

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE
DE DIOS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL
Y MEDIO AMBIENTE**



TESIS

**“Variación radial de las propiedades físicas y mecánicas de la madera
de *Apuleia leiocarpa*, Tambopata - Madre de Dios”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL Y
MEDIO AMBIENTE**

Autores:

Bach. GIRALDO HUAMAN, Arnold Paul

Bach. CASTRO CUCHITINERI, Eduar Toribio

Asesor:

Dr. CHAMBI LEGOAS, Roger

Co-asesor:

Dr. ROSALES SOLÓRZANO, Emer Ronald

Puerto Maldonado, noviembre 2025

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE
DE DIOS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL
Y MEDIO AMBIENTE**



TESIS

**“Variación radial de las propiedades físicas y mecánicas de la madera
de *Apuleia leiocarpa*, Tambopata - Madre de Dios”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL Y
MEDIO AMBIENTE**

Autores:

Bach. GIRALDO HUAMAN, Arnold Paul

Bach. CASTRO CUCHITINERI, Eduar Toribio

Asesor:

Dr. CHAMBI LEGOAS, Roger

Co-asesor:

Dr. ROSALES SOLÓRZANO, Emer Ronald

Puerto Maldonado, noviembre 2025

DEDICATORIA

Dedico este logro a quienes han sido mi mayor soporte: a mis padres queridos, mis hermanos y familia; gracias por estar siempre ahí, alentándome apoyándome y llenándome de amor y fortaleza para no rendirme. Este logro académico representa el fruto del constante compromiso y dedicación que han puesto en ofrecerme una formación firme y valiosa. Cada renuncia, cada jornada de esfuerzo y cada decisión asumida pensando en mí han sido pilares esenciales para alcanzar este objetivo. Este trabajo de tesis simboliza su entrega y cariño, y constituye para mí una forma de rendirles homenaje con profundo orgullo. Gracias por ser una guía permanente en mi vida, por orientarme hacia el aprendizaje y por transmitirme el valor del esfuerzo y de la educación. Los quiero con todo mi corazón.

Arnold Paul Giraldo Huaman

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino, por iluminar mi mente y darme el valor para superar cada obstáculo.

A mis padres, por su amor incondicional, sus sacrificios y enseñanzas. Gracias por creer en mí incluso en los momentos más difíciles, por ser mi mayor fuente de inspiración y por brindarme las herramientas para alcanzar mis sueños.

A mi familiares y amigos, por su apoyo constante, sus palabras de aliento y por estar a mi lado en cada etapa de este proceso. Cada uno de ustedes ha sido un pilar fundamental en este logro, y les dedico con gratitud y amor este esfuerzo.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento y cariño. Este logro es también suyo.

Eduar Toribio Castro Cuchitineri

AGRADECIMIENTOS

Damos gracias a Dios por permitirnos tener una buena experiencia dentro de la universidad, gracias a la Universidad Nacional Amazónica de Mare de Dios por forjarnos como buenos profesionales apasionados por el manejo de los bosques, gracias a cada docente que hizo parte de este proceso integral de formación, que deja como producto a estos graduados, y como recuerdo y prueba viviente; esta tesis; que perdurara dentro de los conocimientos y desarrollo de las demás generaciones que están por llegar.

RESUMEN

Los estudios de variación radial de las propiedades de la madera son importantes para conocer la diferencia de la calidad de la madera desde la zona más interna a la zona más externa del tronco, permitiendo también inferir la diferencia de calidad de la madera entre árboles jóvenes de menor diámetro y árboles viejos de mayor diámetro. Esto repercute en la mejora de la calidad de productos y el uso adecuado de la madera obtenida de diferentes partes del tronco o de árboles de diferentes diámetros de una misma especie. En este contexto, el estudio tuvo por objetivo evaluar la variación radial de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Apuleia leiocarpa*, en Tambopata – departamento de Madre de Dios. Se muestrearon 4 árboles de *A. leiocarpa* de una concesión no maderable, en Madre de Dios, Perú, de los cuales se prepararon probetas de la región más interna, región intermedia y región más externa del tronco, para los ensayos de propiedades físicas y mecánicas de la madera, con dos repeticiones por ensayo por árbol. Los ensayos fueron realizados conforme a las normas técnicas peruanas. Se realizó una prueba de análisis de varianza y comparaciones múltiples de Tukey para comprobar la existencia de diferencias significativas entre las tres posiciones radiales, así como para conocer los patrones de variación radial desde la médula a la corteza. En general, los hallazgos del estudio sugieren un muy bajo grado de variación radial de las propiedades físicas y mecánicas de *A. leiocarpa*, que puede estar influenciado por el lento crecimiento de la especie y, en consecuencia, por la baja proporción de madera juvenil. Esto indica que la madera aserrada obtenida de la región posterior a la médula posee una calidad muy semejante a la madera más intermedia o cercana a la corteza.

Palabras clave: Madera juvenil, densidad básica, MOR, MOE, variación dentro del árbol.

ABSTRACT

Studies of radial variation of wood properties are important to know the difference in wood quality from the innermost zone to the outermost zone of the tree stems, allowing also to infer the difference in wood quality between young trees of smaller diameter and old trees of larger diameter. This has repercussions on the improvement of the quality of products and the adequate use of wood obtained from different parts of the logs or from tree logs of different diameters of the same species. In this context, the study aimed to evaluate the radial variation of the physical and mechanical properties of the wood of *Apuleia leiocarpa*, in Tambopata - department of Madre de Dios. Four *A. leiocarpa* trees were sampled from a non-timber concession in Madre de Dios, Peru, from which specimens were prepared from the innermost region, intermediate region, and outermost region of the trunk, for testing the physical and mechanical properties of the wood, with two replicates per test per tree. The tests were carried out in accordance with Peruvian technical standards. Analysis of variance and tukey's multiple comparisons were performed to test for significant differences between the three radial positions, as well as to determine the patterns of radial variation from the pith to the bark. In general, the findings of the study suggest a very low degree of radial variation in the physical and mechanical properties of *A. leiocarpa*, which may be influenced by the slow growth of the species and consequently by the low proportion of juvenile wood. This indicates that the sawn wood obtained from the region after the pith has a quality very similar to the more intermediate or near-bark wood.

Key words: juvenile wood, basic density, MOR, MOE, within-tree variation.

RST-RI_Variación radial de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de Apuleia leiocarpa, Tambopata - Madre de Dios

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%
INDICE DE SIMILITUD

14%
FUENTES DE INTERNET

6%
PUBLICACIONES

4%
TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1 repositorio.unamad.edu.pe 9%
Fuente de Internet

2 hdl.handle.net 1%
Fuente de Internet

3 repositorio.unach.edu.pe 1%
Fuente de Internet

4 repositorio.unc.edu.pe 1%
Fuente de Internet

5 dokumen.site 1%
Fuente de Internet

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Activo

PRESENTACIÓN

El presente trabajo de tesis fue desarrollado como parte del proceso de formación académica y científica para obtener el título profesional de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. Sobre la variación radial en las propiedades físicas y químicas de los recursos forestales, se conoce que existen diferencias sustanciales entre la madera de la región más interna y la más externa de la sección transversal. Asimismo, la madera de árboles jóvenes puede ser muy distinta de la madera de árboles más viejos, en una misma especie. Diversos estudios en especies de plantaciones forestales nos muestran la existencia de una alta variabilidad de las propiedades de la madera dentro de un mismo árbol. Para una mejor calidad de los productos forestales maderables, es deseable que la madera sea homogénea en sus propiedades físicas y mecánicas desde la parte más interna a la parte más externa, es decir, es importante conocer la variación radial de las propiedades de la madera. Sin embargo, no se conoce esta variación en la mayoría de las especies nativas tropicales.

La presente investigación de tesis busca aportar nuevos conocimientos sobre cómo varían la densidad, la contracción, el contenido de humedad y las propiedades mecánicas a lo largo de la sección transversal en árboles de *Apuleia leiocarpa*, una especie comercial de alto valor en los bosques amazónicos.

La tesis describe el problema de estudio, marco teórico, métodos y materiales, a seguir para el adecuado desarrollo de la investigación.

INTRODUCCIÓN

La densidad es la propiedad física más importante que afecta la calidad de la madera (Wilkins y Horne 1991). Las propiedades mecánicas, tales como la dureza, resistencia a la compresión, tracción, entre otras, están relacionadas a la densidad de la madera (Bowyer, Shmulsky y Haygreen 2007). La madera puede tener diferentes características entre árboles de la misma especie y dentro de un mismo árbol (Zobel y van Buijtenen 1989), influenciada por diversos factores genéticos y ambientales. El conocimiento de la influencia relativa de estos factores es de importancia básica.

Dentro de los estudios tecnológicos de una determinada especie, debe considerarse la evaluación de los patrones de variación dentro del árbol (región más interna cercana a la médula a la región más externa cercana a la corteza), especialmente en árboles jóvenes con grandes proporciones de madera juvenil (Zobel y van Buijtenen 1989) para la obtención de un producto más homogéneo en sus propiedades físicas (Bowyer, Shmulsky y Haygreen 2007).

El estudio de la variación radial de las propiedades físicas y mecánicas de la madera consiste determinar los valores de estas propiedades en diferentes puntos del radio del tronco, es decir desde el leño más cercano a la médula y el leño más cercano a la corteza (Lachenbruch, Moore y Evans 2011a). Para esto, de la sección del diámetro a la altura del pecho (dap), se obtienen probetas de 4 radios del tronco en diferentes posiciones radiales de una cantidad representativa de árboles y se someten a los ensayos físicos y mecánicos para determinar su valor y construir el perfil de variación radial de una propiedad física o mecánica.

Sin embargo, hay poca información disponible sobre la variación radial de las propiedades de la madera de especies tropicales de bosques naturales de la Amazonía. Particularmente, no existen estudios de este tipo para *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F. Macbr, conocida comúnmente como Ana caspi.

Esta investigación tiene como finalidad proporcionar información sobre los patrones de variación de las propiedades físicas y mecánicas, dentro del árbol de *A. leiocarpa*, de bosques naturales de Madre de Dios.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

PRESENTACIÓN

INTRODUCCIÓN.....10

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN..... 1

1.1. Descripción del problema 1

1.2. Formulación del problema 2

1.3. Objetivos..... 3

1.4. Variables..... 3

1.5. Operacionalización de variables 4

1.6. Hipótesis: 5

1.7. Justificación 5

1.8. Consideraciones éticas..... 6

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO 7

2.1. Antecedentes de estudios 7

2.2.1. Densidad de la madera 9

2.2.2. Variación radial de las propiedades de la madera.....10

2.2.3. Madera juvenil en latifoliadas 11

2.3. Definición de términos 13

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN 14

3.1. Tipo de estudio 14

3.2. Diseño del estudio 14

3.3. Población y Muestra 14

3.3.1. Población	14
3.3.2. Muestra.....	15
3.4. Métodos y técnicas	16
3.4.1. Lugar de estudio	16
3.4.2. Procedimiento de extracción de muestras	16
3.4.3. Preparación de probetas para ensayos físicos y mecánicos, a diferentes posiciones radiales del fuste.....	16
3.4.4. Determinación de las propiedades físicas	21
Ensayos de densidad de la madera	21
Ensayos de contracción radial, tangencial y longitudinal de la madera..	22
3.4.5. Determinación de las propiedades mecánicas de la madera...	23
Ensayos de dureza.....	23
Ensayos de compresión paralela a las fibras	23
Ensayos de compresión perpendicular al grano.....	24
Ensayos de esfuerzo cortante paralelo a las fibras (cizallamiento)	25
Ensayos de tracción o tensión perpendicular al grano	26
Ensayos de flexión estática	27
3.4.6. Determinación de variación radial de las propiedades físicas y mecánicas	29
3.5. Tratamiento de los datos	30
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES	31
CONCLUSIONES	43
SUGERENCIAS.....	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Determinación del volumen por pesaje antes y después de la inmersión de la muestra (A), y por diferencia en el nivel de agua (lectura del cilindro antes y después de la inmersión (B). Fuente: (Bowyer, Shmulsky y Haygreen 2007)	10
<i>Figura 2.</i> Variación radial y longitudinal de la densidad en álamo amarillo. Fuente: (Bowyer, Shmulsky y Haygreen 2007).....	11
<i>Figura 3.</i> Zona de madera juvenil en el tronco que creció más allá del periodo juvenil. Fuente: (Yang, Benson y Wong 1986).....	11
<i>Figura 4.</i> Mapa base y de dispersión de árboles de <i>Apuleia leiocarpa</i> en la concesión de otros productos de bosque N° 17-TAM/C-OPB-J-205-03.	15
<i>Figura 5.</i> Método de corte de las probetas para ensayos físicos y mecánicos, en una rodaja de 41 cm de longitud. Posiciones radiales: 1-interna (0-25% del radio), 2-intermedia (35-60% del radio), y 3-externa (75-100% del radio)	17
<i>Figura 6.</i> Dimensiones de la probeta para los ensayos de dureza y los ensayos de compresión perpendicular al grano. Fuente: Elaboración propia.	18
<i>Figura 7.</i> Dimensiones de la probeta para los ensayos de compresión paralela al grano. Fuente: Elaboración propia.	18
<i>Figura 8.</i> Dimensiones de la probeta para los ensayos de tracción o tensión perpendicular al grano. Fuente: (INACAL 2015b).....	19
<i>Figura 9.</i> Dimensiones de la probeta para los ensayos de flexión estática. Fuente: Elaboración propia.....	19
<i>Figura 10.</i> Dimensiones de la probeta para los ensayos de cizallamiento en dirección radial y tangencial. Fuente: (Salvador 2010).	20
<i>Figura 11.</i> Determinación del volumen húmedo mediante el método de inmersión en agua. Extraído de la Norma Técnica Peruana NTP 251.011 (INACAL 2014c).....	21
<i>Figura 12.</i> Accesorios de la máquina de ensayos universales y la colocación de la probeta para ensayo de dureza. Fuente: INACAL (2014c).	23
<i>Figura 13.</i> Colocación de la probeta para ensayo de compresión perpendicular al grano.	25
<i>Figura 14.</i> Colocación de la probeta para ensayo de cizallamiento. Fuente: INACAL (2017).....	26
<i>Figura 15.</i> Ensayo de tracción o tensión perpendicular al grano. Fuente: (INACAL 2015b).....	27
<i>Figura 16.</i> Ensayo de flexión estática. Fuente: (INACAL 2014e).....	27
<i>Figura 17.</i> Ejemplo de variación radial de la contracción tangencial.....	29
<i>Figura 18.</i> Interacciones de posición radial × árbol, de las propiedades físicas de la madera de árboles de <i>Apuleia leiocarpa</i>	32

