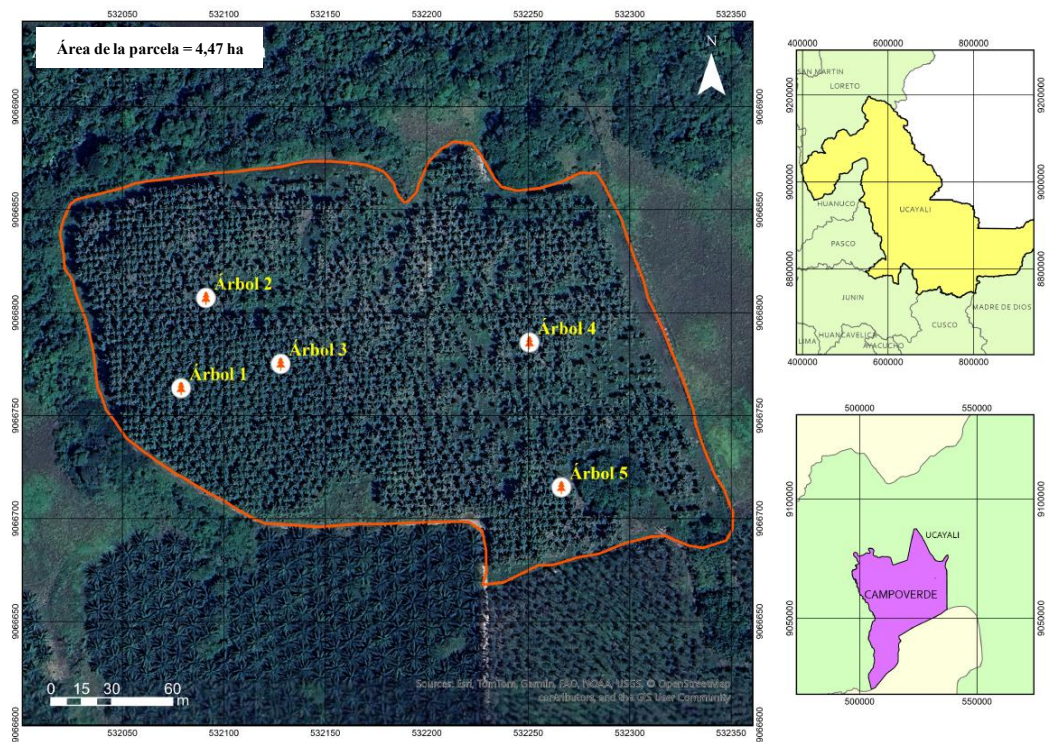


Figura 1. Ubicación de los árboles seleccionados.

En la **Figura 1** se muestra la dispersión de los árboles de la parcela, cuya área fue de 4,47 hectáreas, así como de los 5 individuos seleccionados al azar.

3.2. Materiales

3.2.1. Materiales de campo

El material vegetativo fueron probetas orientadas de *T. grandis*.

Para la tala y mensura de los árboles, las herramientas y equipos fueron: cinta diamétrica, cinta métrica, libreta de campo, pintura, motosierra, aceite 2 tiempos, gasolina, GPS, machete.

Para la habilitación de las probetas se utilizó plumón indeleble, motosierra, sierra de disco, taladro y garlopa.

3.2.2. Materiales y equipos de laboratorio

Para la ejecución de los ensayos mecánicos se utilizó: vernier digital, prensa universal IBERTEST serie euro test con accesorios para flexión estática, compresión y tracción perpendicular a la fibra, extensómetro y deflectómetro. Para la obtención del contenido de

humedad y densidad básica se utilizó: balanza digital Ohaus Adventurer Pro AV213 (0,01 g), estufa eléctrica Binder FD115, desecador, pinzas y guantes contra riesgo térmico.

3.3. Métodos

Se adaptó la investigación a la norma técnica ASTM D143-94.2000 “Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber”

3.3.1. Flexión Estática

Se seleccionaron 5 árboles al azar de una parcela elegida al azar de acuerdo con la norma NTP 251:008 (2023). Posteriormente, se talaron y tomaron datos como diámetro y altura.

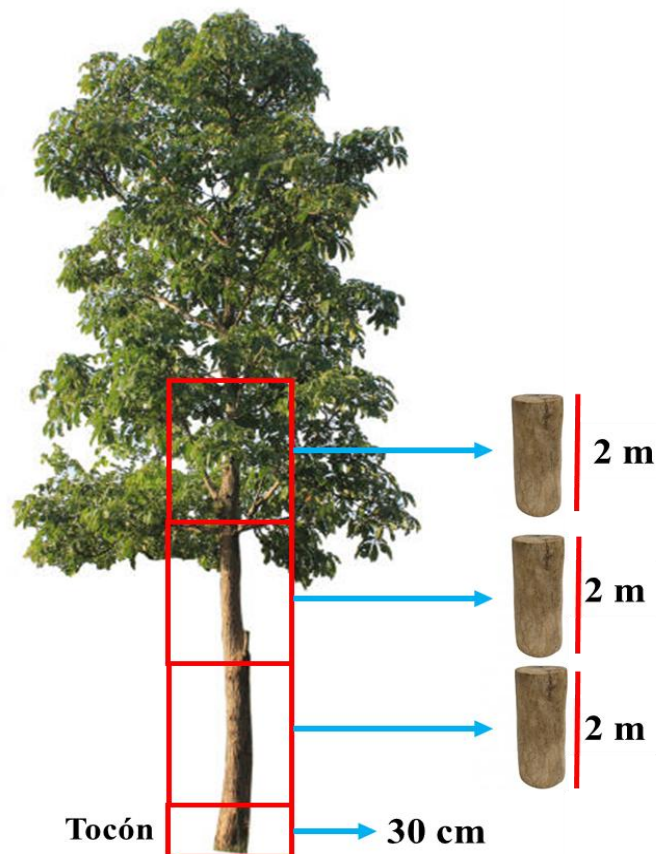


Figura 2. Secciones de altura de cada individuo.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez medidos, se precisó cortar tres trozas por árbol partiendo del tocón, cada una de 2 metros de longitud (**Figura 2**), resultando en tres secciones de altura; a 2 metros, a 4 m y a 6 m. Las trozas codificadas se movilizaron hasta la ciudad de Tingo María al Laboratorio

Taller de Aprovechamiento y Maquinaria Forestal (LATAMF) de la UNAS donde se aserraron hasta lograr tablones y dispusieron para el secado al aire libre. Se dejaron secar los tablones por dos meses aproximadamente, hasta que alcanzaron un peso constante. Por último, se realizaron las probetas por cada ensayo (**Tabla 6**) en un estado de humedad en equilibrio.

Tabla 6. Número de probetas por cada ensayo mecánico.

Ensayo mecánico	Número de probetas	Secciones de altura utilizadas
Flexión estática	45	2, 4 y 6 m
Compresión paralela	45	2, 4 y 6 m
Tracción perpendicular	20	2 y 4 m

Las probetas fueron transportadas al laboratorio de materiales e insumos del CITEmadera y del mueble en Villa el Salvador, Lima. El desarrollo del ensayo de flexión estática fue en función de la norma técnica ASTM D143-94 (2000) por el método secundario. Se obtuvieron 3 probetas por cada sección de altura de cada árbol, resultando en 45 probetas en total.

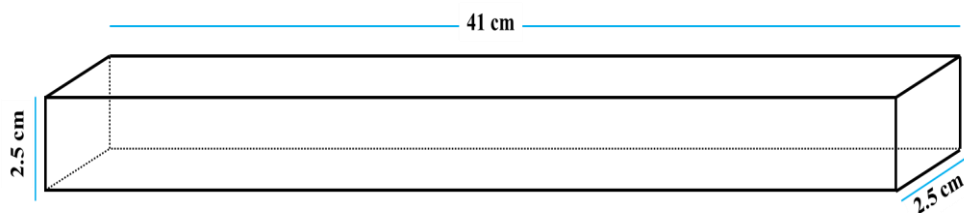


Figura 3. Dimensiones de la probeta de flexión estática por el método secundario.

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la **Figura 3**, las dimensiones fueron de 2,5 x 2,5 x 41 cm y una luz de 35 cm. Las probetas fueron colocadas en la prensa universal y se aplicó una fuerza continua y velocidad constante de 2,5 mm/min.

Posterior a ello, se realizaron los siguientes cálculos:

✓ **Esfuerzo al límite proporcional de las fibras**

$$ELP = \frac{3P'L}{2ae^2}$$

Dónde:

ELP: Esfuerzo al límite proporcional (kg/cm²)

P': Carga al límite proporcional (kg)

L: Luz de la probeta (cm)

e: Espesor de probeta (cm)

a: Ancho de la probeta (cm)

✓ **Módulo de ruptura**

$$MOR = \frac{3PL}{2ae^2}$$

MOR: Módulo de ruptura (kg/cm²)

P: Carga máxima que soporta la probeta (kg)

L: Luz de la probeta (cm)

e: Espesor de probeta (cm)

a: Ancho de la probeta (cm)

✓ **Módulo de elasticidad**

$$MOE = \frac{P'L^3}{4ae^3Y}$$

MOE: Módulo de elasticidad (kg/cm²)

P': Carga al límite proporcional (kg)

L: Luz de la probeta (cm)

Y: Deflexión en el centro de la probeta al límite proporcional (cm)

e: Espesor de probeta (cm)

a: Ancho de la probeta (cm)

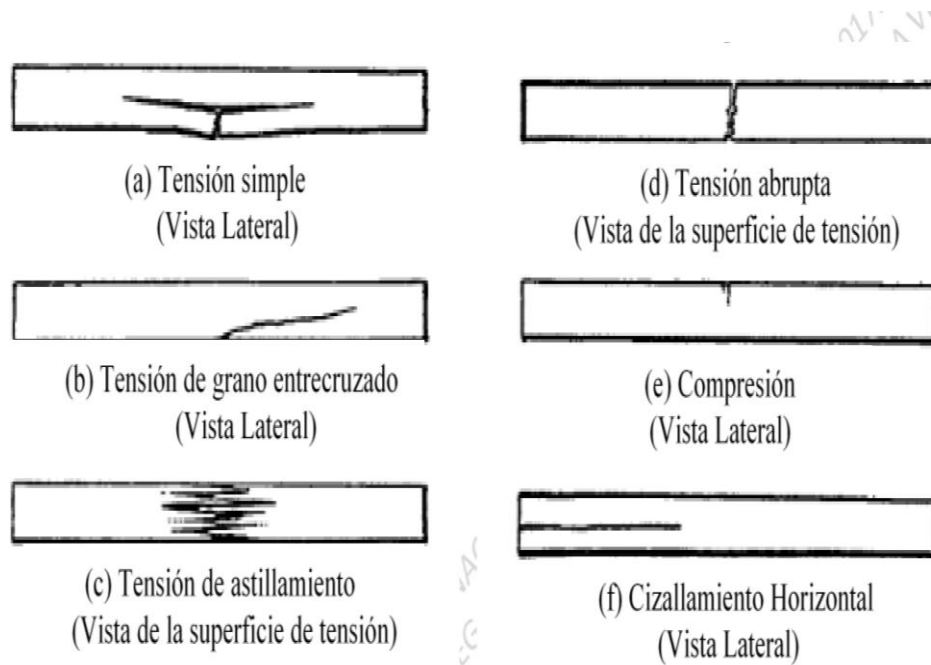


Figura 4. Tipos de posibles fallas en el ensayo de flexión estática.

Fuente: NTP 251.017 (2014).

Luego de realizar el ensayo de flexión estática para todas las probetas, se observó el tipo de falla ocurrida siguiendo la clasificación de la norma técnica ASTM D143-94 (2000) que se muestra en la **Figura 4**. Asimismo, se dispuso a determinar el contenido de humedad extrayendo dos cubos de cada probeta de 2 cm de longitud del punto más cercano a la falla.

3.3.2. Compresión paralela a la fibra

De la misma manera, para las dimensiones de las probetas de compresión paralela se tomó en cuenta a la norma técnica ASTM D143-94 (2000).

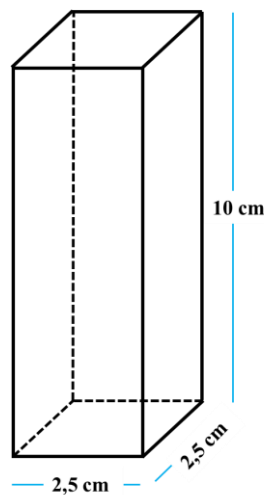


Figura 5. Dimensiones de la probeta de compresión paralela al grano.

Fuente: elaboración propia.

Se elaboraron 45 probetas, 9 por cada árbol con medidas de 5 x 5 x 20 cm orientadas paralelamente a las fibras de la madera (**Figura 5**). Se colocó cada una en la prensa universal a una velocidad constante de 0,03 mm/min y carga continua hasta alcanzar el fallo de la probeta.