<i>Figura 19. Variación radial de la densidad básica de la madera de árboles de Apuleia leiocarpa. Las barras de bigotes indican la desviación estándar. ...</i>	33
<i>Figura 20. Variación radial del contenido de humedad (CH) máximo en porcentaje de la madera de árboles de Apuleia leiocarpa.</i>	33
<i>Figura 21. Variación radial de la contracción longitudinal, radial y tangencial de la madera de árboles de Apuleia leiocarpa.</i>	34
<i>Figura 22. Variación radial de la dureza de la madera en los extremos y lados de las probetas de la madera de árboles de Apuleia leiocarpa.</i>	35
<i>Figura 23. Variación radial de los esfuerzos a la flexión estática: Esfuerzo al límite proporcional (ELP), módulo de rotura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE) de la madera de árboles de Apuleia leiocarpa.</i>	36
<i>Figura 24. Variación radial de los esfuerzos a la compresión paralela a las fibras: Esfuerzo al límite proporcional (ELP), módulo de rotura (MR) y módulo de elasticidad (MOE), de la madera de árboles de Apuleia leiocarpa.</i>	37
<i>Figura 25. Variación radial del esfuerzo al límite proporcional (ELP) en compresión perpendicular a las fibras de la madera de árboles de Apuleia leiocarpa.</i>	38
<i>Figura 26. Variación radial del esfuerzo de tensión perpendicular a las fibras de la madera de árboles de Apuleia leiocarpa.</i>	38
<i>Figura 27. Variación radial del esfuerzo de cizallamiento de la madera de árboles de Apuleia leiocarpa.</i>	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de las variables.....	4
Tabla 2. Dimensiones de diámetro a la altura del pecho (dap), altura comercial y coordenadas UTM de los árboles muestreados de <i>Apuleia leiocarpa</i>	16
Tabla 3. Dimensiones y número de probetas por árbol para los diferentes ensayos físicos y mecánicos.....	20
Tabla 4. Valor <i>p</i> de los factores de posición radial, árbol, e interacción posición radial × árbol para cada propiedad física. Valores en negrita indican diferencia significativa (valor $p < 0,05$).	31
Tabla 5. Valor <i>p</i> de los factores de posición radial, árbol, e interacción posición radial × árbol, para cada propiedad mecánica. Valores en negrita indican diferencia significativa (valor $p < 0,05$).	34

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema

Las propiedades de la madera definen la calidad de los productos obtenidos de ella, así como su utilización; la mayoría de las investigaciones se han enfocado en estudiar las propiedades de la madera en algún punto dentro del tronco, sin considerar la variación de estas propiedades dentro del tronco. Investigaciones previas en coníferas (pinos) y algunas latifoliadas (eucaliptos), muestran que existe gran variación radial de la densidad, longitud de la fibra, y ángulo de las microfibrillas, aumentando a mayor edad de los árboles, es decir a mayor distancia de la médula (Lachenbruch, Moore y Evans 2011a).

La variación radial de las propiedades de la madera está relacionada con la formación de leño juvenil (leño formado durante los primeros años de vida) y leño adulto (leño formado en edades posteriores), con mejores propiedades a mayor edad de los árboles, es decir la madera de leño adulto presenta mejor calidad de la madera con propiedades más estables (Tomazello et al. 2008; Tomazello Filho 2006). Por tanto, el perfil de variación radial de las propiedades de la madera permite comparar la calidad de la madera de la región más interna con la región más externa, y en consecuencia conocer la diferencia de propiedades entre la madera de árboles jóvenes y árboles maduros.

La madera juvenil es en general de menor calidad que la madera adulta para usos estructurales (Bendtsen y Senft 2007), pero para otros productos como la pulpa de celulosa y papel, la mayor proporción de madera juvenil es una ventaja porque mejora la calidad de estos productos (Lachenbruch, Moore y Evans 2011a). En especies tropicales, la revisión realizada por Lachenbruch et al (2011a) muestra que existe muy poca información para especies de latifoliadas tropicales. Las investigaciones disponibles reportan valores generales de las

propiedades de la madera, pero no se conoce la variación dentro del árbol de estas propiedades.

A. leiocarpa, conocida comúnmente como Ana caspi, es una especie de alto valor comercial y representa altos volúmenes de producción y exportación de la Amazonía peruana (SERFOR 2016). La madera de *A. leiocarpa* es de densidad alta ($0,83 \text{ g cm}^{-3}$) con alta resistencia a esfuerzos mecánicos, adecuada para uso como parquet, durmientes, estructuras pesadas, mangos de herramientas, carrocerías, etc. (Chavesta 2005). La variación radial de sus propiedades físicas y mecánicas es desconocida.

En este contexto, el presente estudio en *A. leiocarpa* es importante para conocer la diferencia de la calidad entre la madera más interna (más joven) y la más externa (más adulta), que indirectamente permitirá conocer la variación entre la madera de árboles jóvenes y viejos. Esto repercutirá en la mejora de la calidad de productos y el uso adecuado de la madera obtenida de diferentes partes del tronco.

1.2. Formulación del problema

Problema general:

¿Cómo es la variación radial de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *A. leiocarpa* en los bosques de la provincia de Tambopata – Departamento de Madre de Dios?

Problemas específicos:

- ¿Cuál es el efecto de la posición radial en las propiedades físicas de la madera de *A. leiocarpa*?
- ¿Cómo es el perfil de variación radial de las propiedades físicas de la madera de *A. leiocarpa*?
- ¿Cuál es el efecto de la posición radial en las propiedades mecánicas de la madera de *A. leiocarpa*?
- ¿Cómo es el perfil de variación radial de las propiedades mecánicas de la madera de *A. leiocarpa*?

1.3. Objetivos

Objetivo General

Evaluar la variación radial de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *A. leiocarpa*, en Tambopata – departamento de Madre de Dios.

Objetivos Específicos

- Evaluar el efecto de la posición radial en las propiedades físicas de la madera de *A. leiocarpa*.
- Determinar el patrón de variación radial de las propiedades físicas de la madera de *A. leiocarpa*.
- Evaluar el efecto de la posición radial en las propiedades mecánicas de la madera de *A. leiocarpa*.
- Determinar el patrón de variación radial de las propiedades mecánicas de la madera de *A. leiocarpa*.

1.4. Variables

Variables independientes

- Posición radial

Variables dependientes:

- Propiedades físicas de la madera
- Propiedades mecánicas de la madera

1.5. Operacionalización de variables

Tabla 1. Operacionalización de las variables

	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida
Variables dependientes	Propiedades físicas de la madera				
	Son atributos o características propias de la madera asociados a su composición y estructura y que afectan su peso y volumen.	Es definido como la relación de la masa de madera con su volumen respectivo, la variación de las dimensiones de la madera, y el porcentaje de agua que contiene la madera.	Densidad básica de la madera	Masa o peso anhidro por unidad de volumen saturado.	g cm ⁻³
			Contracción radial y tangencial	Reducción de la longitud de una pieza de madera en su dirección radial, o en su dirección tangencial.	%
			Contenido de humedad máximo (CH% max)	Peso del agua en relación al peso seco.	%
	Propiedades mecánicas de la madera				
	Son atributos o características propias de la madera que ayudan a describir su dureza, resistencia, flexibilidad, durabilidad, entre otros, y así conocer la calidad de la madera.	Es la máxima fuerza o carga capaz de soportar una pieza de madera antes de producirse una rotura o falla	Esfuerzo a la compresión paralela a las fibras	Máxima fuerza o carga, aplicada paralelamente al grano, capaz de soportar una pieza de madera antes de producirse una rotura o falla.	N m ⁻²
			Esfuerzo a la compresión perpendicular a las fibras	Máxima fuerza o carga, aplicada perpendicularmente al grano, capaz de soportar una pieza de madera antes de producirse una rotura o falla.	N m ⁻²
			Resistencia a la tracción perpendicular al grano	Esfuerzo de la madera a las fuerzas que actúan perpendicularmente al grano que tienden a alargar o dividir la pieza.	N m ⁻²
			Resistencia a la flexión estática: MOR, MOE	Esfuerzo a las fuerzas que tienden a curvar una viga.	kg cm ⁻²
			Esfuerzo a la dureza	Fuerza requerida para incrustar una bola de acero de 11,28 mm en la madera.	N m ⁻²
			Cizallamiento	Esfuerzo a la separación (fuerza de corte) de una sección de la pieza, en el plano longitudinal.	kg cm ⁻²
Variables independientes	Posición radial				
	Es la distancia a la médula de un punto del radio de la sección transversal, expresado en porcentaje con respecto a la longitud del radio.	$\text{Posición radial} = \frac{\text{Distancia a la médula}}{\text{radio de la sección transversal}} \times 100\%$	Interna	Probeta extraída entre el 0 al 25% del radio	%
			Intermedia	Probeta extraída entre el 35 al 60% del radio	%
			Externa	Probeta extraída entre el 75 al 100% del radio	%

1.6. Hipótesis:

Hipótesis general:

La madera de *A. leiocarpa* presenta variación radial significativa de las propiedades físicas y mecánicas, las cuales mejoran o incrementan desde la médula a la corteza.

Hipótesis específicas:

H1: Existe efecto significativo de la posición radial en las propiedades físicas de la madera de *A. leiocarpa*.

H2: La variación radial de las propiedades físicas de la madera de *A. leiocarpa*, sigue un patrón de incremento desde la médula hacia la corteza.

H3: Existe efecto significativo de la posición radial en las propiedades mecánicas de la madera de *A. leiocarpa*.

H4: La variación radial de las propiedades mecánicas de la madera de *A. leiocarpa*, sigue un patrón de incremento desde la médula hacia la corteza.

1.7. Justificación

No existe información publicada y accesible sobre el estudio de la variación radial de las propiedades de la madera. Las investigaciones existentes principalmente fueron dirigidas a hallar las propiedades de la madera del tronco como un todo, y no se han considerado las diferencias de las propiedades físicas y mecánicas a lo largo de la sección transversal del fuste.

Considerando que en general el diámetro de los árboles está relacionado con su edad, resulta útil conocer las diferencias en la calidad de la madera entre árboles jóvenes (representados por la madera próxima a la médula) y árboles maduros (representados por la madera próxima a la corteza). Estas diferencias pueden conocerse a través de estudios de la variación radial de las propiedades de la madera.

La variación radial de la madera condiciona el uso de la madera para ciertos fines estructurales; por tanto, es importante conocer el grado y patrón de variación. Además, los resultados del estudio se pueden aplicar para pronosticar la calidad de la madera en

proyectos de reforestación y plantaciones forestales de *A. leiocarpa* donde se cosecha en turnos más cortos.

En este contexto, la investigación aportará información importante para los manejadores de bosques y reforestadores porque permitirá conocer la diferencia de calidad entre la madera más interna (edad juvenil) y la más externa (edad madura) para la toma de decisiones en el manejo forestal y la transformación de la madera. Además, los resultados servirán para mejorar el muestreo de madera en estudios tecnológicos y como fuente de información para estudios sobre la heterogeneidad de la madera, así como la creación de modelos de variación radial y longitudinal de las especies forestales tropicales del Perú.

1.8. Consideraciones éticas

La muestra correspondió a árboles apeados durante la zafra 2022 de la Concesión de otros productos del bosque N° 17-TAM/C-OPB-J-205-03, administrado por el Sr. Justo Montaña Ávila. Las actividades realizadas no generaron impactos negativos adicionales. El Sr. Justo Montaña autorizó el estudio y la cesión de 4 árboles para muestreo destructivo.

Durante la extracción de muestras de los árboles, los tesisistas y ayudantes utilizaron los equipos de protección personal para evitar accidentes y daños físicos.

Los tesisistas declaran que la investigación es original y se basó en la búsqueda del conocimiento y la verdad sobre los problemas de investigación planteados. Se respetaron las pautas indicadas en el Reglamento de grados y títulos de la UNAMAD vigente, y se mantuvo una conducta responsable en investigación según el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica – CONCYTEC.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudios

2.1.1. Antecedentes internacionales

Diversos estudios realizados en múltiples especies han demostrado que las propiedades de la madera presentan variaciones tanto en el sentido radial como longitudinal del fuste (Lachenbruch, Moore y Evans 2011b). Estas investigaciones se han enfocado principalmente en especies establecidas en plantaciones forestales, tales como *Eucalyptus* spp., *Tectona grandis* y *Pinus* spp. En el caso de *Eucalyptus grandis*, la variación radial de la densidad se describe por valores elevados en la zona cercana a la médula, seguidos de una disminución marcada y posteriormente un incremento progresivo, alcanzando mayores valores hacia la corteza (Franco 2014). Por su parte, en *Tectona grandis* y *Pinus caribaea*, la densidad aumenta desde la médula y tiende a estabilizarse en el leño adyacente a la corteza (Castro 2011). De manera similar, la anatomía de la madera muestra cambios significativos a lo largo del radio del tronco; por ejemplo, en especies de eucalipto, la madera próxima a la médula se caracteriza por presentar vasos de menor tamaño pero mayor frecuencia, mientras que hacia la corteza predominan vasos de mayor diámetro y menor abundancia (Silva, Filho y Oliveira 2007; Júnior et al. 2009; Chambi-Legoas 2016; Tomazello Filho 2006). Asimismo, se observa una tendencia al incremento de la longitud de las fibras en dirección radial (Kojima et al. 2009). Estas variaciones se asocian al proceso de transición entre leño juvenil y leño adulto, dado que numerosas propiedades de la madera mejoran con la edad del árbol y, en el leño adulto, tienden a mantenerse estables sin variaciones radiales relevantes (Tomazello et al. 2008; Tomazello Filho 2006).

La variabilidad radial de las propiedades influye directamente en la calidad de la madera, principalmente por la proporción relativa de leño juvenil y leño adulto presente en el fuste (Lachenbruch, Moore y Evans 2011a). En términos generales, el leño juvenil presenta un desempeño inferior al del leño adulto en aplicaciones estructurales, debido a su menor

densidad y al mayor ángulo de las microfibrillas, características que se traducen en valores reducidos de módulo de elasticidad y resistencia a la flexión (Bendtsen y Senft 2007), además de una mayor contracción dimensional. No obstante, para determinados usos, una elevada proporción de madera juvenil puede resultar beneficiosa; por ejemplo, se ha reportado una mejor calidad del papel obtenido a partir de árboles con altos contenidos de leño juvenil (Lachenbruch, Moore y Evans 2011a).

2.1.2. Antecedentes nacionales

En el caso de especies tropicales, la revisión presentada por Lachenbruch et al (2011a) indica que la información disponible para latifoliadas tropicales sigue siendo limitada. No obstante, los estudios desarrollados en latifoliadas de otras regiones geográficas sugieren que la variabilidad de las propiedades de la madera es considerablemente menor en comparación con la observada en coníferas. En particular, para especies tropicales procedentes de bosques naturales del Perú, la literatura científica accesible sobre la variación intratroncal de las propiedades de la madera es escasa. La mayoría de las investigaciones realizadas hasta el momento se han centrado en la caracterización de las propiedades de la madera considerando el tronco de manera integral, sin analizar detalladamente su variación interna.

De entre los pocos estudios en especies amazónicas tenemos que en *Calycophyllum spruceanum* “capirona” de bosques de Ucayali, la longitud de fibras, espesor de pared celular, y diámetro de vasos aumentó significativamente desde la médula hacia la corteza. En contraste, la frecuencia de vasos por mm² disminuyó (Gálvez et al. 2020).

Las especies forestales comerciales más abundantes y más aprovechadas son especies de densidad alta, como *A. leiocarpa* (MINAGRI, 2014) conocido como Ana caspi; esta especie posee una densidad alrededor de 0,83 g cm⁻³ (Chavesta 2005), valiosa por sus excelentes propiedades para uso en parquet, pisos, durmientes, columnas, etc.

2.1.3. Antecedentes locales

El único estudio reportado en Madre de Dios muestra la variación radial de las propiedades físicas en *Hymenaea courbaril* de 10 árboles muestreados en Tahuamanu. Se evaluaron 3 posiciones radiales: cercano a la médula, zona intermedia, y cercano a la corteza, encontrando que el contenido de humedad, densidad y contracción de la madera variaron significativamente en las tres posiciones radiales. La densidad básica de la madera y la contracción tangencial y radial presentaron un patrón de reducción desde la médula a la corteza (Alderete Villarroel 2018).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Densidad de la madera

Es la propiedad más importante de la madera, porque está relacionada con la calidad y uso de la madera. La densidad de la madera se correlaciona con la mayoría de las propiedades físicas y mecánicas; por ejemplo, la dureza y rigidez aumenta con la densidad de la madera (Bowyer, Shmulsky y Haygreen 2007); por otra parte, también es un parámetro de indicación del potencial de la madera para la calidad del papel y rendimiento de la pulpa (Miranda, Almeida y Pereira 2001).

Según Bowyer et al. (2007), la organización celular de la madera es responsable de muchas de sus características distintivas. La densidad del material que conforma la pared celular es cercana a $1\,520\text{ kg m}^{-3}$, y se relaciona de manera inversa con la porosidad, entendida como la proporción de volumen correspondiente a espacios vacíos.

La densidad de la madera se define como la masa por unidad de volumen, expresada en g por cm^3 o kg por m^3 , mientras que la gravedad específica es la relación entre la densidad de la madera y la del agua. La densidad y la gravedad específica tienen el mismo valor numérico, sin embargo, la gravedad específica es adimensional (Bowyer, Shmulsky y Haygreen 2007).

La densidad de la madera se determina a un cierto contenido de humedad de la madera (CH), debido a que cambios en la humedad de la madera afecta su masa y volumen (Walker 2006). Por tanto, la densidad con un $\text{CH}=0\%$ se denomina densidad anhidra, la densidad con un $\text{CH}=12\%$ se denomina densidad aparente (Vignote Peña y Martínez Rojas 2006). El tipo más usado para la densidad de la madera, es la densidad básica, que expresa la masa anhidra por unidad de volumen saturado también llamado volumen verde (Walker 2006), según la ecuación (1):

$$\text{Densidad básica} = \frac{\text{Masa seca al horno}}{\text{Volumen en estado verde}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

El volumen puede determinarse mediante el método de inmersión en agua, ya sea calculándolo a partir de la diferencia de peso entre un recipiente con agua sin la muestra y el mismo recipiente con la muestra sumergida (Figura 1A), o bien a partir de la variación en la lectura del nivel del agua antes y después de introducir la muestra en un cilindro graduado con agua (Figura 1B) (Bowyer, Shmulsky y Haygreen 2007).

En términos generales, la densidad básica de la madera presenta una relación inversa con el contenido de humedad; de este modo, a mayores valores de densidad en estado verde corresponden menores valores de densidad básica. En otras palabras, un material con baja densidad básica suele caracterizarse por un alto contenido de humedad, y viceversa (Walker 2006).

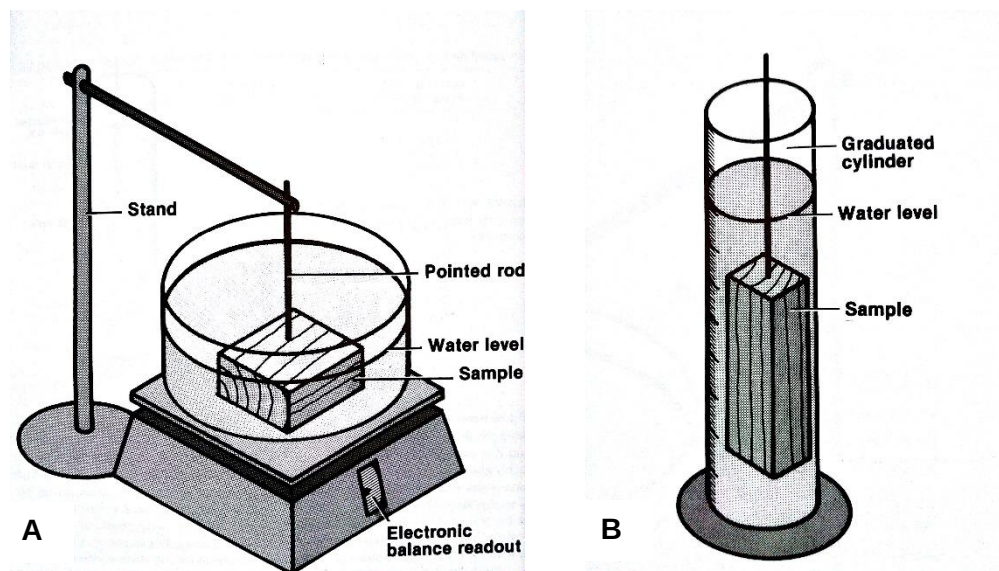


Figura 1. Determinación del volumen por pesaje antes y después de la inmersión de la muestra (A), y por diferencia en el nivel de agua (lectura del cilindro antes y después de la inmersión (B)). Fuente: (Bowyer, Shmulsky y Haygreen 2007)

2.2.2. Variación radial de las propiedades de la madera

En las latifoliadas se han identificado diversos patrones de variación radial de la densidad desde la médula hacia la corteza. En algunas especies, como *Swietenia macrophylla*, entre otras, se observa un aumento progresivo de la densidad en dirección radial, desde la zona medular hacia el exterior del tronco (Zobel y van Buijtenen 1989). En plantaciones comerciales de corto ciclo, como los eucaliptos, la densidad de la madera incrementa desde la médula y decrece levemente para volver a incrementar sostenidamente hasta cerca de la corteza (Chambi-Legoas 2016; Castro 2014). Sin embargo, dependiendo de la especie de latifoliada, el patrón de variación radial de la densidad es diferente. En la Figura 2, se muestra un modelo de variación de la densidad de la madera en dos dimensiones.

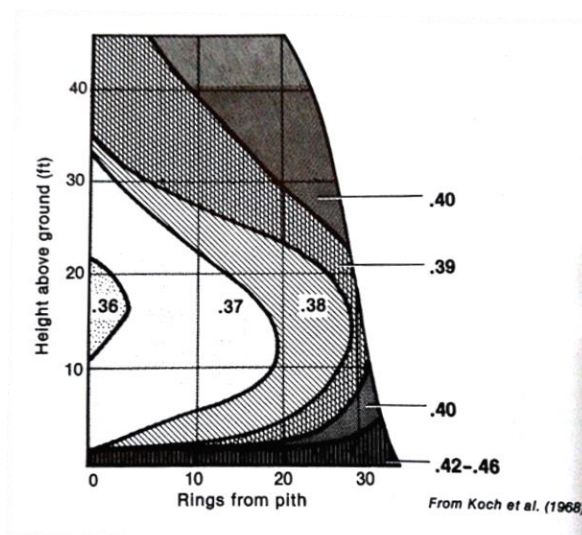


Figura 2. Variación radial y longitudinal de la densidad en álamo amarillo. Fuente: (Bowyer, Shmulsky y Haygreen 2007)

2.2.3. Madera juvenil en latifoliadas

La madera juvenil es la primera madera formada en un árbol joven; esta madera comprende los anillos de crecimiento más cercanos a la médula (Wiedenhoeft 2012). El ancho de la madera juvenil decrece hacia la parte superior de la copa del árbol; el ancho puede ser afectado por condiciones medioambientales y es el resultado del proceso de envejecimiento de las células cambiales iniciales (Yang, Benson y Wong 1986). Las células cambiales iniciales más maduras producen madera juvenil durante un número de años que las células cambiales iniciales más jóvenes. Como resultado, se forma una zona de madera juvenil cónica que se estrecha a partir de la base a la copa del árbol (Figura 3) (Bowyer, Shmulsky y Haygreen 2007).

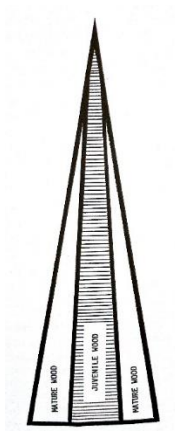


Figura 3. Zona de madera juvenil en el tronco que creció más allá del periodo juvenil. Fuente: (Yang, Benson y Wong 1986).

La madera juvenil es de menor calidad que la madera madura. Las células de la madera juvenil son más cortas que las células de la madera madura; en latifoliadas las fibras de madera madura pueden tener el doble de longitud que las fibras de madera juvenil cercanas a la médula (DeBell et al. 2002).

La proporción de madera juvenil es una variable que afecta fuertemente las propiedades físicas y mecánicas de la madera. A un mismo dap, árboles de rápido crecimiento tendrán mayor proporción de madera juvenil comparados con árboles de lento crecimiento, por tanto, en las especies de rápido crecimiento la madera más interna será de menor calidad que la madera más externa, observándose un perfil de variación radial creciente.

2.3. Definición de términos

Diámetro a la altura del pecho (dap): Es el diámetro del árbol medido a 1,3 m de altura desde el suelo; constituye el estándar de medición del diámetro a nivel mundial por la practicidad de su medición. Puede medirse directamente con una forcípula u obtenerse mediante la circunferencia medida con una cinta métrica o diamétrica.