Al finalizar los ensayos, se realizaron los siguientes cálculos:

✓ **Esfuerzo al límite proporcional**

$$ELP = \frac{P'}{A}$$

Dónde:

ELP: Esfuerzo al límite proporcional (kg/cm²)

P': Carga al límite proporcional (kg)

A: Superficie comprimida por la pieza metálica sobre la probeta

✓ **Resistencia Máxima**

$$RM = \frac{P}{A}$$

Dónde:

RM: Resistencia máxima (kg/cm²)

P: Carga máxima que soporta la probeta hasta su límite proporcional (kg)

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

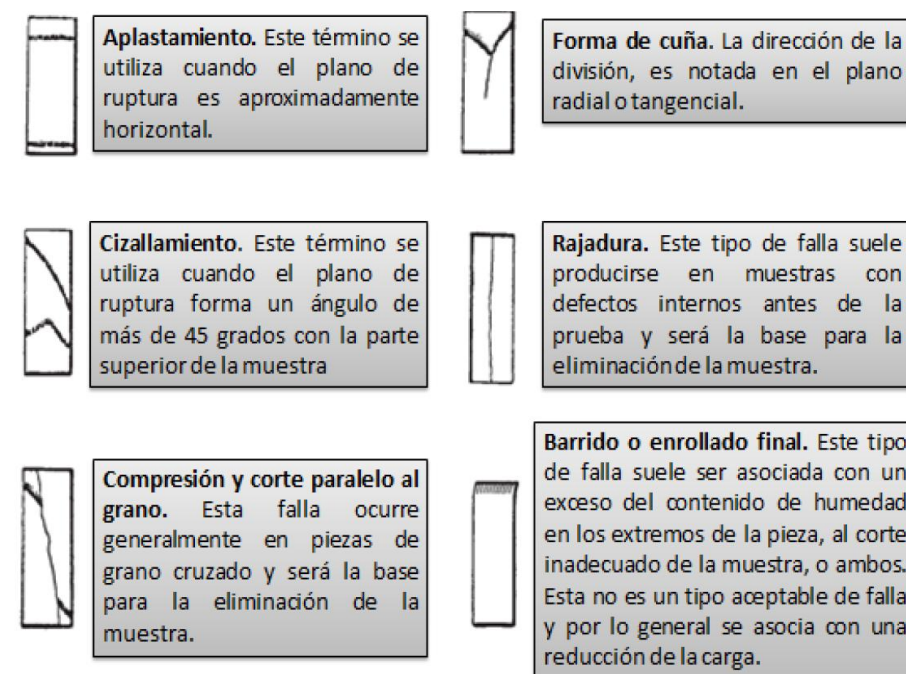


Figura 6. Posibles fallas en el ensayo de compresión paralela al grano.

Fuente: ASTM D143-94 (2000).

Asimismo, se identificó el tipo de falla de acuerdo con la norma técnica ASTM D143-94 (2000) mostrado en la **Figura 6**. Por último, el contenido de humedad de las probetas se calculó pesándolas al finalizar el ensayo, se las colocó en la estufa a 103 ± 2 °C hasta obtener un peso constante.

3.3.3. Tracción perpendicular a la fibra

Para el ensayo de tracción perpendicular a la fibra, por la disposición de madera de cada árbol colectado, se logró obtener 2 probetas de las secciones a 2 y 4 metros de cada árbol, siendo un total de 20 probetas.

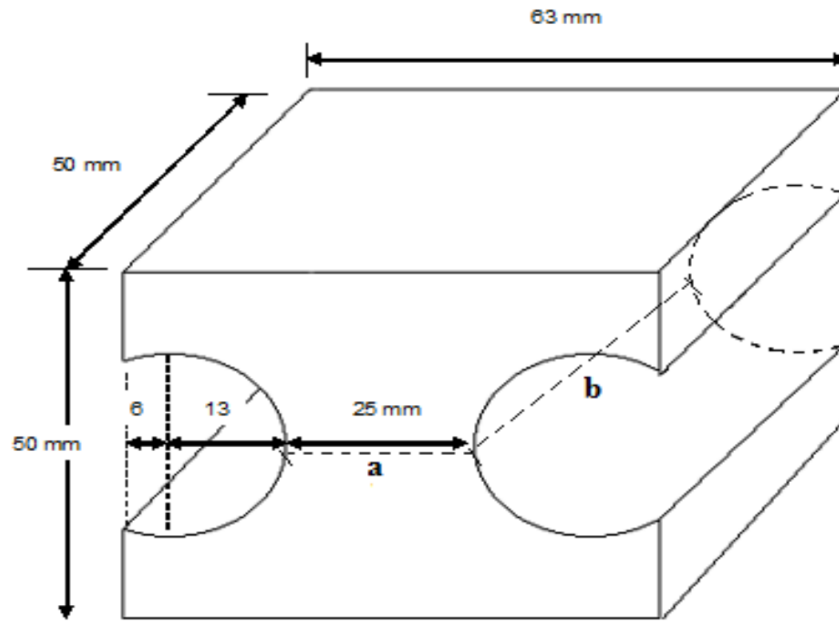


Figura 7. Dimensiones de la probeta de tracción perpendicular a la fibra.

Fuente: NTP 251.086 (2015)

Las probetas se realizaron en función a la norma técnica ASTM D143-94 (2000), cuyas dimensiones de fueron 0,6 x 1,3 x 2,5 x 5 cm (**Figura 7**). Se colocaron en la prensa universal a una velocidad constante de 2,5 mm/min.

Finalizado el ensayo, se tomó una mitad de cada probeta para la determinación del contenido de humedad.

✓ Esfuerzo Máximo de Tracción

$$ET = \frac{P}{A}$$

Dónde:

ET: Esfuerzo de tracción (kg/cm²)

P: Carga a la que se produjo la falla de la probeta (kg)

A: Área de la sección mínima

3.4. Criterios de la investigación

3.4.1. Enfoque, tipo, nivel y diseño de la investigación

a) Enfoque

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, se basó en la medición numérica de las propiedades mecánicas de la madera de raleo de *Tectona grandis* L. f., obtenidas mediante ensayos de flexión estática, compresión paralela a la fibra y tracción perpendicular al grano.

Hernández et al. (2014) señalan que el enfoque cuantitativo parte del planteamiento de un problema delimitado y confía en la medición numérica, el conteo y el análisis estadístico para describir patrones de comportamiento y responder a los objetivos del estudio.

b) Tipo

La investigación fue de tipo aplicada porque utilizó conocimientos de tecnología de la madera y ensayos mecánicos para generar información útil sobre la madera de raleo de *Tectona grandis* L. f., con fines de valoración tecnológica y orientación de sus posibles usos en la industria forestal. Por tanto, el estudio no se limitó a ampliar conocimiento teórico, sino que buscó aportar información práctica para el aprovechamiento de un recurso forestal procedente de una plantación de ocho años establecida en Pucallpa.

Hernández et al. (2014) indican que la investigación puede cumplir dos propósitos fundamentales: producir conocimiento y teorías, lo que corresponde a la investigación básica, o resolver problemas prácticos, lo que corresponde a la investigación aplicada. En ese marco, el presente estudio se ubica dentro de la investigación aplicada, porque sus resultados están orientados a resolver una necesidad concreta de conocimiento tecnológico sobre la madera de raleo de teca y su potencial de uso.

c) Nivel

La investigación correspondió al nivel descriptivo porque estuvo orientada a determinar y caracterizar las propiedades mecánicas de la madera de raleo de *Tectona grandis* L. f. en distintas secciones de altura del fuste. En ese sentido, se describieron cuantitativamente los valores del módulo de ruptura, módulo de elasticidad, esfuerzo al límite proporcional, resistencia máxima y esfuerzo máximo de tracción, según el tipo de ensayo realizado. Aunque,

posteriormente se efectuaron comparaciones estadísticas entre secciones, el propósito central fue describir el comportamiento mecánico de la madera evaluada.

Hernández et al. (2014) sostienen que los estudios descriptivos buscan especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice. Asimismo, precisan que estos estudios miden o recolectan información sobre los conceptos o variables a los que se refieren, de manera independiente o conjunta, con la finalidad de mostrar cómo se manifiesta el fenómeno de interés.

d) Diseño

El diseño de la investigación fue no experimental, transeccional o transversal, , ya que no se manipuló deliberadamente ninguna condición del material estudiado, sino que se evaluaron probetas obtenidas de árboles previamente existentes en la plantación. La información fue recolectada en un solo periodo de estudio, a partir de muestras extraídas de árboles seleccionados al azar dentro del lote 4, y posteriormente analizada en función de las secciones de altura del fuste. En consecuencia, la investigación observó un fenómeno ya existente y lo analizó tal como se presentó en su contexto natural.

Hernández et al. (2014) señalan que en la investigación no experimental no se construye ninguna situación, sino que se observan situaciones ya existentes, no provocadas intencionalmente por el investigador. Asimismo, refieren que los diseños no experimentales se subdividen, según el número de momentos de recolección de datos, en transeccionales y longitudinales; los primeros recolectan información en un solo momento. Por ello, el diseño de esta tesis se sustenta metodológicamente como no experimental y transeccional.

3.4.2. Población, muestra y tipo de muestreo

a) Población

La población estuvo conformada por 2 631 árboles en pie de *Tectona grandis* L. f., correspondientes al lote 4 de la plantación forestal, con un área neta de 4,47 ha, los cuales constituyeron la unidad poblacional de referencia para la selección de los individuos evaluados en el estudio.

b) Muestra

La muestra biológica estuvo constituida por cinco árboles de *Tectona grandis* L. f. seleccionados al azar dentro del lote 4, conforme al criterio técnico adoptado en la investigación

y tomando como referencia la NTP 251.008 para la selección de árboles. A partir de estos cinco individuos se obtuvieron las submuestras representadas por probetas para los distintos ensayos mecánicos. En total, se elaboraron 45 probetas para flexión estática, 45 probetas para compresión paralela a la fibra y 20 probetas para tracción perpendicular al grano. Por ello, metodológicamente corresponde distinguir entre muestra biológica o muestra primaria, constituida por los árboles, y submuestras o unidades de ensayo, constituidas por las probetas.

c) Tipo de muestreo

El muestreo fue de tipo no probabilístico por criterio técnico-normativo, debido a que el número de árboles evaluados no se determinó mediante una fórmula estadística, sino con base en lo establecido por la NTP 251.008, referente a la selección y colección de muestras de madera. No obstante, una vez definido ese criterio, los cinco árboles fueron seleccionados al azar dentro del lote 4, entre aquellos individuos que cumplían las condiciones técnicas requeridas para el estudio.

3.4.3. Factores de estudio y variable respuesta

El factor de estudio constituido por la sección de altura del fuste, con niveles de 2 m, 4 m y 6 m para los ensayos de flexión estática y compresión paralela a la fibra; mientras que, para el ensayo de tracción perpendicular al grano, se consideraron las secciones de 2 m y 4 m, de acuerdo con la disponibilidad de material para la preparación de probetas.

Las variables de respuesta fueron las propiedades mecánicas determinadas en cada ensayo. Para el ensayo de flexión estática, se evaluaron el esfuerzo al límite proporcional (ELP), el módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE). Para el ensayo de compresión paralela a la fibra, se determinaron el esfuerzo al límite proporcional (ELP), la resistencia máxima (RM) y el módulo de elasticidad (MOE). Finalmente, para el ensayo de tracción perpendicular al grano, se evaluó el esfuerzo máximo de tracción (ET). De esta manera, la investigación permitió comparar el comportamiento mecánico de la madera de raleo de *Tectona grandis* L. f. según la posición longitudinal del fuste.

Tabla 7. Operacionalización de variables.

Variable / factor	Dimensión	Indicador	Escala de medición	Unidad de medida	Técnica	Instrumento
Factor de estudio: Sección de altura del fuste	Posición longitudinal del fuste	Altura de extracción de la troza	Ordinal	m	Observación técnica y selección de muestras	Cinta métrica / wincha, ficha de campo
Variable de respuesta 1: Flexión estática	Resistencia en flexión	Módulo de ruptura (MOR)	Razón	kg/cm ²	Ensayo mecánico de flexión estática	Máquina universal de ensayos / equipo de flexión, ficha de registro
	Rigidez en flexión	Módulo de elasticidad (MOE)	Razón	kg/cm ²	Ensayo mecánico de flexión estática	Máquina universal de ensayos / equipo de flexión, ficha de registro
	Límite elástico en flexión	Esfuerzo al límite proporcional (ELP)	Razón	kg/cm ²	Ensayo mecánico de flexión estática	Máquina universal de ensayos / equipo de flexión, ficha de registro
Variable de respuesta 2: Compresión paralela a la fibra	Resistencia a compresión	Resistencia máxima (RM)	Razón	kg/cm ²	Ensayo mecánico de compresión paralela	Máquina universal de ensayos / accesorio de compresión, ficha de registro
	Rigidez a compresión	Módulo de elasticidad (MOE)	Razón	kg/cm ²	Ensayo mecánico de compresión paralela	Máquina universal de ensayos / accesorio de compresión, ficha de registro
	Límite elástico a compresión	Esfuerzo al límite proporcional (ELP)	Razón	kg/cm ²	Ensayo mecánico de compresión paralela	Máquina universal de ensayos / accesorio de compresión, ficha de registro
Variable de respuesta 3: Tracción perpendicular al grano	Resistencia a tracción perpendicular	Esfuerzo máximo de tracción (ET)	Razón	kg/cm ²	Ensayo mecánico de tracción perpendicular	Máquina universal de ensayos / accesorio de tracción, ficha de registro

3.4.4. Análisis estadístico

Para el análisis de los datos se verificó inicialmente el cumplimiento del supuesto de normalidad. Posteriormente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) con el propósito de determinar si existieron diferencias significativas entre las medias de las propiedades mecánicas de la madera en función de la sección de altura del fuste. Cuando se detectaron diferencias significativas, se utilizó la prueba de comparación múltiple de Tukey para establecer cuáles medias difirieron estadísticamente entre sí. Este procedimiento se realizó para cada una de las variables de respuesta consideradas en los ensayos de flexión estática, compresión paralela a la fibra y tracción perpendicular al grano.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Flexión estática a tres secciones de altura de *T. grandis*.

4.1.1. Módulo de ruptura (MOR) (kg/cm²)

El análisis de varianza del Módulo de Ruptura (MOR) en flexión estática de la madera de *T. grandis* evaluada en muestras extraídas cada dos metros de longitud del fuste hasta los 6 m de altura, no evidenció diferencias estadísticas significativas entre las secciones ($p = 0,0504$). Si bien el valor de probabilidad se encontró muy próximo al nivel de significancia del 5 %, este resultado indica que la resistencia máxima de la madera ante esfuerzos de flexión se mantuvo estadísticamente similar entre las secciones evaluadas del fuste. Asimismo, el coeficiente de variación de 6,36 % muestra una dispersión baja de los datos experimentales, lo que indica buena homogeneidad en los resultados obtenidos y otorga confiabilidad en el análisis realizado (**Tabla 8**). El contenido de humedad promedio fue de 14,49 % (ver Anexo, **Tabla 15**).

Tabla 8. Análisis de varianza del MOR (kg/cm²) en flexión estática.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Sección	30102,71	2	15051,35	3,87	0,0504 ^{NS}
Error	46648,22	12	3887,35		
Total	76750,92	14			

NS: no significativo; C.V.: 6,36 %.

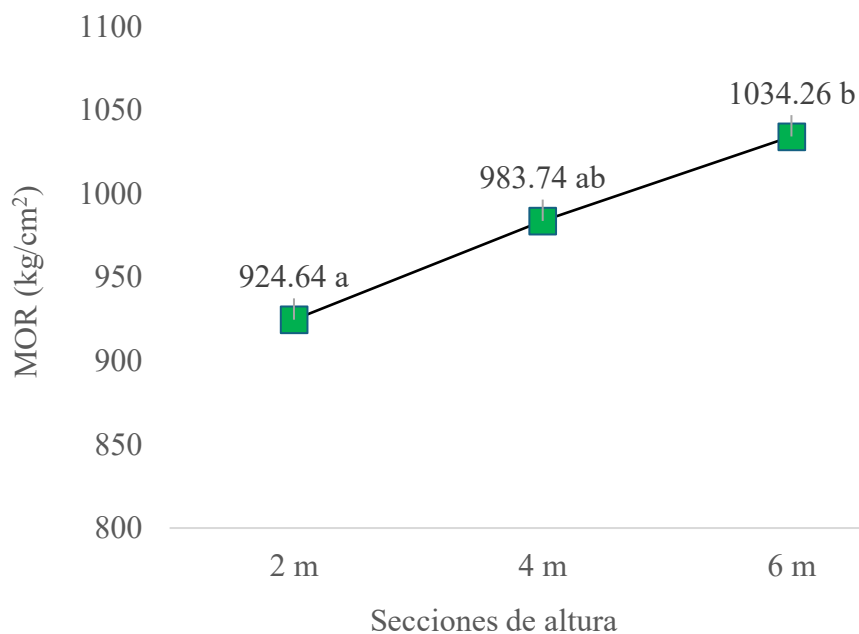


Figura 8. Prueba de comparación de medias del MOR (kg/cm²) para flexión estática.

En la **Figura 8**, se muestra el gráfico de la prueba de comparación de medias del módulo de ruptura, señalando que la sección ubicada a 6 m de altura presentó el mayor valor promedio (1034.26 kg/cm²), mientras que la sección a 2 m el menor valor (924.64 kg/cm²). La sección a 4 m logró un valor intermedio (983.74 kg/cm²). Desde el punto de vista estadístico, la mayor resistencia se dio en la sección a 6 m, la cual, superó a la sección a 2 m, mientras que la sección a 4 m no presentó diferencias definidas frente a ambas, mostrando un comportamiento intermedio.

Como se menciona, en el ensayo de flexión estática, la sección a 6 m fue la más resistente al promediar 1 034,26 kg/cm² en el MOR. De acuerdo con la **Tabla 1**, este resultado pertenece a una clasificación de resistencia “Alta”.

En comparaciones con estudios de la misma especie, Rivero y Moya (2006) publicaron un MOR de 963,6 kg/cm² para árboles de 8 años, Castro y Raigosa (2000) un MOR de 991 kg/cm² en individuos de 17 años, Betancur et al. (2000) un promedio de 905,1 kg/cm², Crespo et al. (2008) de una plantación de 22 años valor de 830,5 kg/cm² y para otra de 18 años 755,5 kg/cm² y, Álvarez (2019) para árboles de 32 años, registró 952,2 kg/cm², estos resultados reflejan una menor resistencia máxima de la madera, clasificándolas como “media” y “baja”.

Por otra parte, al compararla con otras especies, Nájera-Luna et al. (2005) presentaron un MOR de 818,7 kg/cm² para *Q. laeta* (roble blanco), Abarca (2021) 666,3 kg/cm² para *S. macrophylla* (caoba) de 8 años, Alvis-Gordo et al. (2017) registraron un MOR de 990 kg/cm² para *O. brevipetiolata* (uraco), Nugshi (2021) 309,8 kg/cm² para *H. brasiliensis* (caucho), Rosales (2023) 390 kg/cm² para *P. maximinoi* (pino) de 19 años y, Aguilar (2019) 376,9 kg/cm² para la especie *G. crinita* (bolaina) de una plantación de 6 años. Estos valores presentados por los autores son inferiores a los del presente estudio.

Por último, Osis y Muñoz (2022) publicaron un MOR de 1 351,7 kg/cm² para la especie *E. globulus* (eucalipto), Santisteban (2024) un MOR de 1 142,4 kg/cm² para *D. peruviana* (copal). Estas especies obtuvieron mayores resistencias máximas a la flexión.

Asimismo, en relación con los tipos de falla, los ocurridos en el ensayo de flexión estática fueron: tensión simple (vista lateral), tensión de astillamiento (vista de la superficie de la falla) y falla combinada (tensión y compresión).

En conclusión, el valor obtenido es, mayoritariamente, superior a las comparaciones, esto se puede deber a las propiedades físicas y características anatómicas que

presentó cada muestra vegetativa como la densidad básica, longitud de fibras, orientación del grano y presencia de nudos en árboles de corta edad. Además, se debe mencionar que el módulo de ruptura es la resistencia máxima que la madera soporta justo antes de fallar.

4.1.2. Esfuerzo al límite proporcional (ELP) (kg/cm^2)

El análisis de varianza del Esfuerzo al Límite Proporcional (ELP) en flexión estática para la madera de *T. grandis* a un 95 % de confiabilidad no registró evidencias estadísticas significativas entre las secciones de altura evaluadas ($p = 0,0629$). Esto indica que el rango elástico de la madera para esfuerzos de flexión se mantuvo estadísticamente similar en las tres secciones de altura. Asimismo, el coeficiente de variación de 12,34 % indica una baja dispersión de los datos, mostrando homogeneidad en los resultados obtenidos y confiabilidad en el análisis realizado (**Tabla 9**).

Tabla 9. Análisis de varianza del ELP (kg/cm^2) en flexión estática.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Sección	24849,56	2	12424,78	3,52	0,0629 ^{NS}
Error	42414,05	12	3534,5		
Total	67263,6	14			

NS: no significativo; C.V.: 12,34 %

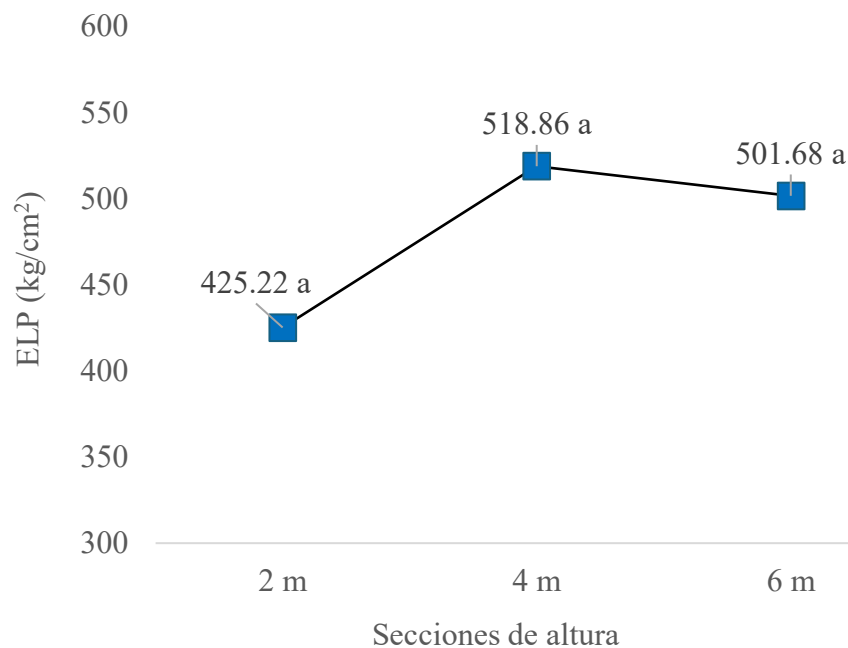


Figura 9. Prueba de comparación de medias del ELP (kg/cm^2) para flexión estática.

En la **Figura 9**, se muestra el gráfico de la prueba de comparación de medias del esfuerzo al límite proporcional en flexión estática, cuyos resultados son diferentes numéricamente, donde la sección ubicada a 4 m de altura presentó el mayor valor promedio (518,86 kg/cm²), la sección ubicada a 2 m el menor (425,22 kg/cm²) y la sección a 6 m un intermedio de 501,68 kg/cm². Sin embargo, desde el punto de vista estadístico, no existen diferencias entre estos valores.

De acuerdo con esto, para la especie *T. grandis* en el ensayo de flexión estática, el mayor rango elástico lo presentó la sección a 4 m con un promedio de 518.86 kg/cm².

Al comparar con investigaciones de la misma especie de estudio, encontramos a Castro y Raigosa (2000) quienes publicaron un ELP de 587 kg/cm² para una plantación de 17, Betancur et al. (2000) en promedio de 670 kg/cm² y, Álvarez (2019) un valor de 555,4 kg/cm² para árboles de 32 años. Estos resultados son superiores al conseguido en el estudio.

En contraste con otras especies, Nugshi (2021) presentó un ELP de 309,8 kg/cm² para *H. brasiliensis* (caucho), Rosales (2023) publicó un ELP de 132,1 kg/cm² para *P. maximinoi* (pino) de una plantación de 19 años, Aguilar (2019) 164,4 kg/cm² para la madera de raleo de *G. crinita* (bolaina) de 6 años y Santisteban (2024) en la especie *D. peruviana* (copal) un ELP de 376,8 kg/cm². Estos valores son inferiores al conseguido.

Por otra parte, Alvis-Gordo et al. (2017) promediaron un ELP de 626 kg/cm² para *O. brevipetiolata* (uraco), Osis y Muñoz (2022) presentaron una media de 963,7 kg/cm² para *E. globulus* (eucalipto), 538,9 kg/cm² para *C. lusitánica* (ciprés) y 715 kg/cm² para *P. radiata* (pino). Los valores registrados para estas especies son mayores al encontrado en el presente estudio.

En conclusión, existe variación entre los valores de otros estudios, debido posiblemente a factores como la procedencia de la madera (bosques naturales y plantaciones), la edad y presencia de madera juvenil. Por último, se debe mencionar que, el esfuerzo en el límite proporcional de la fibra define el final del comportamiento elástico de la madera, está relacionado con la carga máxima que soporta la viga previa deformación permanente, asimismo, la madera es más rígida cuando las microfibrillas de la pared celular se encuentran en un ángulo de inclinación vertical, ya que el estiramiento sucede de forma axial.

4.1.3. Módulo de elasticidad (MOE) (kg/cm²)

El análisis de varianza del Módulo de Elasticidad (MOE) para las muestras de madera de *T. grandis* en flexión estática a un 95 % de confiabilidad muestra diferencias estadísticas altamente significativas para las secciones de altura analizadas ($p = 0,002$). Este resultado señala que la rigidez de la madera ante esfuerzos de flexión es significativamente diferente entre las secciones evaluadas. Asimismo, el coeficiente de variación de 6,42 %, manifiesta una baja dispersión de los valores, indicando homogeneidad en los datos y confiabilidad resultados obtenidos (**Tabla 10**).

Tabla 10. Análisis de varianza del MOE (kg/cm²) en flexión estática.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Sección	3417291817	2	1708645909	19,97	0,0002*
Error	1026522334	12	85543528		
Total	4443814151	14			

*: significativo; C.V.: 6,42 %.

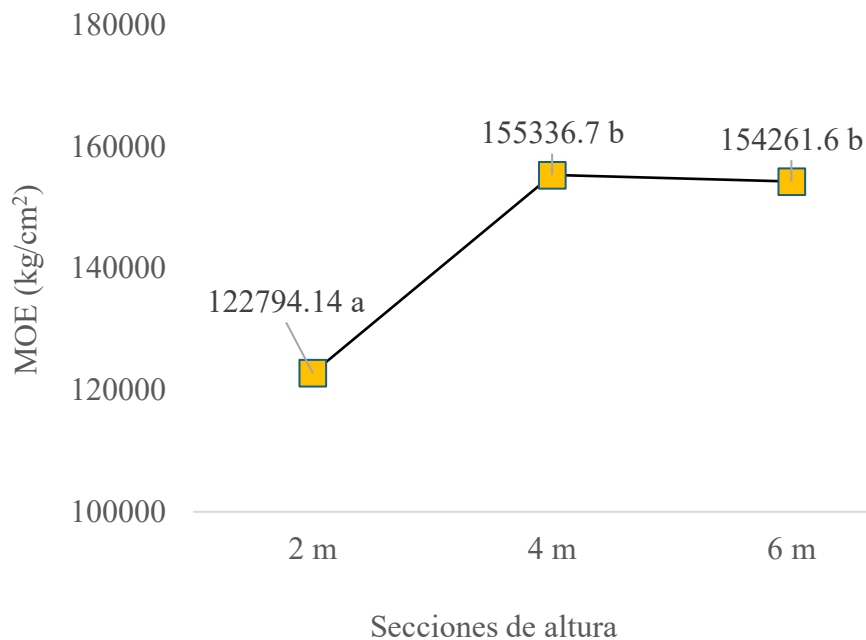


Figura 10. Prueba de comparación de medias del MOE (kg/cm) para flexión estática.