Crecimiento: Es el incremento en el tamaño del diámetro, altura, volumen u otro atributo del árbol o del rodal, por unidad de tiempo (Pretzsch 2009). El crecimiento normalmente se puede expresar con incremento corriente anual, es decir, el crecimiento en un año particular, o como incremento medio anual, es decir, el crecimiento promedio anual hasta una determinada edad. Normalmente se expresa unidades de volumen (m^3 por ha por año).

Sección o plano transversal: De acuerdo a Wiedenhoef (2012), es la cara que se expone cuando se corta un árbol. Al mirar hacia abajo en el tocón, se ve la sección transversal. Cortar una tabla a través del grano expone la sección transversal. El plano transversal de la sección proporciona información sobre las características que varían tanto en la dirección de la médula a la corteza (llamada dirección radial) como también las que varían en la dirección circunferencial (llamada dirección tangencial).

Sección o plano longitudinal o axial: Según Wiedenhoef (2012), es la cara paralela al eje axial del tronco, perpendicular a la sección transversal. En una tabla, las 4 caras de los lados representan planos longitudinales. La sección o plano longitudinal proporciona información sobre los cambios longitudinales en el tronco. El plano longitudinal puede ser de dos tipos: plano longitudinal radial y plano longitudinal tangencial.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de estudio

La investigación fue del tipo observacional, no experimental, porque implicó la observación y medición de un factor natural (posición radial en el fuste) para evaluar su efecto sobre propiedades físicas y mecánicas de la madera (Hernández Escobar et al. 2018). Según su finalidad, la investigación fue del tipo básica, porque los resultados sirven como información básica para el desarrollo de procesos, técnicas y tecnologías de transformación de la madera (Behar Rivero 2008).

3.2. Diseño del estudio

El estudio tuvo un diseño de bloques completos al azar. El factor de tratamiento fue la posición radial:

- Posición interna (0-25% del radio): Corresponde a la región más cercana a la médula.
- Posición intermedia (35-60% del radio): Corresponde a la región intermedia entre la médula y la corteza.
- Posición externa (75-100% del radio): Corresponde a la región más cerca de la corteza.

El factor de bloque fue la variable árbol (04 individuos).

3.3. Población y Muestra

3.3.1. Población

La población está conformada por el número total de árboles aprovechables (dap > 41 cm) de *A. leiocarpa* de la Concesión de otros productos de bosque N° 17-TAM/C-OPB-J-205-03, de aproximadamente 13 árboles, según el Plan operativo (Figura 4).

Tabla 2. Dimensiones de diámetro a la altura del pecho (dap), altura comercial y coordenadas UTM de los árboles muestreados de *Apuleia leiocarpa*.

Árbol	dap (m)	Altura comercial (m)	Coordenadas UTM	
			Este	Norte
1	0,75	18	512183	8655050
2	1,10	14	512234	8655054
3	1,10	17	512094	8655221
4	0,97	18	511075	8654955

3.4. Métodos y técnicas

3.4.1. Lugar de estudio

El lugar de estudio abarcó los bosques naturales de la Concesión de otros productos de bosque N° 17-TAM/C-OPB-J-205-03, situada en el distrito de Tambopata, provincia de Las Piedras, departamento de Madre de Dios (Figura 4); la zona es de clima húmedo tropical, con temperatura media anual entre 22°C y 24°C y precipitación acumulada anual entre 2200 y 3000 milímetros (GOREMAD 2010). El área muestreada tiene una extensión de 216,6 ha, se encuentra entre las latitudes 8 653 400 y 8 656 100 N, y entre las longitudes 510 400 y 513 800 E. En el área se han registrado 13 árboles de *A. leiocarpa* y otras especies comerciales.

3.4.2. Procedimiento de extracción de muestras

Se extrajeron rodajas de 41 cm de longitud a la altura del dap de 4 árboles de *A. leiocarpa* (1 rodaja por árbol). Los árboles de la muestra correspondieron a los de mayor diámetro y sin defectos de pudrición del duramen. Previamente se midió el dap, la altura del fuste y la altura total de los árboles.

3.4.3. Preparación de probetas para ensayos físicos y mecánicos, a diferentes posiciones radiales del fuste

La preparación de probetas se realizó en los laboratorios de Tecnología de la Madera de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.

Los cuerpos de prueba o probetas para ensayos mecánicos fueron preparados a partir de las rodajas transversales colectadas, y para cada ensayo físico o mecánico a realizar.

Para esto, primero se cortaron 4 tablones radiales de 8 cm de espesor de cada rodaja, empleando el método cruciforme (Figura 5). A partir de estos tablones se cortaron las

probetas en 3 posiciones radiales: 1-interna (0-25% del radio), 2-intermedia (35-60% del radio) y 3-externa (75-100% del radio).

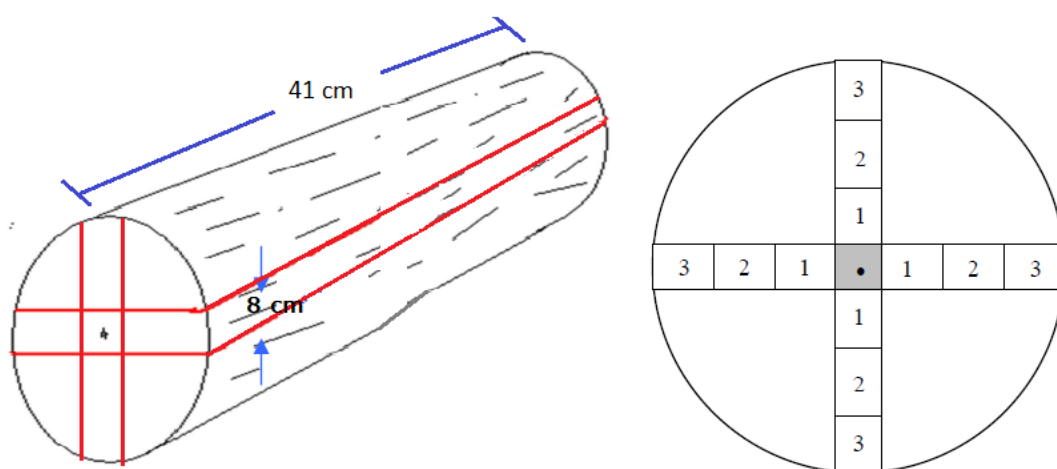


Figura 5. Método de corte de las probetas para ensayos físicos y mecánicos, en una rodaja de 41 cm de longitud. Posiciones radiales: 1-interna (0-25% del radio), 2-intermedia (35-60% del radio), y 3-externa (75-100% del radio)

Para la evaluación de la densidad básica y contracción de la madera, se cortaron probetas de 2,5 cm × 2,5 cm × 10 cm. Las probetas para contracción se cortaron en dirección radial, es decir, el eje longitudinal de la probeta fue paralelo a la fibra, con dos caras opuestas tangenciales a los anillos de crecimiento, y consecuentemente las otras dos caras tienen superficies radiales.

Para los ensayos de dureza se prepararon probetas de 5 cm × 5 cm de sección transversal y 15 cm de longitud, orientadas de tal manera que las caras fueron paralelas al grano y una de las caras paralela también a los anillos de crecimiento (Figura 6) (INACAL 2014d).

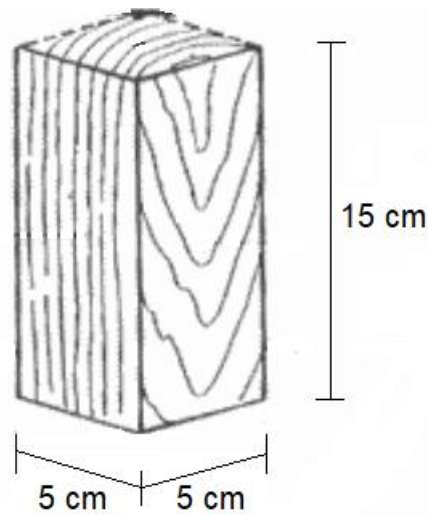


Figura 6. Dimensiones de la probeta para los ensayos de dureza y los ensayos de compresión perpendicular al grano. Fuente: Elaboración propia.

Las dimensiones de las probetas de compresión perpendicular al grano fueron de 5 cm $\times$ 5 cm $\times$ 15 cm (Figura 6), y las probetas de compresión paralela al grano fueron de 5 cm $\times$ 5 cm $\times$ 20 cm (Figura 7),

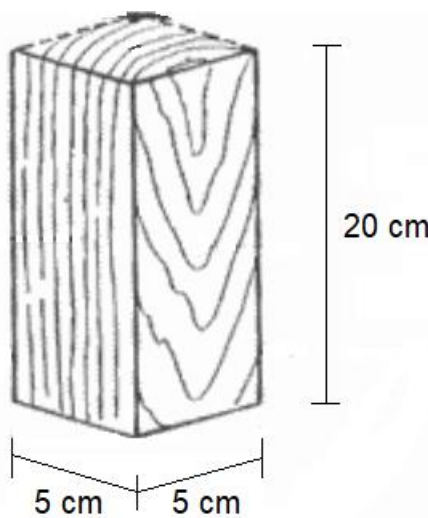


Figura 7. Dimensiones de la probeta para los ensayos de compresión paralela al grano. Fuente: Elaboración propia.

Las probetas de tensión perpendicular al grano fueron de 5 cm $\times$ 5 cm $\times$ 6,3 cm (Figura 8).

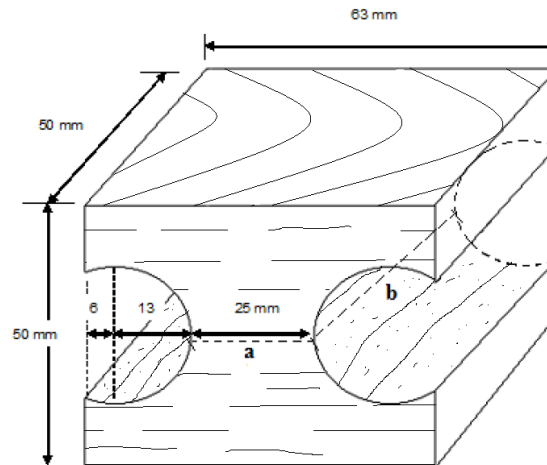


Figura 8. Dimensiones de la probeta para los ensayos de tracción o tensión perpendicular al grano. Fuente: (INACAL 2015b)

Para los ensayos de flexión estática, las probetas fueron de 2,5 cm $\times$ 2,5 cm $\times$ 41 cm (Figura 9).

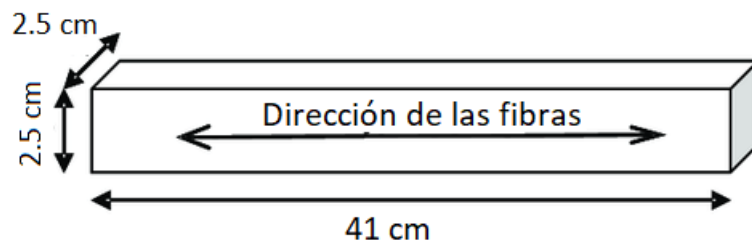


Figura 9. Dimensiones de la probeta para los ensayos de flexión estática. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para los ensayos de cizallamiento se cortaron probetas de 5 cm $\times$ 5 cm $\times$ 6,3 cm. Se realizó un rebaje de la probeta para la sujeción en la máquina de ensayos, por tanto, el área de aplicación del esfuerzo fue de 2 cm $\times$ 5 cm (Figura 10). Los ensayos se realizaron en dirección tangencial y radial.

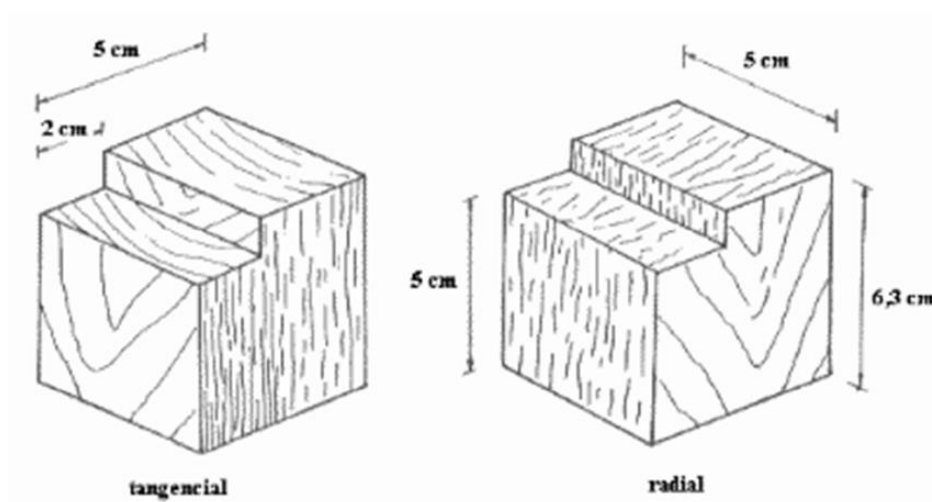


Figura 10. Dimensiones de la probeta para los ensayos de cizallamiento en dirección radial y tangencial. Fuente: (Salvador 2010).