En la prueba de comparación de medias del Módulo de Elasticidad (MOE) presentado en la **Figura 10**, las secciones ubicadas a 4 m y 6 m registraron los mayores valores; 155 336,7 kg/cm² y 154 261,6 kg/cm², respectivamente, mientras que la sección a 2 m presentó

el menor valor promedio (122 794,14 kg/cm²). Estadísticamente, los resultados del MOE de las secciones a 4 m y 6 m son iguales, la sección a 2 m difiere de estas al ser inferior.

Con respecto a lo mencionado, la sección a 4 metros de altura del fuste obtuvo un promedio de 155 336,7 kg/cm², siendo la más rígida de las secciones evaluadas. De acuerdo con la **Tabla 1**, este resultado se clasifica dentro del rango de “Muy alto”.

Al comparar los valores con estudios de la misma especie, Rodríguez et al. (2014) presentaron módulos de elasticidad de 85 911 kg/cm² para árboles de 9 años, 94 690,8 kg/cm² y 96 658,9 kg/cm² para árboles de 15 años y 93 987,2 kg/cm² para árboles de 21 años, Castro y Raigosa (2000) promediaron 112 000 kg/cm² para una plantación de 17 años, Betancur et al. (2000) 104 400 kg/cm², Crespo et al. (2008) para madera de 22 años 106 553,49 kg/cm² y para madera de 18 años 93 449,7 kg/cm², Flórez et al. (2014) 133 032,2 kg/cm² para una plantación de 13 años, Rivero y Moya (2006) 105 313,21 kg/cm² para árboles de 8 años y, Álvarez (2019) un MOE de 115 600 kg/cm² en individuos de 32 años. Estos resultados son inferiores al obtenido, además, se encuentran en clasificaciones de rigidez “media” y “baja”.

En contraste con resultados de otras especies, Abarca (2021) registró un MOE de 73 816 kg/cm² para *S. macrophylla* (caoba) de 8 años, Medina et al. (2020) promediaron 87 309,6 kg/cm², 104 723 kg/cm² y 99 399,9 kg/cm² en *P. nigra* (álamo chileno), *P. x canadensis* (conti 12) y *P. alba* (boleana), respectivamente, Santisteban (2024) promedió 117 958,3 kg/cm² en *D. peruviana* (copal), Nugshi (2021) 56 338,6 kg/cm² en *H. brasiliensis* (caucho), Osis y Muñoz (2022) 72 840,8 kg/cm² en *E. globulus* (eucalipto), 47 242 kg/cm² en *C. lusitánica* (ciprés) y 46 997 kg/cm² en *P. radiata* (pino), Aguilar (2019) en bolaina (Guazuma crinita) de una plantación de 6 años registró 61 000 kg/cm², Rosales (2023) promedió 89 200 kg/cm² para *P. maximinoi* (pino) de 19 años, Acosta (2023) para *C. catenaeformis* (tornillo) de distintos aserraderos valores de 109 344 kg/cm² y 79 077,2 kg/cm². Los valores presentados son menores numéricamente y en clasificación de resistencia.

En conclusión, los valores de otros estudios se presentan inferiores a lo registrado, lo que ocurre posiblemente por características anatómicas como la longitud de las fibras y ancho de las paredes celulares, así como el ángulo de inclinación de las microfibrillas en la capa S2 de la pared celular. Además, se puede interpretar que este parámetro representa la facilidad con la que la madera de flexiona, ya que, a mayor módulo de elasticidad, mayor la rigidez de la madera.

4.2. Compresión paralela a la fibra en tres secciones de altura de *T. grandis*.

4.2.1. Resistencia máxima (RM) (kg/cm^2)

El análisis de varianza de la Resistencia Máxima (kg/cm^2) para la madera de *T. grandis* en el ensayo de compresión paralela a las fibras muestra diferencias significativas entre las tres secciones de altura trabajadas ($p = 0,0359$). Este resultado señala que, la capacidad máxima de carga de la madera es distinta para las secciones a 2, 4 y 6 metros de altura del fuste. Asimismo, el coeficiente de variación de 4,41 % indica muy baja dispersión de los datos experimentales, lo que muestra confiabilidad en los resultados obtenidos (**Tabla 11**). El contenido de humedad promedio fue de 12,89 % (ver Anexo, **Tabla 16**).

Tabla 11. Análisis de varianza de RM (kg/cm^2) en compresión paralela a la fibra.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Sección	4040,03	2	2020,02	4,45	0,0359*
Error	5450,66	12	454,22		
Total	9490,7	14			

*: significativo; C.V.: 4,41 %

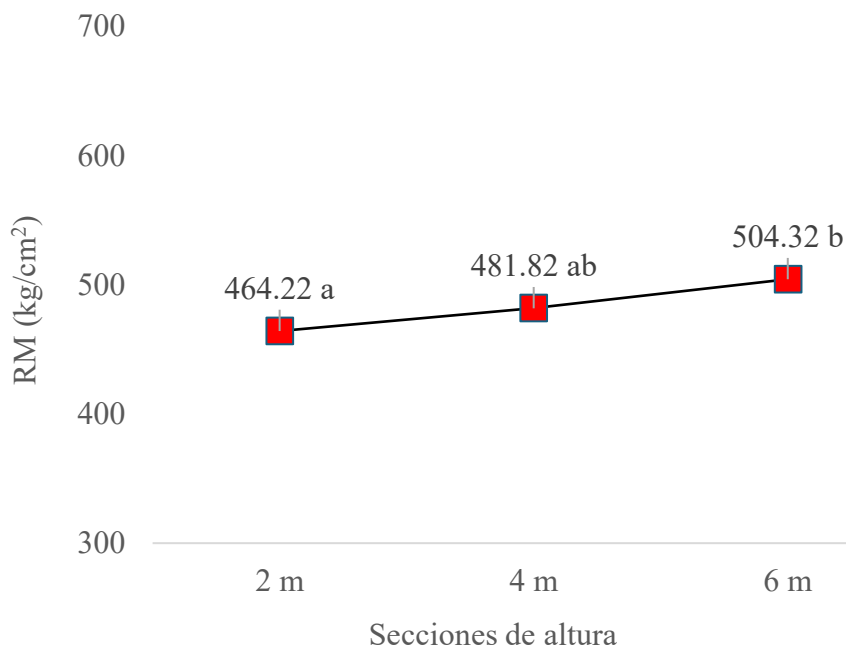


Figura 11. Prueba de comparación de medias de RM (kg/cm^2) para compresión paralela a la fibra.

En la prueba de comparación de medias de la resistencia máxima (RM) (**Figura 11**), la sección ubicada a 6 m logró el mayor valor promedio (504,32 kg/cm²), la sección a 2 m el menor (464,22 kg/cm²) y, la sección a 4 m un valor intermedio (481,82 kg/cm²). Estadísticamente, la sección a 6 m mostró la mayor resistencia a la compresión, la sección a 2 m presentó la menor y, la sección a 4 m no mostró diferencias frente a ambas secciones.

Según lo expuesto, la resistencia máxima la compresión paralela se presenta en la sección a 6 m con un promedio de 504,32 kg/cm². Según la **Tabla 1**, este valor se encuentra en el rango de resistencia “Media”.

Al compararlo con estudios de la misma especie, Rivero y Moya (2006) registraron una RM de 460,59 kg/cm² de una plantación de 8 años, Telles et al. (2017) 326,1 kg/cm² de árboles de 11 años, Rodríguez et al. (2014) 356,9 kg/cm² de árboles de 9 años, 489,5 kg/cm² y 438,5 kg/cm² de árboles de 15 años y 448,7 kg/cm² de 21 años, Castro y Raigosa (2000) 492 kg/cm² para individuos de 17 años, Crespo et al. (2008) 426,9 kg/cm² para árboles de 22 años y 388,18 kg/cm² para árboles de 18 años, Flórez et al. (2014) 479,3 kg/cm² para una plantación de 13 años y Álvarez (2019) para individuos de 32 años, una RM de 458,5 kg/cm². Los resultados presentados son inferiores al obtenido.

Por otra parte, al contrastarlo con otras especies, Nájera-Luna et al. (2005) registraron una RM de 455,7 kg/cm² en *Q. laeta* (roble blanco), Abarca (2021) una RM de 388,9 kg/cm² en *S. macrophylla* (caoba) de 8 años, Rosales (2023) 185,4 kg/cm² en la especie *P. maximinoi* (pino) de 19 años, Aguilar (2019) 208,9 kg/cm² para *G. crinita* (bolaina) de 6 años, Osis y Muñoz (2022) presentaron RM de 424,7 kg/cm² para *E. globulus* (eucalipto), 291 kg/cm² para *P. radiata* (pino) y 215,4 kg/cm² para *C. lusitánica* (ciprés). Estos valores muestran menores resistencias a la compresión paralela, asimismo, pertenecen a categorías inferiores según la clasificación.

Por último, Santisteban (2024) publicó una RM de 611,3 kg/cm² para *D. peruviana* (copal) y Alvis-Gordo et al. (2017) para *O. brevipetiolata* (uraco) marcó una RM de 574 kg/cm², ambos valores son superiores al registrado y se clasifican como resistencia “alta”.

Asimismo, de acuerdo con los tipos de falla para las probetas de compresión paralela a la fibra, se presentaron tres tipos de falla; cizallamiento, aplastamiento y división en cuña, siendo esta la menos común.

En conclusión, la resistencia media se muestra superior en la mayoría de las comparaciones realizadas, esta variación se puede deber principalmente a la densidad y al contenido de humedad, asimismo, a la orientación del grano y ángulo de inclinación de las microfibrillas. De igual manera, cabe resaltar que la resistencia máxima en el ensayo de compresión paralela a la fibra es la carga vertical que soportan las paredes celulares de las fibras de la madera antes de colapsar.

4.2.2. Módulo de elasticidad (MOE) (kg/cm²)

El análisis de varianza del Módulo de Elasticidad (MOE) de la madera de *T. grandis* en el ensayo de compresión paralela (**Tabla 12**) no presentó diferencias estadísticas en la rigidez de la madera para las tres secciones de altura analizadas ($p = 0,8806$). El coeficiente de variación de 19,82 % indica una dispersión moderada de los valores.

Tabla 12. Análisis de varianza del MOE (kg/cm²) en compresión paralela a la fibra.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Sección	178468878,4	2	89234439,17	0,13	0,8806 ^{NS}
Error	8332329802	12	694360816,9		
Total	8510798681	14			

NS: no significativo; C.V.: 19,82 %.

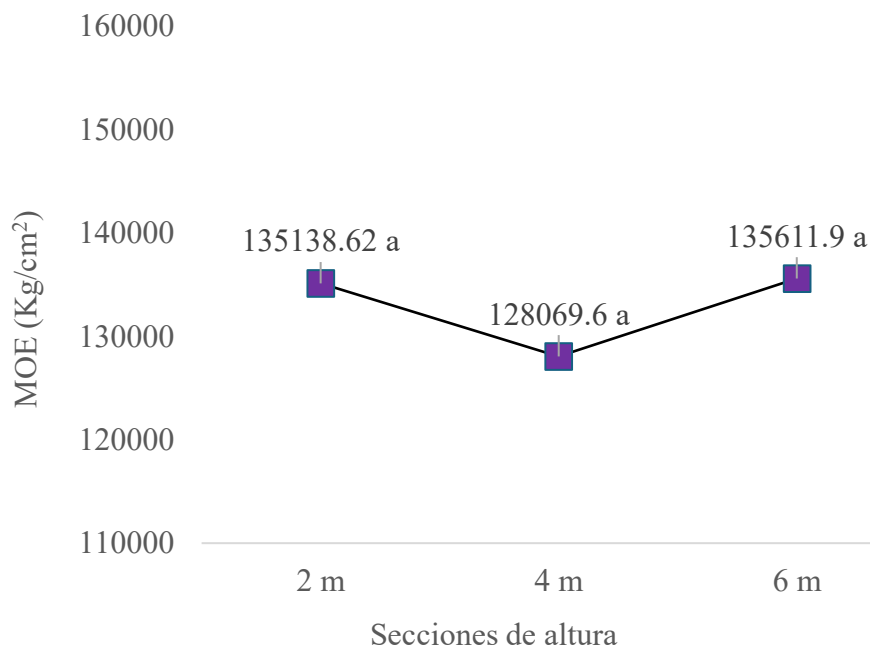


Figura 12. Prueba de comparación de medias del MOE (kg/cm²) para compresión paralela a la fibra.

En la **Figura 12**, se presenta la prueba de comparación de medias del Módulo de elasticidad (MOE), la cual indica que solo existieron diferencias numéricas, donde la sección a 6 metros de altura registró el mayor valor promedio (135 611,9 kg/cm²), pero estadísticamente igual a las demás secciones. Este valor se encuentra dentro del rango de clasificación “Alto” según la **Tabla 1**.

En este aspecto, al contrastar con resultados de la misma especie, Telles et al. (2017) presentaron un MOE de 182 053 kg/cm² para una plantación de 11 años, que resulta ser muy superior al valor obtenido. Por otro lado, Rodríguez et al. (2014) registraron valores de 74 449,5 kg/cm², 102 461,1 kg/cm² y 108 579,4 kg/cm² y, 111 353 kg/cm² para plantaciones de 9, 15 y 21 años, respectivamente, Flórez et al. (2014) MOE de 69 014,4 kg/cm² para individuos de 13 años y Álvarez (2019) MOE 120 900 kg/cm² para árboles de 32 años. Los valores presentados son menores al registrado.

Por otro lado, al compararlo con otras especies, Aguilar (2019) obtuvo 73 128 kg/cm² para *G. crinita* (bolaina) de 6 años, Rosales (2023) 84 500 kg/cm² para árboles de *P. maximinoi* (pino) de 19 años, Acosta (2023) presentó valores de 45 477,9 kg/cm² y 36 757,8 kg/cm² para *C. catenaeformis* (tornillo) de distintos aserraderos al 21 % y 29 % de CH, respectivamente. Los valores de estos resultados son menores al obtenido. Sin embargo, si se compara con Osis y Muñoz (2022) que registraron valores de 83 314,7 kg/cm² para *E. globulus* (eucalipto), 40 282 kg/cm² para *C. lusitánica* (ciprés) y 54 210 kg/cm² para *P. radiata* (pino) y, Alvis-Gordo et al. (2017) que presentaron un MOE de 250 432 kg/cm² *O. brevipedunculata* (uraco), los valores son altamente superiores al conseguido.

En conclusión, las diferencias encontradas en la comparación se pueden deber a características anatómicas específicas para cada especie forestal, como grosor de la pared celular, orientación del grano, presencia de extractivos en los lúmenes celulares y densidad básica de la madera. Es importante recalcar que, el módulo de elasticidad en compresión paralela mide la rigidez intrínseca de la pared celular de la madera, es decir, si el ángulo de inclinación de las microfibrillas de la capa intermedia de la pared es mínimo, el esfuerzo de la madera será mayor, por lo tanto, habrá mayor rigidez.

4.2.3. Esfuerzo al límite proporcional (ELP) (kg/cm²)

El análisis de varianza del Esfuerzo al Límite Proporcional (ELP) para la madera de *T. grandis* en el ensayo de compresión paralela a la fibra, evaluada en muestras obtenidas en tres secciones de altura no evidenció diferencias significativas una de la otra ($p = 0,0538$). A

pesar de que el valor de probabilidad se encontró próximo al nivel de significancia del 5 %, el resultado obtenido indica que el rango elástico para las tres secciones evaluadas se mantuvo estadísticamente similar entre las tres. Asimismo, el coeficiente de variación de 5,56%, muestra una muy baja dispersión de los valores, indicando una homogeneidad en los resultados y confiabilidad en los datos (**Tabla 13**).

Tabla 13. Análisis de varianza del ELP (kg/cm^2) en compresión paralela a la fibra.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Sección	4888,16	2	2444,08	3,77	0,0538 ^{NS}
Error	7787,59	12	648,97		
Total	12675,74	14			

NS: no significativo; C.V.: 5,56 %.

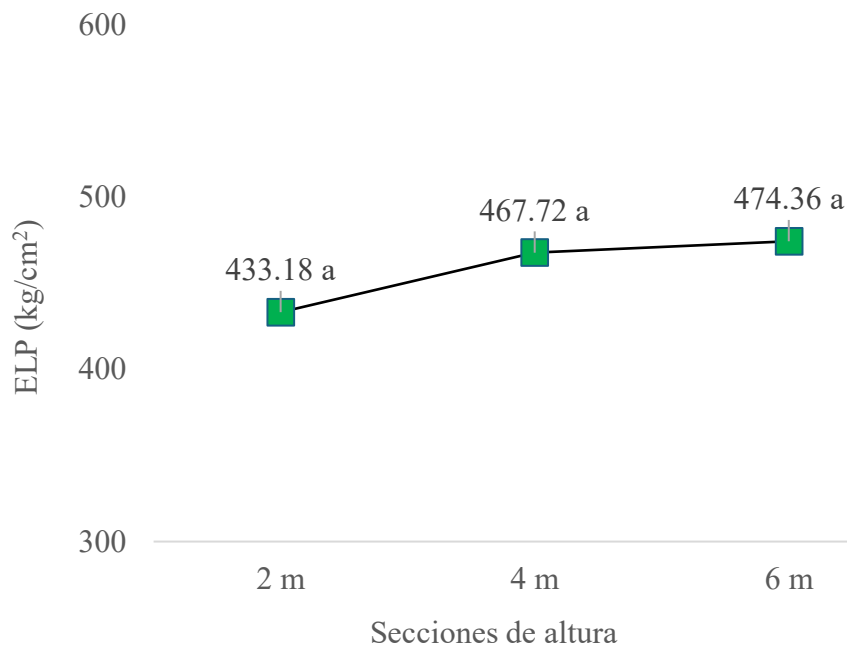


Figura 13. Prueba de comparación de medias del ELP (kg/cm^2) para compresión paralela a la fibra.

En la **Figura 13** se muestra el gráfico de la prueba de comparación de medias del esfuerzo al límite proporcional (ELP), donde numéricamente la sección a 6 m obtuvo el mayor valor promedio ($474,36 \text{ kg}/\text{cm}^2$), seguido de la sección a 4 m ($467,72 \text{ kg}/\text{cm}^2$) y la de a 2 m ($433,18 \text{ kg}/\text{cm}^2$). Estadísticamente, no existen diferencias entre los valores de las tres secciones de altura del fuste estudiadas.

De este modo, al comparar los resultados con estudios de la misma especie, Álvarez (2019) presentó un ELP de 313,5 kg/cm² de árboles de 32 años, Telles et al. (2017) 252,7 kg/cm² de una plantación de 11 años y Betancur et al. (2000) un ELP de 367,7 kg/cm². Los valores presentados son inferiores a lo obtenido.

Por otra parte, en contraste con otras especies, Alvis-Gordo et al. (2017) presentaron un ELP de 325 kg/cm² para *O. brevipetiolata* (uraco), Nugshi (2021) registró 201,4 kg/cm² para *H. brasiliensis* (caucho), Osis y Muñoz (2022) determinaron un ELP de 312,6 kg/cm² para *E. globulus* (eucalipto), 168,7 kg/cm² para *C. lusitánica* (ciprés) y 225,6 kg/cm² para *P. radiata* (pino), Rosales (2023) registró un ELP de 107,1 kg/cm² en *P. maximinoi* (pino) de una plantación de 19 años y Aguilar (2019) 140,9 kg/cm² para *G. crinita* (bolaina) en individuos de 6 años. Los valores de estos estudios resultan ser menores al registrado.

En conclusión, el valor obtenido en el presente estudio resulta ser mayor en todas las comparaciones realizadas, esta diferencia se debe posiblemente a características anatómicas de cada individuo, propiedades físicas como el contenido de humedad y la densidad básica de la madera. Por lo mismo, el valor del esfuerzo en el límite proporcional en el ensayo de compresión paralela representa el máximo nivel de carga que la estructura celular de la madera puede soportar antes de sufrir deformaciones permanentes, indica el punto donde las paredes celulares de las fibras han alcanzado su capacidad elástica máxima, está relacionado con la capa intermedia de la pared, si esta es muy delgada, el ELP se alcanza rápido.

4.3. Tracción perpendicular a la fibra en tres secciones de altura de *T. grandis*.

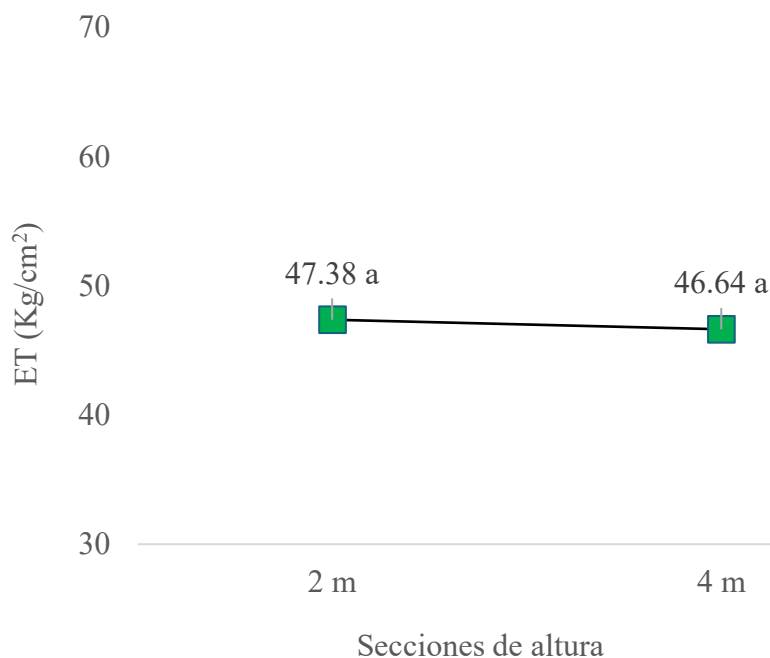
4.3.1. Esfuerzo máximo de tracción (ET) (kg/cm²)

El análisis de varianza del Esfuerzo Máximo de Tracción (ET) para la madera de raleo de *T. grandis* indica que no existen diferencias significativas en los valores de resistencia máxima de las dos secciones de altura ($p = 0,9366$). El alto valor de probabilidad registrado señala que la capacidad máxima de carga de la madera de teca es estadísticamente similar entre ambas secciones. Por su parte, el coeficiente de variación de 30,32 % indica que existe una muy alta dispersión de los datos experimentales (**Tabla 14**). El contenido de humedad de la madera fue de 11,92 % (ver Anexo, **Tabla 16**).

Tabla 14. Análisis de varianza del ET (kg/cm^2) en tracción perpendicular a la fibra.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Sección	1,37	1	1,37	0,01	0,9366 ^{NS}
Error	1625,4	8	203,18		
Total	1626,77	9			

NS: no significativo; C.V.: 30,32 %.

**Figura 14.** Prueba de comparación de medias de ET (kg/cm^2) para tracción perpendicular a la fibra.

La gráfica de la prueba de comparación de medias del esfuerzo máximo de tracción (ET) se muestra en la **Figura 14**, donde se observa que numéricamente la sección a 2 m obtuvo el mayor promedio (47,38 kg/cm^2), sin embargo, no difiere estadísticamente de la sección a 4 m (46,64 kg/cm^2). De acuerdo con la **Tabla 2**, estos resultados corresponden a una clasificación de resistencia “Media”.

De este modo, al compararla con estudios de la misma especie, Telles et al. (2017) registraron un ET de 41,2 kg/cm^2 para una plantación de 11 años y Álvarez (2019) un ET de 41,5 kg/cm^2 para una de 32 años. Ambos resultados son inferiores a lo obtenido, sin embargo, pertenecen a la misma clasificación.

En contraste con otras especies, Nájera-Luna et al. (2005) para la especie *Q. laeta* (roble blanco), obtuvieron resultados promedio de 65,6 kg/cm², siendo esta resistencia superior a la obtenida y de clasificación “Alta”.

En resumen, la variación entre los valores de la comparación se debe posiblemente a características anatómicas como la composición celular y orientación de las fibras además de la calidad del sitio como disponibilidad de agua y nutrientes. Cabe mencionar que el esfuerzo máximo de tracción es la resistencia máxima que la madera soporta justo antes de fallar.

V. CONCLUSIONES

1. Para el ensayo de flexión estática: Se evidenciaron diferencias estadísticas entre las secciones de altura a 2 y 6 metros del fuste, siendo esta última la que mayor promedio obtuvo. Conforme a los valores presentados para el Módulo de Ruptura (MOR), se clasifica la resistencia como “Alta”.
2. Para el ensayo de compresión paralela a las fibras: Se encontraron diferencias estadísticas entre las secciones evaluadas, la que mejor rendimiento obtuvo fue la sección a 6 metros de altura. De acuerdo con la clasificación de las propiedades mecánicas de la madera y tomando en cuenta la Resistencia Máxima (RM), se clasifica como resistencia “Media”.
3. Para el ensayo de tracción perpendicular a las fibras: No se evidenciaron diferencias estadísticas entre las secciones de altura analizadas. Con relación a los resultados obtenidos en el Esfuerzo Máximo de Tracción (ET), los valores pertenecen al nivel de resistencia “Media”.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

- Conocer más a profundidad las propiedades mecánicas de la madera de raleo de *Tectona grandis*, a través de otros ensayos como cizallamiento, clivaje y tracción paralela a la fibra.
- Realizar un comparativo del comportamiento mecánico de la madera con las demás parcelas dentro de la plantación.
- Realizar comparativos con otras especies de madera de plantaciones que estén en época de raleo para identificar las fortalezas y debilidades de *Tectona grandis* frente a otras especies de alto valor comercial.

VII. REFERENCIAS

- Aalto University - Wood Science. (2021). *Mechanical properties of wood: viscoelastic material* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=R6_ME7FL9b0
- Abarca, M. (2021). Propiedades, secado trabajabilidad y control genético de la madera de nueve clones de *Swietenia macrophylla* de 8 años, Sarapiquí, Costa Rica [Tesis de grado, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio TEC. <https://hdl.handle.net/2238/12406>
- Acosta, J. (2023). Análisis de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de seique (*Cedrelinga catenaeformis*) proveniente del Cantón Tena provincia de Napo y su factibilidad como elemento estructural de acuerdo con la norma ecuatoriana de la construcción (NEC 2015) [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Institucional UTA. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/39500>
- Aguilar, J. (2019). Propiedades mecánicas de madera de raleo de 6 años provenientes de plantaciones de *Guazuma crinita* en Puerto Inca-Huánuco [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4030>
- Alarcón, C. (2019). *Isotropía, Ortotropía y Anisotropía*. www.scribd.com/document/423678122/Isotropia-Ortotropia-y-Anisotropia
- Alvares, E. y Lerda, F. (2011). Determinación experimental de la anisotropía, punto de saturación de las fibras y pesos específicos aparentes de la madera del híbrido *Pinus Elliottii* Var. *Elliottii* X *Pinus Caribaea* Var. *Hondurensis* cultivada en misiones. *XXV Jornadas forestales entre ríos*, 6.