Antes de los ensayos mecánicos, las probetas se secaron al aire libre durante 3 meses, alcanzando un contenido de humedad cercano a la humedad de equilibrio (16% CH). No obstante, durante los ensayos mecánicos se determinó también el CH% de las probetas.

En la Tabla 3 se muestra un resumen de los ensayos, dimensiones y cantidad de probetas por cada árbol.

Tabla 3. Dimensiones y número de probetas por árbol para los diferentes ensayos físicos y mecánicos.

Ensayo	Dimensiones de probetas (cm)	N° de probetas por árbol (3 posiciones × 2 repeticiones)	Total de probetas (04 árboles)
Densidad, contracción, y CH%	2,5 × 2,5 × 10	6	24
Dureza	5 × 5 × 15	6	24
Compresión paralela al grano	5 × 5 × 20	6	24
Compresión perpendicular al grano	5 × 5 × 15	6	24
Tracción perpendicular al grano	5 × 5 × 6,3	6	24
Flexión estática	2,5 × 2,5 × 41	6	24
Cizallamiento	5 × 5 × 15	6	24
Total		48	192

3.4.4. Determinación de las propiedades físicas

Ensayos de densidad de la madera

Los procedimientos para el cálculo de la densidad básica se realizaron conforme a la Norma Técnica Peruana NTP 251.011 (INACAL 2014c). Las probetas se sumergieron en un balde con agua durante 15 días o más, hasta su completa saturación (cuando la probeta no flota). Una vez saturadas las probetas, se pasaron por un trapo de tela rápidamente para retirar el exceso de agua y enseguida se determinó su volumen húmedo (V_h) mediante el método de inmersión en agua. En este método, la probeta se sumerge totalmente sin tocar el fondo del recipiente en un peso conocido de agua destilada y se registra el incremento de peso correspondiente, que representa el volumen de la probeta (Figura 11). Finalmente se determina la masa seca (M_s), para lo cual las probetas se secan en estufa durante 3 días, incrementando gradualmente la temperatura en los primeros días hasta alcanzar los $103 \pm 2^\circ\text{C}$. El peso de la probeta es registrado cada 12 horas; la muestra estará completamente seca ($\text{CH}\% = 0$) cuando el peso sea invariable. Las probetas se retiran de la estufa y se colocan por unas horas en una campana desecadora con silicagel para su enfriamiento y evitar la ganancia de humedad. Cuando las probetas estuvieron frías, se pesaron para determinar su masa seca (M_s). La densidad básica se calculó conforme a la fórmula (2):

$$DB = \left(\frac{M_s}{V_h} \right) \quad \dots\dots(2)$$



Figura 11. Determinación del volumen húmedo mediante el método de inmersión en agua. Extraído de la Norma Técnica Peruana NTP 251.011 (INACAL 2014c).

Ensayos de contracción radial, tangencial y longitudinal de la madera.

Los ensayos de contracción se realizaron siguiendo la norma NTP 251.012 (INACAL 2015a). Inicialmente las dimensiones se tomaron en estado húmedo, es decir, en estado completamente saturado. Se marcaron líneas diagonales en cada una de las caras de la probeta (02 caras radiales, 02 caras tangenciales y 02 caras transversales). Las mediciones se tomaron en los puntos de intersección de las diagonales para asegurarse de que todas las mediciones sean siempre en los mismos puntos.

La dimensión tangencial corresponde a la separación entre las intersecciones de las diagonales trazadas en las dos caras radiales, mientras que la dimensión radial se obtiene al medir la separación existente entre las intersecciones de las diagonales trazadas en las dos caras tangenciales. La dimensión longitudinal se obtuvo al medir la separación existente entre las intersecciones de las diagonales trazadas en las dos caras transversales.

Posteriormente, las probetas se secaron en estufa conforme a lo descrito en el ensayo de densidad básica. En estado anhidro, se vuelven a medir las dimensiones tangencial, radial y longitudinal.

La contracción tangencial, radial, o longitudinal del estado húmedo al estado seco anhidro se calculó mediante la fórmula (3) siguiente:

$$C_{12\%} = \frac{D_h - D_s}{D_h} \times 100 \quad \dots\dots (3)$$

Donde C_s es la contracción radial, tangencial o longitudinal en estado anhidro, respectivamente. D_h es la dimensión en estado húmedo. D_s es la dimensión en estado seco anhidro ($CH\% = 0$).

Ensayos de determinación del contenido de humedad máximo (CH% max)

El contenido de humedad (CH%) correspondió al contenido de humedad máximo (CH% max) siguiendo el procedimiento descrito en la Norma Técnica Peruana NTP 251.010.2014 (INACAL 2014b). De cada probeta se determinó su masa húmeda (m_h) y masa seca anhidra (m_s) (descritos en los ensayos de densidad y contracción) y el CH% max se calculó mediante la fórmula (4):

$$CH\% \max = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad \dots\dots (4)$$

3.4.5. Determinación de las propiedades mecánicas de la madera

Ensayos de dureza.

Los ensayos de dureza fueron realizados conforme al procedimiento descrito en la norma técnica peruana NTP 251.015 “Madera: Método de determinación de la dureza” (INACAL 2014d).

Para esto, se utilizó la Máquina de ensayos universales de la Universidad Nacional Agraria la Molina, en la ciudad de Lima, la cual es capaz de aplicar fuerzas mayores a 2 000 kg, provista de dos crucetas, una fija y una móvil, que posee un mecanismo que permite regular la velocidad lineal de la cruceta móvil.

El accesorio utilizado fue un cabezal diseñado específicamente para este ensayo, que consta de la parte inferior de una semiesfera metálica de 1,13 cm de diámetro y un anillo metálico. La semiesfera penetra en las caras de la probeta hasta el nivel máximo, anotándose el valor de la carga correspondiente a cada penetración (Figura 12).

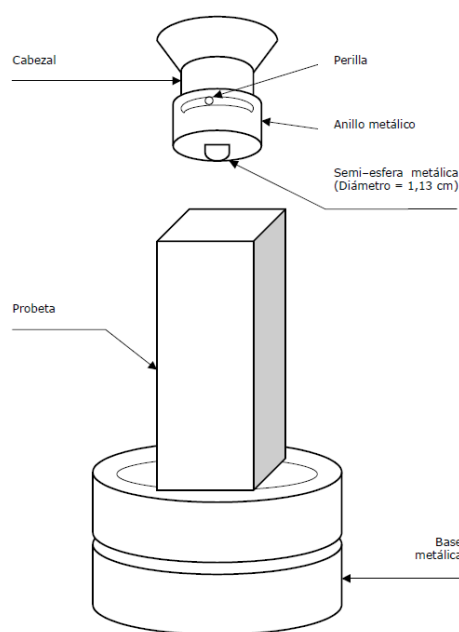


Figura 12. Accesorios de la máquina de ensayos universales y la colocación de la probeta para ensayo de dureza. Fuente: INACAL (2014c).

Ensayos de compresión paralela a las fibras

Los ensayos de compresión paralela a las fibras fueron realizados conforme al procedimiento descrito en la norma técnica peruana NTP 251.014: “Madera: Método para determinar la compresión axial o paralela al grano” (INACAL 2014a).

Antes de colocarse las muestras para el ensayo, se midieron y registraron las dimensiones iniciales de la probeta (lados y altura) tomadas en los extremos y en la zona central de las probetas.

Posteriormente, la carga se aplica sobre las bases de la probeta, es decir, sobre las cabezas transversales, de forma continua y durante todo el ensayo para que se produzca una deformación de 0,6 mm por segundo, hasta que se produzca la falla en la probeta, momento en que se registraron los valores de esfuerzo-deformación.

Con los valores de la carga y de la deformación, se trazó un gráfico sobre el cual se determina el punto F_u correspondiente al límite proporcional, es decir, el punto de inflexión. El esfuerzo último se calculó mediante la expresión (5):

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_s} \quad \dots\dots(5)$$

Donde σ_u es el esfuerzo último, F_u es la carga máxima, y A_s es el área de la sección transversal de la probeta.

Ensayos de compresión perpendicular al grano

En las condiciones de prueba, se aplica presión en una placa metálica (acero) de 5 cm × 5 cm de base y 5 cm de altura, que comprime a la madera en sentido perpendicular a las fibras, con una resistencia mucho mayor que la de la madera que se está probando. De esta forma, la madera tiende a colapsar, lo que ocurre cuando se supera su límite de elasticidad.

Antes de colocarse las muestras para el ensayo, se midieron y registraron las dimensiones iniciales de la probeta (lados y altura) tomadas en los extremos y en la zona central de las probetas.

Posteriormente, la carga se aplicó sobre las caras axiales de forma continua y durante todo el ensayo para que se produzca una deformación de 0,3 mm por minuto, hasta que se produzca la falla en la probeta, momento en que se registraron los valores de esfuerzo-deformación (Figura 13).

Con los valores de la carga y de la deformación, se trazó un gráfico sobre el cual se determinó el punto P' correspondiente a la carga en el límite proporcional, es decir, el punto de inflexión. El esfuerzo al límite proporcional (ELP) se calculó mediante la Ecuación 6.

$$ELP = \frac{P'}{S} \quad \dots (6)$$

Donde:

ELP: Esfuerzo al límite proporcional en kg cm^{-2} .

P': Carga en el límite proporcional en kg.

S: Es la superficie impresa sobre la probeta por la pieza de presión medida, en cm^2

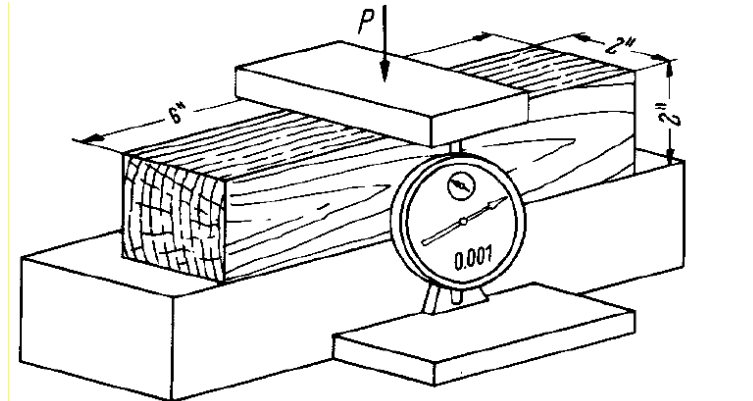


Figura 13. Colocación de la probeta para ensayo de compresión perpendicular al grano.

Ensayos de esfuerzo cortante paralelo a las fibras (cizallamiento)

Los ensayos de esfuerzo cortante paralelo a las fibras, más conocidos como ensayos de cizallamiento, consistieron en someter a la madera a esfuerzos que tienden a seccionarla o separarla de su bloque, en un plano ya sea en la dirección paralela o perpendicular a las fibras. El esfuerzo de corte es resistido básicamente por la sustancia cementante, es decir, la lignina. Se aplica la fuerza a la zona de la probeta que tiene una parte más corta, es decir, un rebaje, mientras la otra zona está bien fija (Figura 14).

El módulo de rotura de cizallamiento se calculó mediante la ecuación 7:

$$MOR = \frac{P}{A} \quad \dots (7)$$

Donde:

MOR: Módulo de rotura de cizallamiento en kg cm^{-2} .

P: Carga máxima en kg.

S: Es la superficie de la zona de cizallamiento en cm^2



Figura 14. Colocación de la probeta para ensayo de cizallamiento. Fuente: INACAL (2017).

Ensayos de tracción o tensión perpendicular al grano

Los ensayos de tracción o tensión perpendicular a las fibras serán realizados conforme al procedimiento descrito en la norma técnica peruana NTP 251.086:2015: “Maderas: Determinación de la tensión perpendicular a las fibras”(INACAL 2015b).

Para este ensayo, la dirección de las fibras debe estar perpendicular al sentido de la aplicación de las cargas a la probeta. Inicialmente se miden las dimensiones de la sección mínima “a” y “b” de las probetas (Figura 8) expresadas en milímetros. Se ubica la probeta en la mordaza y se centra correctamente, se aplica la carga progresivamente a una velocidad de 2,5 mm/min, hasta que la probeta falle (Figura 15).

La carga a la que se produjo la falla debe ser expresada en kg. El esfuerzo de tracción o tensión (ET) se expresa en kg cm^{-2} y se calcula con la formula (8):

$$ET = P/A \quad \dots\dots(8)$$

Donde:

P = Carga a la que se produjo la falla de la probeta en kg.

A = Área de la sección mínima (cm^2).

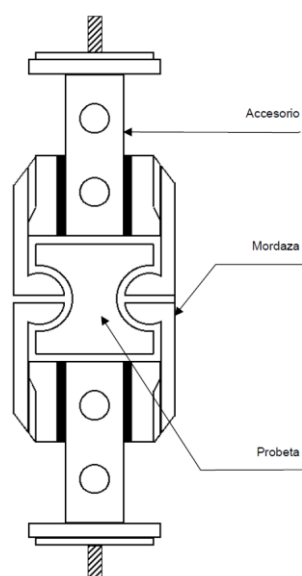


Figura 15. Ensayo de tracción o tensión perpendicular al grano. Fuente: (INACAL 2015b).

Ensayos de flexión estática

Los ensayos de flexión estática fueron realizados conforme al procedimiento descrito en la norma técnica peruana NTP 251.017:2015: “Maderas: Método para determinar la flexión estática” (INACAL 2014e).