- Álvarez, R. (2019). *Caracterización físico-mecánica de la madera de teca *Tectona grandis* l.f. proveniente de una plantación en Chanchamayo-Perú* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4947>
- Alvis-Gordo, J., Cabas-Giraldo, L. y Valencia-Ramos, D. (2017). Propiedades físico-mecánicas de la madera de uraco (*Ocotea brevipetiolata* van der Werff), municipio de Sibundoy, Putumayo. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 15(1), 66-75. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612017000100008
- Arévalo, R., y Hernández, R. (2008). Efecto De Los Extractivos Y La Estructura Anatómica En Las Propiedades Mecánicas De La Madera De Caoba, *Swietenia macrophylla* King. *Colombia Forestal*, 11, 137-147. www.redalyc.org/articulo.oa?id=423939611009
- Aróstegui, A., González, V. y Sato, A. (1986). Propiedades tecnológicas y usos de la madera de 40 especies del Bosque Nacional Alexander Von Humboldt. *Revista Forestal del Perú*, 10(1-2), 1-86. [http://cedinfor.lamolina.edu.pe/Articulos_RFP/Vol10_no1-2_80-81_\(14\)/vol10_art1.pdf](http://cedinfor.lamolina.edu.pe/Articulos_RFP/Vol10_no1-2_80-81_(14)/vol10_art1.pdf)
- Arriaga, F., Wang, X., Íñiguez-Gonzales, G., , Llana, D., Esteban, M. y Niemz, P. (2023). Mechanical Properties of Wood: A Review. *Forests*, 14(6), 1202. <https://doi.org/10.3390/f14061202>
- Askeland, D. y Wright, W. (2017). *Ciencia e Ingeniería de materiales* (7ª ed.). CENGAGE.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2000). Standard test methods for small clear specimens of timber, Designation: D 143-94 (Reapproved 2000) – Primary methods. Philadelphia, US. 31 p.

- Ávila, L. y Herrera, M. (2012). Efecto de los extraíbles en tres propiedades físicas de la madera de *Enterolobium cyclocarpum* procedente de Michoacán, México. *Bosque (Valdivia)*, 33(2), 227-232. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002012000200013>
- Berger, G. y Suirezs, M. (2010). *Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera*. Editorial Universitaria de Misiones. https://editorial.unam.edu.ar/images/documentos_digitales/f5_978-950-579-154-5.pdf
- Betancur, C., Herrera, J. y Mejía, L. (2000). Estudio de las propiedades físicas y mecánicas, trabajabilidad y secado de la Teca (*Tectona grandis* L.f.) de Puerto Libertador (Córdoba). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 53(1), 913-939. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/24068>
- Castro, F. y Raigosa, J. (2000). Crecimiento y propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis*) de 17 años de edad en San Joaquín de Abangares, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 24(2), 7-23. www.redalyc.org/articulo.oa?id=43624201
- Centro de Innovación Tecnológico de la Madera (CITEmadera). (2009). *Técnicas de secado de la madera*. cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/571600/03._T%C3%A9cnicas_de_secado.pdf
- Crespo, R., Jiménez, E., Suatunce, P., Law, G. y Sánchez, C. (2008). Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis* L.F.) de Quevedo y Balzar. *Ciencia y Tecnología*, 1(2), 55-63. dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4056143
- Dávalos, R. y Bárcenas, G. (1999). Clasificación de las propiedades mecánicas de las maderas mexicanas en condición seca. *Madera y Bosques*, 5(1), 61-69. [https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61750107](http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61750107)

- Flórez, J., Trugilho, P., Tarcisio, J., Gherardi, P. y Moreira, J. (2014). Caracterización de la madera joven de *Tectona grandis* L. f. plantada en Brasil. *Madera y bosques*, 20(1), 11-20. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712014000100002&lng=es&tlng=es.
- Giménez, A., Moglia, J. Hernández, P. y Gerez, R. (2005). *Anatomía de Madera* (2ª ed.). Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- Global Biodiversity Information Facility (GBIF). (2023). *Tectona grandis* L. f. GBIF Backbone Taxonomy. <https://www.gbif.org/es/species/2925649>
- Guariguata, M., Arce, J., Ammour, T. y Capella, J. (2017). *Las plantaciones forestales en Perú Reflexiones, estatus actual y perspectivas a futuro*. Centro para la Investigación Forestal Internacional. <https://doi.org/10.17528/cifor/006461>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., y Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education
- Hiziroglu, S. (2016). Strength Properties of Wood for Practical Applications. <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/strength-properties-of-wood-for-practical-applications.html>
- Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2014). *Madera. Método para determinar la flexión estática*. 3ª edición (NTP 251.017:2014).
- Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2015). *Madera. Determinación de la tensión perpendicular a las fibras*. 3ª edición (NTP 251.086:2015).
- Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2023). *Madera. Método para selección y colección de muestras*. (NTP 251.008:2023).

- Kasal, B. (2004). WOOD FORMATION AND PROPERTIES/Mechanical Properties of Wood. Burley, J. (ed.). *Encyclopedia of Forest Sciences* (Pp. 1815-1828). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-145160-7/00041-7>
- León, W. (2010). Anatomía y densidad o peso específico de la madera. *Revista Forestal Venezolana*, 54(1), 67-76. https://www.researchgate.net/publication/260002299_Anatomia_y_densidad_o_peso_especifico_de_la_madera_Anatomy_and_specific_gravity_of_wood
- Ley Forestal y de Fauna Silvestre n.º29763. Art. 11. Diario Oficial El Peruano. Perú. 21 jul. 2011.
- Martínez, P. (2018). *Factores que influyen en las propiedades mecánicas de la madera*. Escuadría. <https://escuadría.com/factores-que-influyen-en-propiedades-mecanicas-madera/>
- Medina, A., Manzione, P., Baucis, A., Catalán, M., Laffitte, L. y Andía, I. (2020). Propiedades mecánicas de la madera de álamos de cortinas forestales de Río Negro, Patagonia, Argentina. *RIA, Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 46(2), 203-207. <https://www.redalyc.org/journal/864/86464924008/html/>
- Meza, A. y Torres, G. (2012). El raleo: una operación silvicultural fundamental. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. 3(8), 88–90. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/520>
- Nájera-Luna, J., Vargas-Antonio, Z., Méndez-González, J. y Graciano-Luna, J. (2005). Propiedades físicas y mecánicas de la madera en *Quercus laeta* Liemb. De el Salto, Durango. *Ra Ximhai*, 1(3), 559-576. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46110307>

- Nugshi, J. (2021). Caracterización de las propiedades químicas, físicas y mecánicas de la madera de *Hevea brasiliensis* procedente de la Hacienda Santa Rita, Provincia Los Rios [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional de la Escuela Politécnica de Chimborazo. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/15835>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2021). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 - Informe principal*. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca9825es>
- Osis, D. y Muñoz, A. (2022). Determinación de las Propiedades Físicas y Mecánicas de la Madera Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), Pino (*Pinus radiata*) y Ciprés (*Cupressus lusitánica*), para su uso como Material Estructural y su Aplicación al Diseño de un Tijeral Par y Nudillo, Abancay-Apurímac [Tesis de grado, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac]. Repositorio Institucional UNAMBA. <https://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1147>
- Refort, M., Acuña-Rello, L., Monteoliva, S., Mateo, C., Charlot, P., Palazzini, D., Pagano, C., Keil, G. y Spavento, E. (2024). Determinación de la edad de transición de madera juvenil a madura y de sus valores elasto-resistentes en *Pinus contorta*. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 34(26), 1-14. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-221X2024000100434&script=sci_arttext
- Refort, M. y Keil, G. (2012). Importancia y determinación de las propiedades mecánicas de la madera. *SEDICI*. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/62492>
- Rivero, J. y Moya, R. (2006). Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F.(teca), proveniente de una plantación de ocho años de edad en Cochabamba,

- Bolivia. *Revista Forestal mesoamericana Kurú*, 3(9), 50-63.
<https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/507>
- Rodríguez, R., Zamora, J., Silva, A., Salcedo, E. y Fuentes, F. (2014). Propiedades Físico-Mecánicas De Madera De Teca De Plantaciones Comerciales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24), 12-25. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63439010003>
- Rosales, V. (2023). Propiedades mecánicas de la madera de *Pinus maximinoi* de diecinueve años de Oxapampa, Perú [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/6097>
- Ross, R. (2010). *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Forest Products Laboratory. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-190>
- Sánchez, J. (2021). Análisis de las propiedades mecánicas de la madera de eucalipto (*eucalyptus*), provenientes de la provincia de Tungurahua y su factibilidad como material estructural de acuerdo a la norma ecuatoriana de la construcción 2015 (NEC 2015) [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Institucional UTA. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/33541>
- Santiago, P., Guevara, C. y Espinoza, M. (2013). *Manual de transformación de la madera*. https://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2929/Technical/Technical%20report%20-%20Manual%20de%20transformacion%20de%20la%20madera.pdf
- Santisteban, A. (2024). Propiedades mecánicas de la madera de *Dacryodes peruviana* (Loes.) H. J. Lam (copal) en sentido longitudinal y transversal, zona-Tingo María [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2895>

- SERFOR Perú. (2023). *Plantaciones Forestales: aportando a la competitividad del sector forestal - Madre de Dios*. [Video] Youtube. www.youtube.com/watch?v=7HZgznjEOR8
- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). (2022). *ExpoAmazónica 2022: SERFOR registra más de 88 mil hectáreas de plantaciones forestales*. [comunicado de prensa]. <https://www.gob.pe/institucion/serfor/noticias/643027-expoamazonica-2022-serfor-registra-mas-de-88-mil-hectareas-de-plantaciones-forestales>
- Telles, A., Nájera, J., Alanís, E., Aguirre, O., Jiménez, J., Gómez, M., y Muñoz, H. (2017). Propiedades físico-mecánicas de la madera *Tectona grandis* L. f. de una plantación comercial en el estado de Michoacán. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 8(40), 37–56. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i40.35>
- The International Tropical Timber Organization (ITTO). (2024). Teca, Teak (*Tectona grandis*). <http://www.tropicaltimber.info/specie/teca-tectona-grandis/>
- Weaver, P. (2000). *Tectona grandis* L. f. Francis, J. y Lowe, C. (Eds.) Bioecología de Árboles Nativos y Exóticos de Puerto Rico y las Indias Occidentales (Pp. 524-540). Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio Forestal.

ANEXOS

Tabla 15. Valores obtenidos para las probetas de flexión estática.

Árbol	Código	a (cm)	e (cm)	L (cm)	P (kg)	P' (kg)	y (cm)	MOR (kg/cm ²)	ELP (kg/cm ²)	MOE (kg/cm ²)	mM (g)	m0 (g)	CH (%)	Observaciones
1	A1T1-1	2,513	2,598	36	279,5	112,4	0,2533	889,8	357,8	117454,2	10,33	8,96	15,3	Falla combinada
1	A1T1-2	2,616	2,633	36	298,8	189,3	0,4118	889,7	563,6	112284,9	10,68	9,28	15,1	Tensión simple / Astillamiento
1	A1T1-3	2,575	2,502	36	263,1	101	0,2271	881,4	338,3	128621,2	9,9	8,66	14,3	Tensión de grano entrecruzado
1	A1T2-4	2,588	2,572	36	319,5	148,6	0,2094	1007,8	468,7	187980,4	11,59	10,15	14,2	Tensión simple / Astillamiento
1	A1T2-5	2,583	2,555	36	302,2	176,3	0,3107	967,8	564,6	153624,8	10,81	9,41	14,9	Tensión simple / Astillamiento
1	A1T2-6	2,601	2,568	36	281,8	164,7	0,3134	887,2	518,5	139160,7	10,91	9,51	14,7	Tensión de grano entrecruzado
1	A1T3-7	2,588	2,534	36	307,7	146,8	0,2825	999,9	477,0	143936,5	10,69	9,34	14,5	Astillamiento
1	A1T3-8	2,602	2,581	36	314,8	154,7	0,2774	980,7	481,9	145398,5	11,18	9,74	14,8	Astillamiento
1	A1T3-9	2,596	2,582	36	341,3	145,3	0,2518	1064,9	453,4	150620,5	11,57	10,16	13,9	Tensión simple / Astillamiento
2	A2T1-10	2,558	2,623	36	286	130,2	0,3151	877,5	399,5	104403,4	10,3	8,95	15,1	Tensión simple / Astillamiento
2	A2T1-11	2,591	2,565	36	225,9	94,3	0,256	715,6	298,7	98262,9	10,63	9,26	14,8	Tensión de grano entrecruzado
2	A2T1-12	2,564	2,591	36	300,5	134,3	0,2414	942,7	421,3	145501,0	10,51	9,18	14,5	Tensión simple / Astillamiento
2	A2T2-13	2,551	2,494	36	167,2	88,6	0,1777	569,0	301,5	146958,3	11,35	9,88	14,9	Tensión simple / Astillamiento
2	A2T2-14	2,574	2,612	36	322,8	138,5	0,2294	992,6	425,9	153523,8	11,21	9,79	14,5	Falla combinada
2	A2T2-15	2,536	2,536	36	315,4	164,4	0,3092	1044,3	544,3	149938,4	11,39	9,92	14,8	Tensión simple / Astillamiento
2	A2T3-16	2,608	2,59	36	326,7	161,7	0,3017	1008,4	499,1	137967,0	11,22	9,82	14,3	Tensión simple / Astillamiento
2	A2T3-17	2,592	2,64	36	349,4	158	0,2843	1044,4	472,3	135919,2	11,1	9,69	14,6	Tensión simple / Astillamiento
2	A2T3-18	2,594	2,584	36	333,3	144,1	0,2745	1039,1	449,3	136811,2	11,18	9,78	14,3	Tensión simple / Astillamiento
3	A3T1-19	2,61	2,607	36	354,5	195,9	0,3451	1079,2	596,4	143177,0	12,73	11,01	15,6	Tensión simple / Astillamiento
3	A3T1-20	2,572	2,584	36	259	123,5	0,2413	814,4	388,3	134526,8	10,29	8,93	15,2	Tensión simple / Astillamiento
3	A3T1-21	2,608	2,584	36	289,7	124,2	0,2989	898,4	385,1	107710,5	11,77	10,21	15,3	Falla combinada
3	A3T2-22	2,591	2,586	36	313	225,2	0,4246	975,5	701,8	138064,8	10,99	9,6	14,5	Falla combinada

3	A3T2-23	2,463	2,574	36	304,8	205,5	0,4247	1008,6	680,0	134365,3	11,34	9,92	14,3	Falla combinada
3	A3T2-24	2,471	2,507	36	289,7	153,3	0,2461	1007,3	533,0	186613,2	10,62	9,19	15,6	Falla combinada
3	A3T3-25	2,431	2,609	36	264,7	110,8	0,2171	863,8	361,6	137886,0	10,85	9,57	13,4	Falla combinada
3	A3T3-26	2,602	2,6	36	314,3	220,6	0,3907	964,9	677,2	144006,6	10,26	8,95	14,6	Falla combinada
3	A3T3-27	2,561	2,566	36	352,7	143,3	0,2054	1129,5	458,9	188067,5	11,42	9,97	14,5	Falla combinada
4	A4T1-28	2,608	2,605	36	305,6	122,3	0,2694	932,4	373,2	114853,9	13,06	11,34	15,2	Falla combinada
4	A4T1-29	2,59	2,554	36	321	126,7	0,2551	1026,0	405,0	134261,4	12,08	10,47	15,4	Tensión simple / Astillamiento
4	A4T1-30	2,583	2,625	36	351,4	170	0,3204	1066,1	515,8	132462,1	12,18	10,6	14,9	Falla combinada
4	A4T2-31	2,542	2,581	36	347,7	167,6	0,2747	1108,8	534,5	162825,8	11,24	9,86	14,0	Falla combinada
4	A4T2-32	2,503	2,533	36	329,9	211,8	0,3335	1109,3	712,2	182100,5	11,65	10,16	14,7	Falla combinada
4	A4T2-33	2,569	2,555	36	320,4	154,9	0,2705	1031,7	498,8	155881,6	12,23	10,65	14,8	Tensión simple / Astillamiento
4	A4T3-34	2,58	2,574	36	341,5	179,1	0,2735	1078,8	565,8	173596,3	12,51	11,01	13,6	Falla combinada
4	A4T3-35	2,618	2,568	36	343,2	174,3	0,3031	1073,4	545,2	151287,9	12,05	10,56	14,1	Tensión simple / Astillamiento
4	A4T3-36	2,542	2,589	36	351,7	155,3	0,2552	1114,6	492,2	160903,9	11,77	10,34	13,8	Tensión simple / Astillamiento
5	A5T1-37	2,578	2,602	36	297,9	131,8	0,304	921,7	407,8	111348,5	11,74	10,34	13,5	Tensión simple / Astillamiento
5	A5T1-38	2,478	2,454	36	283,2	119,1	0,2845	1024,8	431,0	133337,4	10,81	9,51	13,7	Tensión simple / Astillamiento
5	A5T1-39	2,573	2,534	36	278,4	151,9	0,3421	909,9	496,5	123706,5	10,25	9,01	13,8	Falla combinada
5	A5T2-40	2,624	2,577	36	327,3	131,9	0,2569	1014,3	408,7	133358,6	11,15	9,82	13,5	Tensión simple / Astillamiento
5	A5T2-41	2,536	2,552	36	312,1	141,3	0,246	1020,4	462,0	158951,0	11,06	9,69	14,1	Tensión simple / Astillamiento
5	A5T2-42	2,6	2,632	36	337,6	142,8	0,2395	1012,2	428,1	146703,1	10,78	9,46	14,0	Tensión simple / Astillamiento
5	A5T3-43	2,563	2,49	36	294,1	129,7	0,2219	999,4	440,7	172299,3	10,83	9,46	14,5	Tensión simple / Astillamiento
5	A5T3-44	2,558	2,572	36	331	151,3	0,2341	1056,3	482,8	173209,5	11,11	9,74	14,1	Tensión simple / Astillamiento
5	A5T3-45	2,604	2,583	36	352,4	214,8	0,3446	1095,3	667,6	162013,9	11,15	9,79	13,9	Tensión simple / Astillamiento

P: carga máxima, P': carga al límite proporcional, y: dimensión al límite proporcional, MOE: módulo de elasticidad, MOR: módulo de ruptura, ELP: esfuerzo al límite proporcional, CH: contenido de humedad.

Tabla 16. Valores obtenidos para las probetas de compresión paralela a la fibra.

Árbol	Código	a (cm)	e (cm)	Dist. (cm)	P (kg)	P' (kg)	y (cm)	RM (kg/cm ²)	ELP (kg/cm ²)	MOE (kg/cm ²)	mM (g)	m0 (g)	CH (%)	Observaciones
1	A1T1-1	2,51	2,495	5	2823,1	2652,8	0,019	450,8	423,6	111474,8	37,37	32,64	14,5	Aplastamiento
1	A1T1-2	2,446	2,467	5	2840,5	2697,2	0,0219	470,7	447,0	102050,1	36,35	31,7	14,7	Aplastamiento
1	A1T1-3	2,501	2,442	5	2838,8	2629,8	0,0123	464,8	430,6	175036,4	36,82	32,3	14,0	Cizallamiento
1	A1T2-4	2,617	2,595	5	3198,5	3089,8	0,0143	471,0	455,0	159082,8	39,71	34,88	13,8	Aplastamiento
1	A1T2-5	2,625	2,54	5	2961,5	2948,6	0,017	444,2	442,2	130069,0	39,66	34,61	14,6	Cizallamiento
1	A1T2-6	2,596	2,553	5	3093	3067,9	0,0254	466,7	462,9	91121,7	40,57	35,48	14,3	Deslizamiento
1	A1T3-7	2,559	2,536	5	3031	2828,3	0,0209	467,1	435,8	104262,9	39,92	35,04	13,9	-
1	A1T3-8	2,615	2,606	5	3246	3131,1	0,0144	476,3	459,5	159535,9	40,5	35,35	14,6	División en cuña
1	A1T3-9	2,601	2,554	5	3049,9	2658,3	0,0197	459,1	400,2	101565,6	39,36	34,49	14,1	División en cuña
2	A2T1-10	2,53	2,556	5	2820,5	2697,5	0,0212	436,2	417,1	98381,7	36,78	32,39	13,6	División en cuña
2	A2T1-11	2,616	2,471	5	2987,7	2243,7	0,0126	462,2	347,1	137738,0	38,63	33,78	14,4	División en cuña
2	A2T1-12	2,521	2,579	5	3009,8	2999,9	0,0211	462,9	461,4	109337,8	36,93	35,52	14,0	Aplastamiento
2	A2T2-13	2,54	2,588	5	3026,8	2722,5	0,0109	460,5	414,2	189982,4	39,68	34,72	14,3	Aplastamiento
2	A2T2-14	2,592	2,558	5	3581	3560,4	0,0203	540,1	537,0	132262,7	42,38	37,17	14,0	Cizallamiento
2	A2T2-15	2,557	2,591	5	3135,3	3071,6	0,0134	473,2	463,6	172994,3	40,31	35,18	14,6	Aplastamiento
2	A2T3-16	2,629	2,601	5	3142,7	3003,3	0,0148	459,6	439,2	148380,2	41,05	35,97	14,1	Aplastamiento
2	A2T3-17	2,622	2,577	5	3296,2	3077,8	0,0131	487,8	455,5	173856,9	42,21	37,06	13,9	Cizallamiento
2	A2T3-18	2,619	2,579	5	3639,7	3435,2	0,0196	538,9	508,6	129741,6	44,69	39,31	13,7	División en cuña
3	A3T1-19	2,6	2,587	5	3132,1	2852,2	0,0121	465,7	424,0	175224,5	41,9	36,45	15,0	Aplastamiento
3	A3T1-20	2,476	2,577	5	2847,4	2774,6	0,017	446,3	434,8	127895,8	43,63	37,9	15,1	Cizallamiento
3	A3T1-21	2,662	2,609	5	3114,5	2697,2	0,0074	448,4	388,4	262403,3	41,57	35,9	15,8	Aplastamiento
3	A3T2-22	2,549	2,542	5	3020,7	2997,7	0,0181	466,2	462,6	127801,0	38,64	33,94	13,8	Aplastamiento

3	A3T2-23	2,557	2,606	5	2973,5	2693,2	0,0143	446,2	404,2	141318,0	40,42	35,42	14,1	Cizallamiento
3	A3T2-24	2,546	2,604	5	3106,8	3088,8	0,0225	468,6	465,9	103532,8	40,36	35,4	14,0	Cizallamiento
3	A3T3-25	2,59	2,572	5	3190,5	3068,6	0,018	478,9	460,6	127957,9	41,58	36,34	14,4	Cizallamiento
3	A3T3-26	2,498	2,494	5	3283,8	3045,9	0,0139	527,1	488,9	175866,0	39,82	34,84	14,3	Cizallamiento
3	A3T3-27	2,53	2,501	5	3420	2855,7	0,0138	540,5	451,3	163519,4	41,45	37,19	11,5	Cizallamiento
4	A4T1-28	2,639	2,577	5	2985	2707,8	0,0189	438,9	398,2	105334,6	43,49	38,8	12,1	Cizallamiento
4	A4T1-29	2,524	2,612	5	3279,5	3168,7	0,0181	497,4	480,6	132773,1	42,86	38,33	11,8	Cizallamiento
4	A4T1-30	2,563	2,666	5	3090,6	3078,4	0,0171	452,3	450,5	131731,7	42,76	38,32	11,6	Cizallamiento
4	A4T2-31	2,572	2,581	5	3670,2	3619	0,0226	552,9	545,2	120612,2	44,17	39,47	11,9	División en cuña
4	A4T2-32	2,543	2,587	5	3247,4	3170	0,0205	493,6	481,9	117525,6	42,01	37,8	11,1	Cizallamiento
4	A4T2-33	2,51	2,596	5	3129,7	3010,7	0,021	480,3	462,1	110011,9	40,75	36,48	11,7	Cizallamiento
4	A4T3-34	2,619	2,558	5	3791,2	3777,3	0,0228	565,9	563,8	123646,1	43,77	39,32	11,3	Cizallamiento
4	A4T3-35	2,604	2,571	5	3740,9	3589,3	0,0212	558,8	536,1	126444,8	44,82	40,06	11,9	Cizallamiento
4	A4T3-36	2,595	2,585	5	3325,5	3095,3	0,0109	495,7	461,4	211664,7	44,8	40,21	11,4	Cizallamiento
5	A5T1-37	2,567	2,556	5	3226,9	3219,7	0,015	491,8	490,7	163571,4	39,82	35,6	11,9	División en cuña
5	A5T1-38	2,579	2,559	5	3210	2875,5	0,0267	486,4	435,7	81592,5	42,57	38,29	11,2	Aplastamiento
5	A5T1-39	2,519	2,486	5	3057	2931,6	0,0208	488,2	468,1	112533,6	39,2	35,31	11,0	Cizallamiento
5	A5T2-40	2,559	2,574	5	3084,1	3068,8	0,0253	468,2	465,9	92074,5	40,3	36,12	11,6	Cizallamiento
5	A5T2-41	2,55	2,55	5	3247	3029,9	0,0196	499,3	466,0	118867,2	39,22	35,12	11,7	Cizallamiento
5	A5T2-42	2,629	2,56	5	3341,7	3277,7	0,0214	496,5	487,0	113787,6	40,18	36,15	11,1	Cizallamiento
5	A5T3-43	2,536	2,548	5	3247,3	3070,2	0,0289	502,5	475,1	82203,5	39,38	35,31	11,5	Cizallamiento
5	A5T3-44	2,533	2,57	5	3266,8	3091,2	0,0294	501,8	474,9	80757,2	41,03	36,84	11,4	División en cuña
5	A5T3-45	2,543	2,532	5	3251,9	3245,8	0,0202	505,0	504,1	124775,8	38,41	34,6	11,0	Aplastamiento

P: carga máxima, P': carga al límite proporcional, y: dimensión al límite proporcional, RM: resistencia máxima, ELP: esfuerzo al límite proporcional, MOE: módulo de elasticidad, CH: contenido de humedad.

Tabla 17. Valores obtenidos para las probetas de tracción perpendicular.