Los accesorios para este ensayo se muestran en la Figura 16.

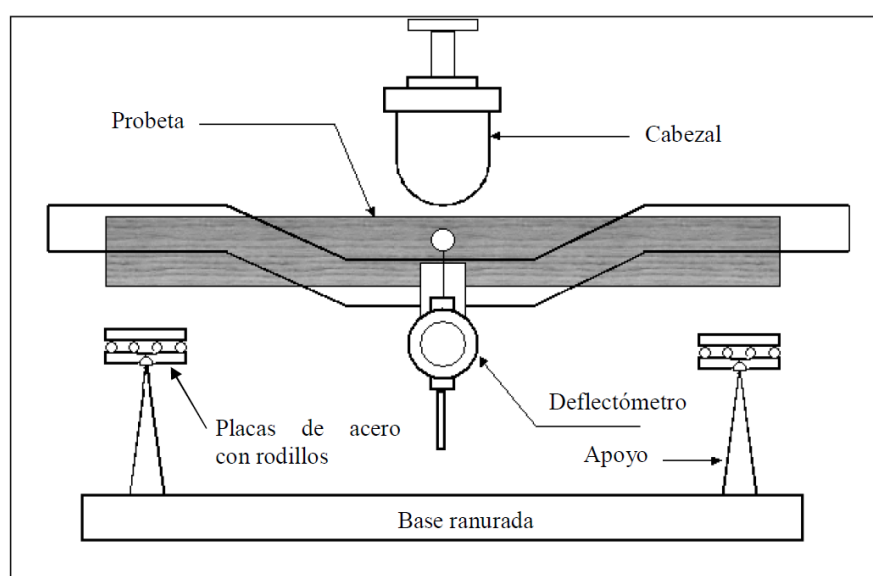


Figura 16. Ensayo de flexión estática. Fuente: (INACAL 2014e).

Se efectuó la ubicación del plano neutral, utilizándose cualquier método conveniente para determinar las deformaciones a partir de este plano.

La carga se aplicó en el centro de la muestra (distancia entre los soportes de 17,5 cm). Entre la probeta y los soportes, se colocaron las placas de acero con rodillos (Figura 16).

La carga se aplica a través del cabezal o bloque de carga, sobre la cara tangencial de la probeta más cercana a la médula. Se aplica la carga continuamente a la probeta con una velocidad constante de la cruceta móvil de la prensa de 1,3 mm/min para probetas de 2,5 cm × 2,5 cm × 41 cm.

Debido a que la prensa universal de ensayos mecánicos utilizada no disponía de dispositivos capaces de registrar automáticamente la carga aplicada y la deformación obtenida, se registraron manualmente las deflexiones producidas con intervalos de carga, de modo que las lecturas obtenidas permitieron trazar el gráfico de curva carga – deformación, para determinar el límite proporcional (P').

Para una mejor interpretación de los resultados, es necesario hacer una descripción de la forma en que se produce la rotura, dibujando esquemáticamente la falla en un formato de ensayo de flexión estática.

Los resultados se expresan mediante la carga al límite proporcional (P'), el esfuerzo de la fibra al límite proporcional (ELP), módulo de ruptura (MOR), y módulo de elasticidad (MOE).

P' se determina trazando una tangente desde cero y que corresponde al punto de carga donde la tangente se separa de la curva.

El ELP (esfuerzo de la fibra al límite proporcional en kg/cm²) se calculó según la ecuación 9.

$$ELP = \frac{3P'L}{2ae^2} \quad \dots\dots(9)$$

Donde:

P' : carga al límite proporcional en kg,

L : distancia entre soportes o luz de la probeta en cm,

a : ancho de la probeta en cm,

e : espesor de la probeta en cm.

El MOR (módulo de ruptura en kg/cm²) se calculó mediante la ecuación 10:

$$\text{MOR} = \frac{3PL}{2ae^2} \quad \dots\dots(10)$$

Donde:

P : carga máxima en kg.

L : distancia entre los soportes o la luz de la probeta en cm.

a : ancho de la probeta en cm.

e : espesor de la probeta en cm.

El MOE (módulo de elasticidad en kg/cm²), se calculó mediante la ecuación 11:

$$\text{MOE} = \frac{P'L^3}{4ae^3Y} \quad \dots\dots\dots(11)$$

Donde:

P' : carga al límite proporcional en kg.

L : distancia entre los soportes, luz de la probeta en cm.

a : ancho de la probeta en cm.

e : espesor de la probeta en cm.

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

3.4.6. Determinación de variación radial de las propiedades físicas y mecánicas

La magnitud de las propiedades físicas o mecánicas obtenidas de cada probeta fue graficada con la respectiva posición radial de la probeta (interna, intermedia, externa), generando el perfil de variación radial (Figura 17).

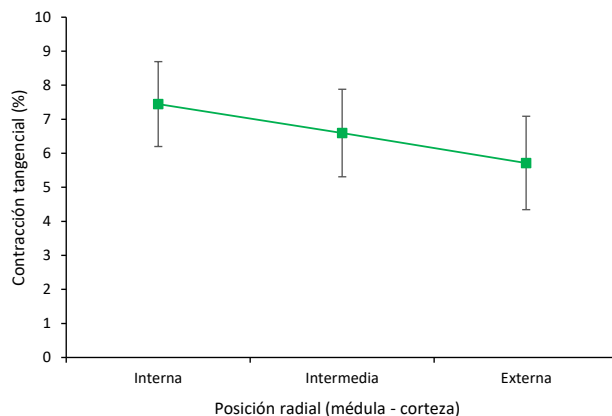


Figura 17. Ejemplo de variación radial de la contracción tangencial.

3.5. Tratamiento de los datos

Los datos fueron procesados en hojas de cálculo de Excel, y se construyó una base de datos de las propiedades físicas y propiedades mecánicas en cada posición radial y longitudinal del fuste. Los perfiles de variación radial se graficaron en el software Origin Lab 2019.

Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de Tukey para verificar la existencia de diferencias significativas entre las diferentes posiciones radiales en las propiedades físicas y mecánicas evaluadas, utilizando el software R Studio. Previamente se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas para todas las variables. Con el modelo ANOVA se evaluó el efecto de la posición radial en las propiedades físicas de la madera. El diseño experimental corresponde a un Diseño en Bloques Completos al Azar (DBCA), considerando como tratamientos las posiciones radiales y como bloques los árboles. Se incluyó la interacción entre tratamiento y bloque.

El modelo estadístico lineal aditivo fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \tau\beta_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

- Y_{ijk} : Valor observado de la propiedad física o mecánica de la madera en la i -ésima posición radial ($i = 1, 2, 3$), en el j -ésimo árbol ($j = 1, 2, 3, 4$), y la k -ésima repetición ($k = 1, 2$).
- μ : Media general.
- τ_i : Efecto del i -ésimo tratamiento (posición radial).
- β_j : Efecto del j -ésimo bloque (árbol).
- $\tau\beta_{ij}$: Efecto de la interacción entre el i -ésimo tratamiento y el j -ésimo bloque.
- ε_{ijk} : Error experimental asociado a la observación, asumido independiente y normalmente distribuido con media 0 y varianza σ^2 .

Se cumplen las siguientes restricciones: $\sum \tau_i = 0$, $\sum \beta_j = 0$, y $\sum \tau\beta_{ij} = 0$, para todo i y j .

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Efecto de la posición radial en las propiedades físicas de la madera

El análisis de varianza (ANOVA) indicó que la posición radial desde la médula a la corteza (interna, intermedia y externa) afectó significativamente algunas propiedades físicas de la madera, tales como el CH% máximo, la contracción radial y tangencial. En contraste, la densidad básica y la contracción longitudinal no fueron afectadas significativamente por la posición radial de la madera. Los valores *p* para el factor árbol indican que los cuatro árboles muestreados presentaron diferencias significativas en la densidad básica y el CH% máximo. Además, las interacciones posición radial × árbol fueron significativas para la variable contracción, sugiriendo que los efectos de la posición radial variaron según el árbol muestreado (Tabla 4 y Figura 18).

Tabla 4. Valor *p* de los factores de posición radial, árbol, e interacción posición radial × árbol para cada propiedad física. Valores en negrita indican diferencia significativa (valor *p* < 0,05).

Variable	Factores		
	Posición radial	Árbol	Posición radial × árbol
Densidad básica	0,127	0,003	0,071
Contenido de humedad máximo	0,025	0,016	0,072
Longitudinal	0,476	0,102	0,010
Contracción Radial	0,006	0,158	0,035
Tangencial	0,018	0,007	0,023

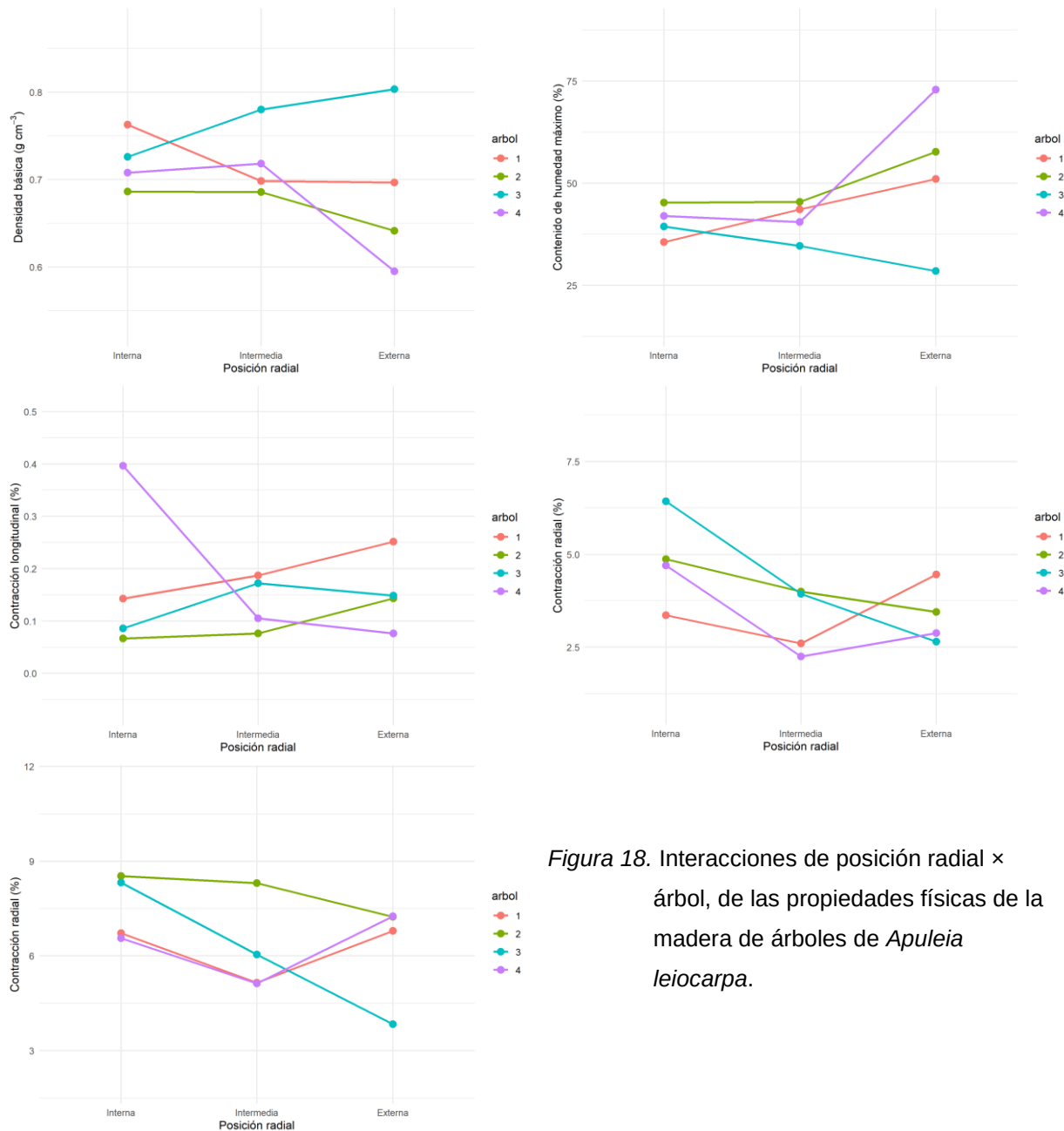


Figura 18. Interacciones de posición radial × árbol, de las propiedades físicas de la madera de árboles de *Apuleia leiocarpa*.

4.2. Patrón de variación radial de las propiedades físicas de la madera

La densidad básica de la madera no varió significativamente desde la médula a la corteza, con valores de 0,72 en la madera interna, 0,72 en la madera intermedia y 0,68 en la madera externa (Figura 19).