Árbol	Código	Espesor (cm)	Ancho (cm)	Área (cm ²)	P (kg)	ET (kg/cm ²)	mM (g)	m0 (g)	CH (%)
1	A1-1-Tg	2.549	4.864	12.40	460.1	37.1	25.84	23.29	10.9
1	A1-1-R	2.592	4.942	12.81	583.1	45.5	33.57	30.02	11.8
1	A1-2-Tg	2.248	4.927	11.08	702	63.4	25.59	22.91	11.7
1	A1-2-R	2.557	4.959	12.68	393.2	31.0	34.69	30.95	12.1
2	A2-1-Tg	2.59	4.952	12.83	413.5	32.2	37.33	33.53	11.3
2	A2-1-R	2.622	4.933	12.93	454.7	35.2	32.12	28.81	11.5
2	A2-2-Tg	2.43	4.904	11.92	667.1	56.0	29.59	26.48	11.7
2	A2-2-R	2.477	4.949	12.26	443.5	36.2	34.29	30.77	11.4
3	A3-1-Tg	2.429	4.924	11.96	831.6	69.5	26.35	23.48	12.2
3	A3-1-R	2.578	4.837	12.47	401.9	32.2	29.94	26.59	12.6
3	A3-2-Tg	2.467	4.898	12.08	734.6	60.8	29.03	25.84	12.3
3	A3-2-R	2.591	4.436	11.49	309.2	26.9	29.36	26.01	12.9
4	A4-1-r	2.545	4.879	12.42	379.3	30.5	36.13	32.33	11.8
4	A4-1-tg	2.394	4.879	11.68	1367.3	117.1	28.91	25.85	11.8
4	A4-2-Tg	2.601	4.941	12.85	1129.5	87.9	34.5	30.85	11.8
4	A4-2-R	2.429	4.938	11.99	506.2	42.2	28.65	25.54	12.2
5	A5-1-Tg	2.556	4.865	12.43	440.2	35.4	31.61	28.28	11.8
5	A5-1-R	2.356	4.918	11.59	451.8	39.0	26.9	24.01	12.0
5	A5-2-Tg	2.513	4.956	12.45	258.4	20.7	29.96	26.73	12.1
5	A5-2-R	2.484	4.874	12.11	502	41.5	28.47	25.35	12.3

P: carga máxima, ET: esfuerzo de tracción, CH: contenido de humedad.



Figura 15. Identificación de árboles al azar.



Figura 16. Georeferenciación de árboles.



Figura 17. Acopio de trozas.



Figura 18. Aserrado de trozas.



Figura 19. Cepillado de trozas.



Figura 20. Corte de trozas para la obtención de tablones.



Figura 21. Obtención de tablones.



Figura 22. Codificación de tablones.



Figura 23. Secado al aire libre de madera.



Figura 24. Seguimiento del secado mediante pesado.



Figura 25. Peso de tablón.



Figura 26. Cepillado de tablonos.



Figura 27. Codificación de listones.



Figura 28. Habilitación de probetas de flexión estática.



Figura 29. Probetas de flexión estática.



Figura 30. Probetas de compresión paralela.



Figura 31. Probeta de tracción perpendicular.



Figura 32. Medición y registro del centro de las probetas de flexión estática.



Figura 33. Preparación de probeta.

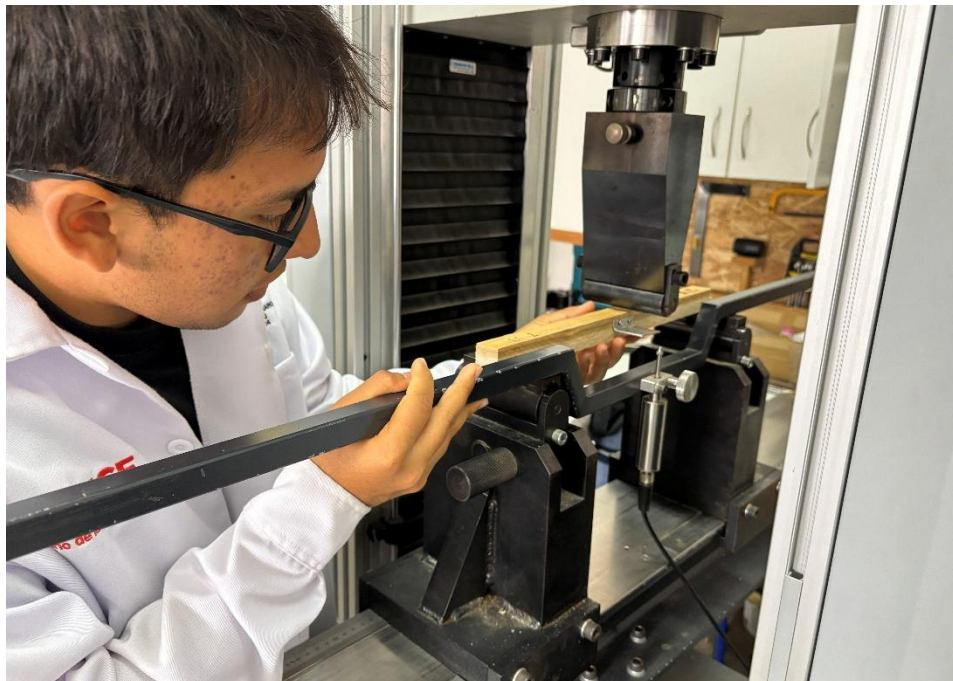


Figura 34. Coloración de probeta en la prensa mecánica.



Figura 35. Ensayo de flexión estática.

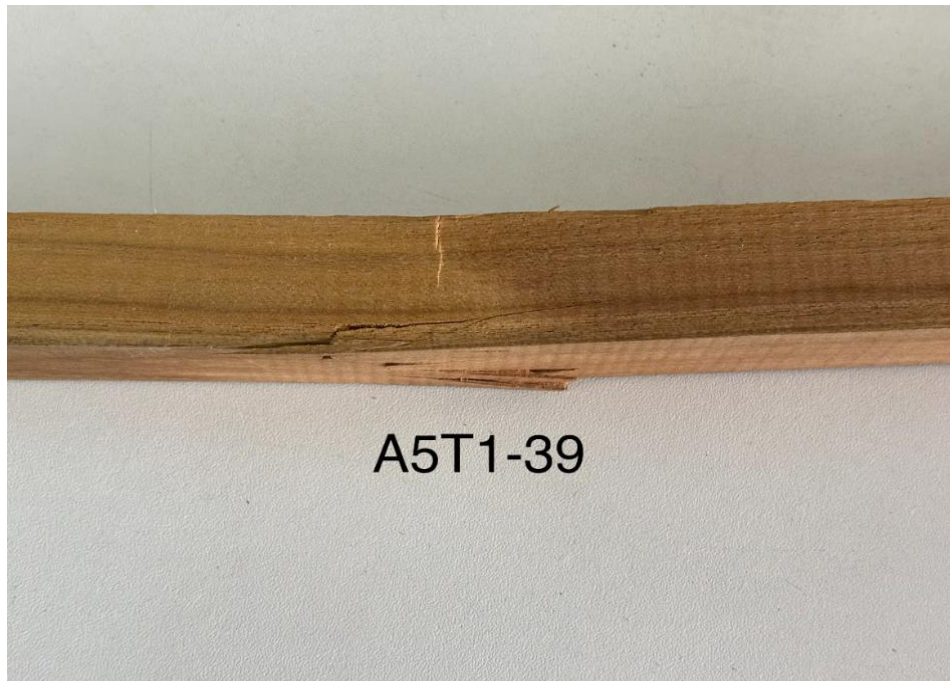


Figura 36. Tipo de falla combinada en flexión estática.



Figura 37. Secado de los cubos obtenidos de las probetas de flexión estática.



Figura 38. Pesado de los cubos de las probetas de flexión estática.

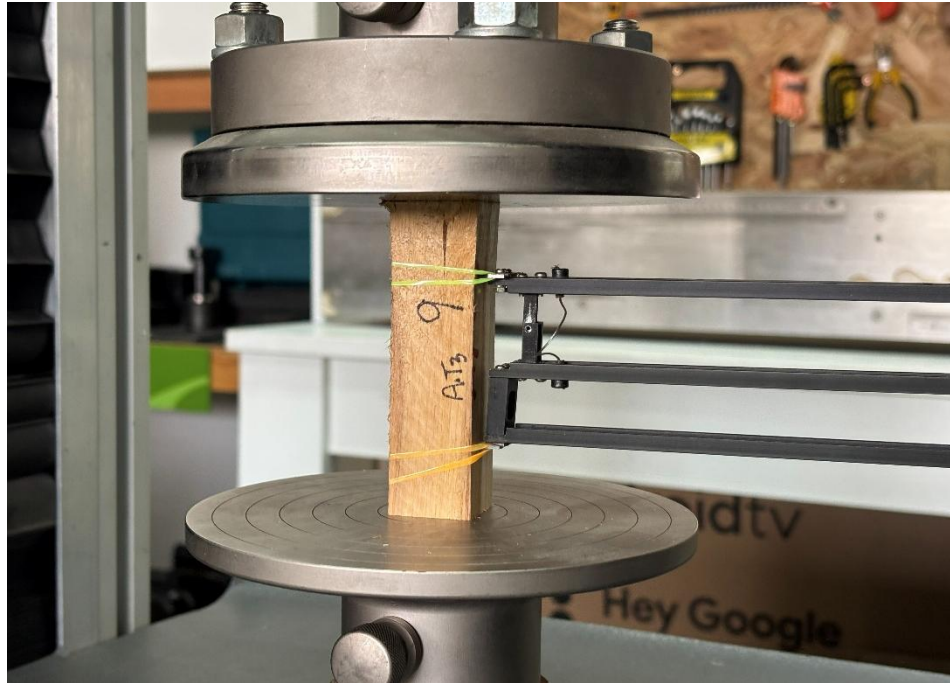


Figura 39. Falla de división en cuña en ensayo de compresión paralela.



Figura 40. Pesado de probeta de compresión luego del ensayo.

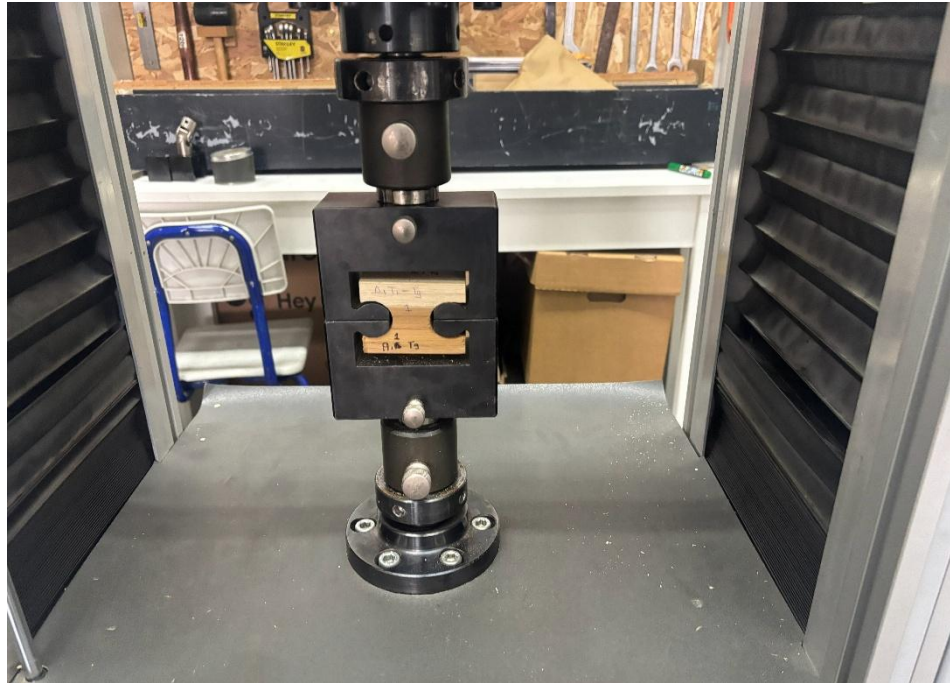


Figura 41. Ensayo de tracción perpendicular.

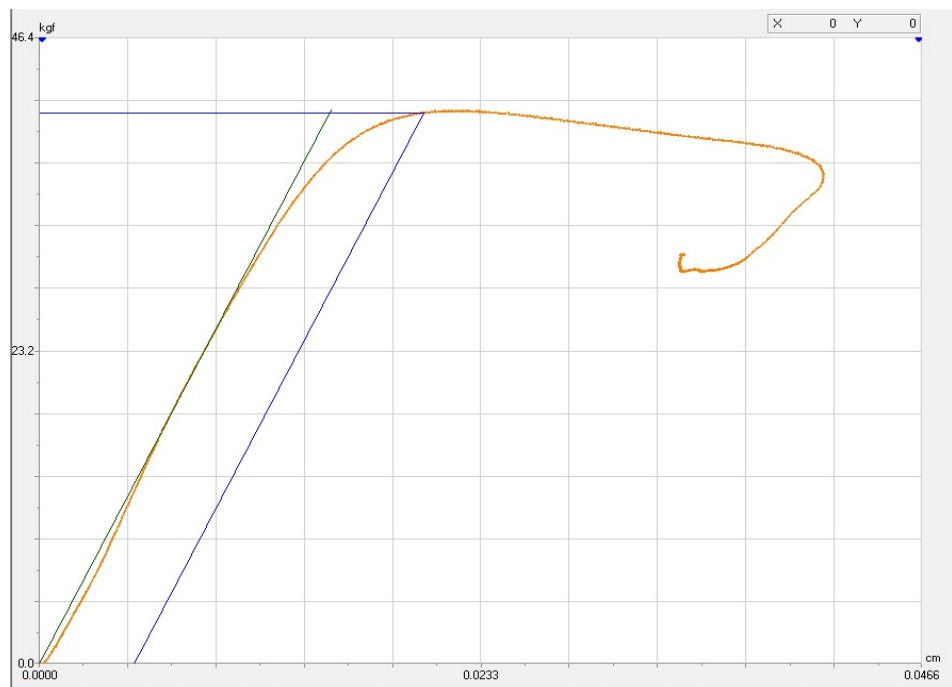


Figura 42. Gráfico fuerza/deformación en tracción perpendicular.



Figura 43. Secado al horno para determinación del contenido de humedad.



Figura 44. Regulación de temperatura en el desecador.