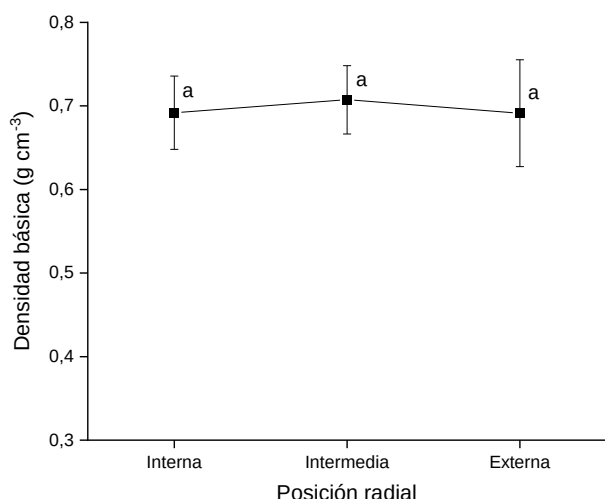


Figura 19. Variación radial de la densidad básica de la madera de árboles de *Apuleia leiocarpa*. Las barras de bigotes indican la desviación estándar.

Por otro lado, el CH% máximo fue significativamente mayor en la madera de la parte externa (52,6%), sin diferencias significativas entre la parte más interna (40,6%) e intermedia (40,7%) (Figura 20).

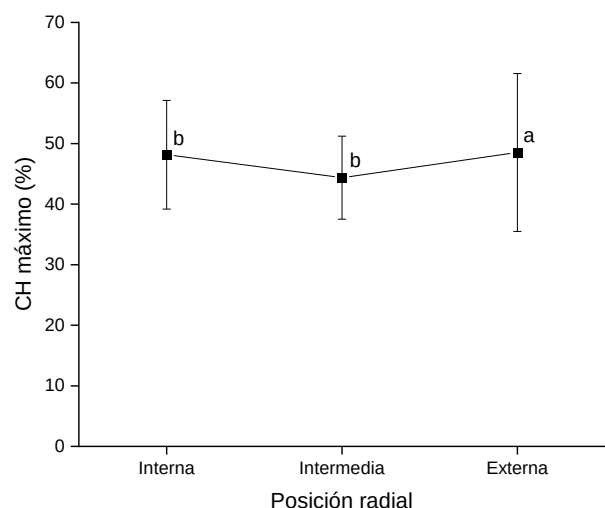


Figura 20. Variación radial del contenido de humedad (CH) máximo en porcentaje de la madera de árboles de *Apuleia leiocarpa*.

Respecto a la contracción de la madera, el perfil de variación radial mostró que existe una disminución de la contracción radial y tangencial a medida que la madera es más externa. No obstante, las diferencias de contracción radial y tangencial no fueron significativas entre la madera de la parte intermedia (3,3% y 6,2% respectivamente) y de la parte más externa (3,4% y 6,1% respectivamente); solo la madera más interna presentó contracción radial y tangencial significativamente superiores (4,8% y 7,5% respectivamente). En contraste, la contracción longitudinal no varió significativamente desde la médula a la corteza (Figura 21).

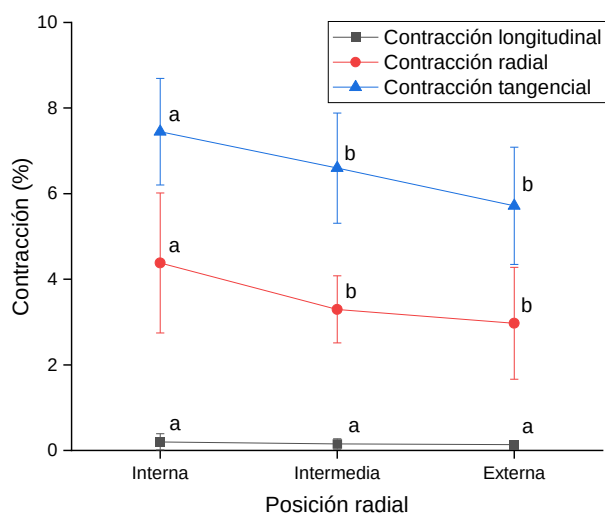


Figura 21. Variación radial de la contracción longitudinal, radial y tangencial de la madera de árboles de *Apuleia leiocarpa*.

4.3. Efecto de la posición radial en las propiedades mecánicas de la madera

El ANOVA para las propiedades mecánicas mostró que solo la dureza (extremos y lados) fue afectada significativamente por la posición radial. Para las demás propiedades mecánicas tales como la flexión estática, compresión paralela a las fibras, compresión perpendicular a las fibras, tensión perpendicular a las fibras y cizallamiento, las diferencias entre las posiciones radiales no fueron significativas (Tabla 5).

Tabla 5. Valor *p* de los factores de posición radial, árbol, e interacción posición radial × árbol, para cada propiedad mecánica. Valores en negrita indican diferencia significativa (valor *p* < 0,05).

Variable		Valor p		
		Posición radial	Árbol	Posición radial × árbol
Dureza	Extremos	0,000	0,000	0,036
	Lados	0,016	0,116	0,513
Flexión estática	ELP	0,853	0,404	0,612
	MOR	0,668	0,330	0,434
	MOE	0,501	0,257	0,616
Compresión paralela a las fibras	ELP	0,001	0,000	0,355
	MR	0,061	0,217	0,248
	MOE	0,360	0,162	0,094
Compresión perpendicular a las fibras	ELP	0,126	0,849	0,317
Esfuerzo de tensión perpendicular a las fibras	Tangencial	0,726	0,751	0,281
	Radial	0,856	0,279	0,869
Esfuerzo de cizallamiento	Tangencial	0,497	0,208	0,160
	Radial	0,275	0,448	0,130

4.4. Patrón de variación radial de las propiedades mecánicas de la madera

Concordante con lo mostrado en la Tabla 4, el perfil de variación radial de la dureza (carga de penetración) mostró un patrón de incremento desde la parte más interna a la parte intermedia; sin embargo, la dureza disminuyó hacia la parte más externa (Figura 22). Los valores de la carga de penetración en los lados y extremos de las probetas fueron de 714 kg y 751 kg en la madera más interna del tronco, 887 kg y 973 kg en la madera de la parte intermedia, y 773 kg y 910 kg en la madera de la parte más externa del tronco (Figura 22).

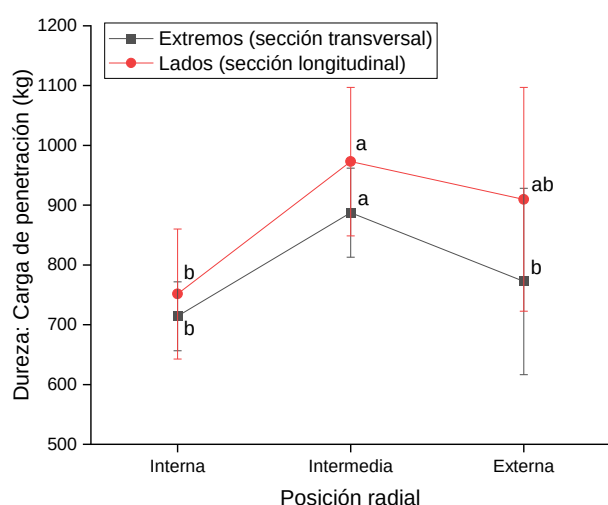


Figura 22. Variación radial de la dureza de la madera en los extremos y lados de las probetas de la madera de árboles de *Apuleia leiocarpa*.

Los esfuerzos de flexión estática, como el esfuerzo al límite proporcional (ELP), módulo de rotura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE), no presentaron diferencias significativas entre las tres posiciones radiales evaluadas, indicando que no varían significativamente desde la médula a la corteza (Figura 23). El ELP fue de 852 kg cm⁻², 880 kg cm⁻² y 899 kg cm⁻², en la madera más interna, intermedia y externa, respectivamente. El MOR incrementó desde 1191 kg cm⁻² en la parte interna, pasando por 1213 kg cm⁻² en la parte intermedia, hasta 1273 kg cm⁻² en la parte más externa. En contraste, el MOE fue más alto en la posición interna con 158022 kg cm⁻², y más bajo en la posición intermedia con un valor de 142159 kg cm⁻², y aumentó levemente hacia la posición externa del tronco con un valor de 154661 kg cm⁻² (Figura 23).

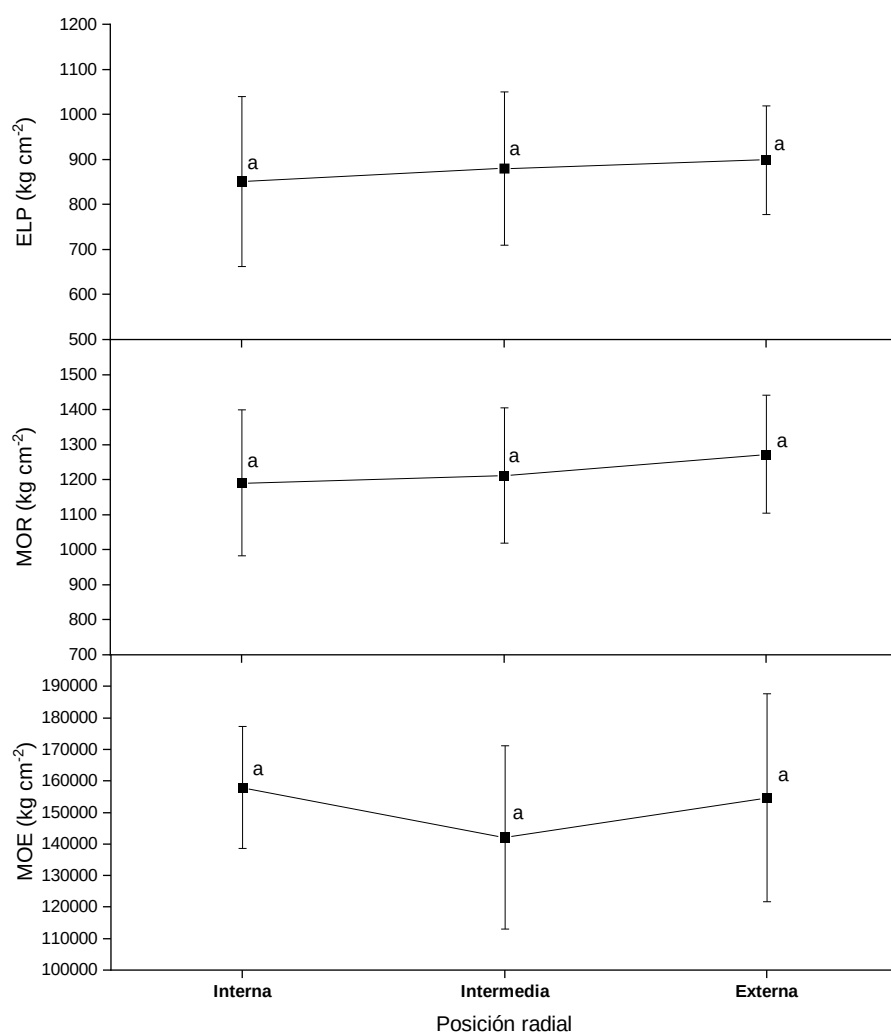


Figura 23. Variación radial de los esfuerzos a la flexión estática: Esfuerzo al límite proporcional (ELP), módulo de rotura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE) de la madera de árboles de *Apuleia leiocarpa*.

El ELP en la compresión paralela a las fibras mostró una disminución en la parte más externa del tronco, que tuvo un ELP significativamente menor que la madera de la parte interna e intermedia del tronco. El ELP en la parte interna, intermedia y externa fue de 420,1 kg cm⁻², 426,1 kg cm⁻², 340,1 kg cm⁻², respectivamente (Figura 24).

Por otra parte, la variación radial del MR en la compresión paralela a las fibras no fue significativa, con valores de 528,9 kg cm⁻², 601,5 kg cm⁻² y 550,4 kg cm⁻² respectivamente para la madera interna, intermedia y externa (Figura 24).

De igual manera, el MOE en la compresión paralela a las fibras no varió significativamente desde la médula a la corteza, con valores de 156890 kg cm⁻² en la parte interna, 154695 kg cm⁻² en la parte intermedia y 140433 kg cm⁻² en la parte externa del tronco (Figura 24).

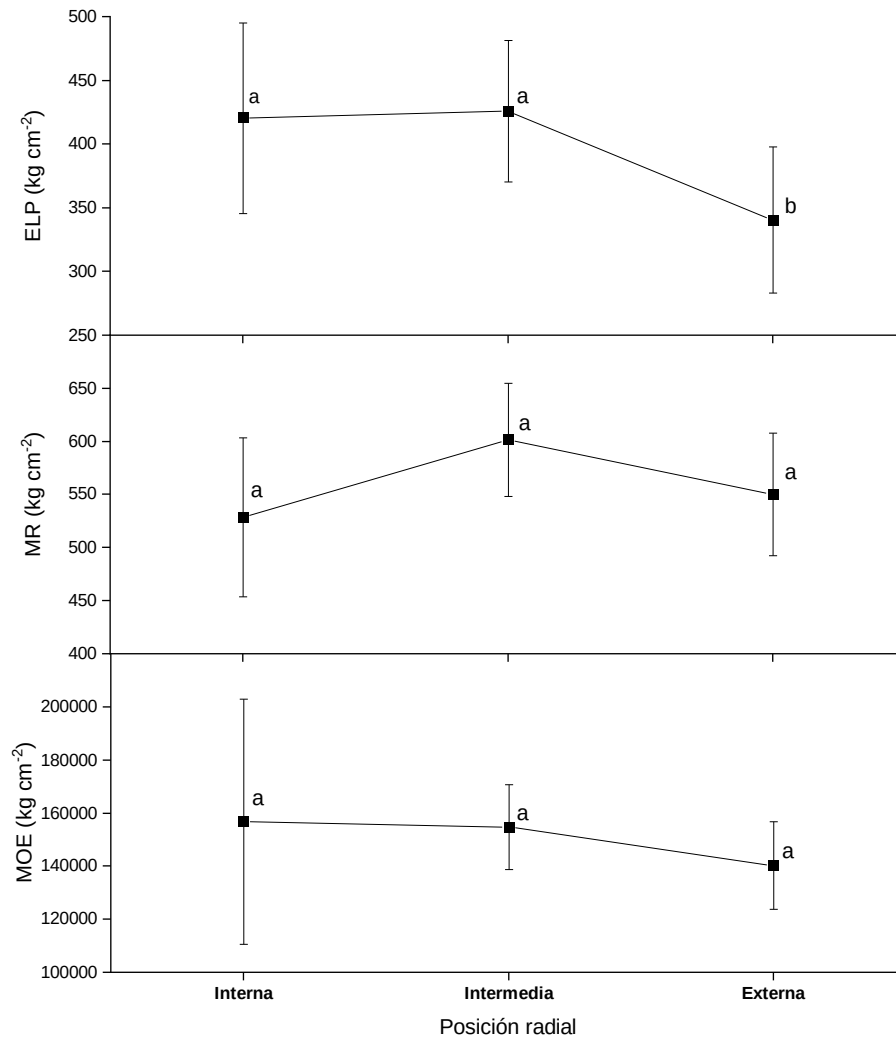


Figura 24. Variación radial de los esfuerzos a la compresión paralela a las fibras: Esfuerzo al límite proporcional (ELP), módulo de rotura (MR) y módulo de elasticidad (MOE), de la madera de árboles de *Apuleia leiocarpa*.

Respecto al ensayo de compresión perpendicular a las fibras, se encontró que el ELP no varió significativamente desde la parte más interna a la parte más externa del tronco, con valores de 3575 kg cm⁻², 4394 kg cm⁻² y 3969 kg cm⁻² respectivamente (Figura 25).

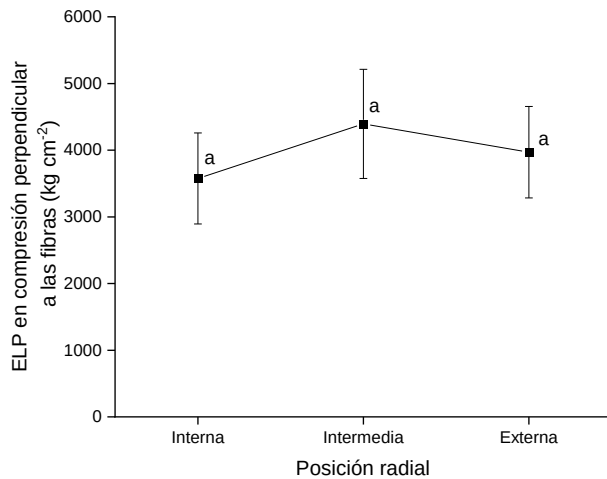


Figura 25. Variación radial del esfuerzo al límite proporcional (ELP) en compresión perpendicular a las fibras de la madera de árboles de *Apuleia leiocarpa*.

El esfuerzo de tensión perpendicular a las fibras no presentó variación radial significativa, tanto en la dirección radial como en la dirección tangencial. En la madera de la parte interna se registraron valores de 35,2 kg cm⁻² en la dirección radial y 43,9 kg cm⁻² en la dirección tangencial; mientras que en la madera de la parte intermedia del tronco se registraron valores de 33,7 kg cm⁻² en la dirección radial y 46,3 kg cm⁻² en la dirección tangencial; por otra parte, en la madera más externa del tronco se registraron valores de 32,7 kg cm⁻² en la dirección radial y 49,8 kg cm⁻² en la dirección tangencial (Figura 26).

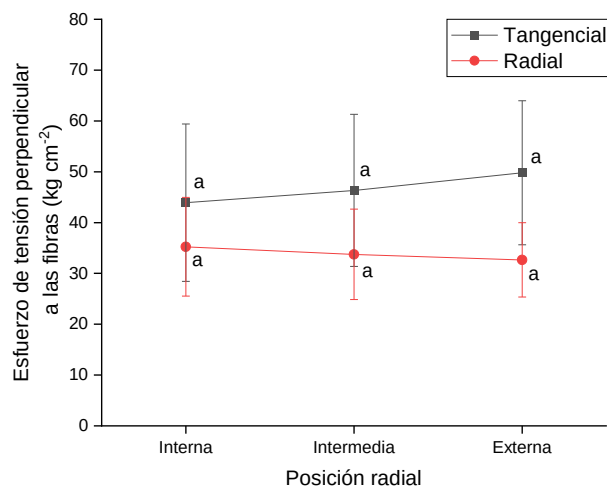


Figura 26. Variación radial del esfuerzo de tensión perpendicular a las fibras de la madera de árboles de *Apuleia leiocarpa*.

El esfuerzo de cizallamiento tampoco varió significativamente desde la parte interna a la parte externa del tronco, con valores de 122,7 kg cm⁻² (radial) y 92,1 kg cm⁻² (tangencial) en la parte interna, 124 kg cm⁻² (radial) y 109 kg cm⁻² (tangencial) en la parte intermedia,

y 103,6 kg cm⁻² (radial) y 93,6 kg cm⁻² (tangencial) en la parte externa del tronco (Figura 27).

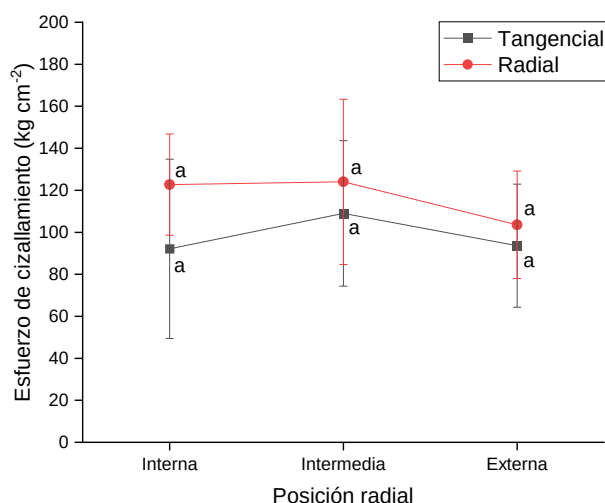


Figura 27. Variación radial del esfuerzo de cizallamiento de la madera de árboles de *Apuleia leiocarpa*.

Los resultados de la investigación indican que se acepta parcialmente la hipótesis de efecto significativo de la posición radial en las propiedades físicas, porque el efecto fue significativo en algunas propiedades físicas. Asimismo, se acepta parcialmente la hipótesis de patrón de incremento de la médula a la corteza. El CH máximo presentó variación radial significativa; sin embargo, solo se incrementó en la posición más externa. La contracción radial y tangencial mostraron variación radial significativa, con un patrón bien definido de variación, mostrando que mientras más cerca de la corteza la madera sufre menos contracción, lo cual es deseable para una mejor calidad de la madera (Figura 20). En contraste, la densidad básica de la madera de *A. leiocarpa*, que es la propiedad física más importante, no fue afectada significativamente por la posición radial. Para esta propiedad no se observó un patrón definido de variación desde la médula hacia la corteza.

Si bien existe un efecto significativo de la posición radial en el CH% máximo y contracción radial y tangencial; la densidad básica (propiedad física más importante) no es afectada por la posición radial (Tabla 3), sugiriendo que sin importar que la madera se obtenga de la parte interna o externa del tronco la densidad de la madera de *A. leiocarpa* no variará significativamente.

Dado que el perfil de variación radial de las propiedades de la madera permite comparar la madera más interna (formada en la etapa joven del árbol) y la madera más externa (formada en la etapa más adulta del árbol), los hallazgos indicarían, indirectamente, que la madera

de árboles de menor diámetro tiene densidad básica semejante a la de árboles de mayor diámetro (Tabla 2). Este conocimiento es muy importante para el uso de la madera de *A. leiocarpa*.

En árboles de rápido crecimiento, la variación radial de las propiedades de la madera está relacionado con la formación de leño juvenil (leño formado durante los primeros años de vida) y leño adulto (leño formado en edades posteriores), con mejores propiedades a mayor edad de los árboles, es decir la madera de leño adulto presenta mejor calidad de la madera con propiedades más estables (Tomazello et al. 2008; Tomazello Filho 2006). Los resultados del presente estudio, realizados en una especie de lento crecimiento como *A. leiocarpa*, muestran que no existe un patrón de incremento de la densidad de la madera desde la médula a la corteza. Esto se debería a que la región interna del tronco está conformada en gran proporción con tejido del tipo adulto, debido a que el crecimiento en diámetro es muy lento. Concordante con los hallazgos, investigaciones en otras especies de latifoliadas como *Tectona grandis* de plantaciones maduras mostraron que tanto la densidad de la madera como la contracción radial y tangencial no variaron significativamente desde la médula a la corteza, (Miranda, Sousa y Pereira 2011); similarmente, en árboles maduros de *Myroxylon balsamum*, de bosques de Madre de Dios, la densidad no muestra una variación radial significativa (Portal-Cahuana et al. 2025). En algunas especies de bosques tropicales de rápido crecimiento que presentan madera de baja o media densidad, la variación radial puede incrementar desde la médula a la corteza como por ejemplo en *Jacaranda copaia*, sin embargo, en otras especies como *Hura crepitans* no se presenta ese patrón de incremento de la densidad (Cahuana et al. 2023). La mayoría de los estudios sugieren que no existe una variación radial significativa de la densidad de la madera en árboles maduros de especies tropicales de madera de media o alta densidad, o en su defecto solo se presenta un bajo grado de variación radial.

Por el contrario, en plantaciones de cortas rotaciones como eucalipto y pino, es evidente que existe una variación radial significativa de las propiedades físicas de la madera, debido a la alta proporción de madera juvenil (Silva, Filho y Oliveira 2007; Chambi-Legoas et al. 2021; Sette Jr et al. 2012). También en plantaciones de *Guazuma crinita* se ha observado el mismo patrón de incremento de la densidad de la madera desde la médula a la corteza (Tuisima-Coral et al. 2017; Custodio et al. 2020).

Los resultados encontrados reflejan un bajo grado de variación radial de las propiedades físicas, que no impacta en la calidad de la madera, y se explica principalmente por la grande

proporción de madera adulta, al tratarse de árboles de grande diámetro muy maduros con alrededor de 200 años de edad (Cahuana 2017).

Los ensayos de propiedades mecánicas mostraron resultados todavía más concluyentes. Con excepción de la dureza, todas las demás propiedades mecánicas: flexión estática, compresión paralela a las fibras, compresión perpendicular a las fibras, tensión perpendicular a las fibras y cizallamiento no fueron afectadas significativamente por la posición radial (Tabla 4). Por tanto, se rechaza la hipótesis planteada y se verifica que no existe efecto significativo de la posición radial en las propiedades mecánicas de la madera de *A. leiocarpa*.

Los resultados, además, indican que no existe un patrón de incremento desde la médula a la corteza de las propiedades mecánicas, es decir, que la madera más interna es comparable con la madera más externa a nivel de resistencia y elasticidad. Por tanto, se rechaza la hipótesis planteada. Estos resultados se relacionan con lo observado para la densidad básica, siendo coherente con las diversas investigaciones que demuestran que las propiedades mecánicas de la madera dependen fuertemente de la densidad de la madera (Bowyer, Shmulsky y Haygreen 2007).

La dureza de la madera fue la única propiedad mecánica que presentó una variación radial significativa, presentando un perfil de variación de incremento desde la parte interna a la parte intermedia del tronco donde alcanza la máxima dureza, y disminuyendo levemente hacia la parte externa del tronco (Figura 21). La leve disminución de la dureza en la madera de la parte externa se podría deber a la presencia de albura, la cual es un tejido levemente más blando.

En especies de coníferas como el pino es conocido que las propiedades mecánicas incrementan desde la médula a la corteza (Roszyk, Moliński y Fabisiak 2013). Sin embargo, existen pocos estudios en especies tropicales de latifoliadas evaluando la variación radial de las propiedades mecánicas; por lo tanto, este estudio aporta información inédita sobre la variación radial de la calidad de la madera, revelando que tanto las propiedades físicas como las propiedades mecánicas no sufren una variación importante desde la madera más interna a la madera más externa. Dado que la *A. leiocarpa* es una especie de madera dura, los resultados de la investigación también podrían extrapolarse a otras especies de madera, las cuales posiblemente también presenten el mismo comportamiento de variación radial no significativa de la calidad de la madera.

Finalmente, los resultados de los ensayos mecánicos evidencian que la madera de *A. leiocarpa* presenta una excelente resistencia en flexión, compresión, tracción, cizallamiento y dureza a lo largo de toda la sección transversal, lo que la hace especialmente adecuada para aplicaciones en construcción estructural, fabricación de durmientes, parquet y pisos de alto desempeño.

CONCLUSIONES

Los resultados del estudio en *A. leiocarpa* indican que no existe efecto significativo de la posición radial (interna, intermedia y externa) en la propiedad física más importante de la madera, es decir, la densidad básica. Las otras propiedades físicas, como contenido de humedad máximo (CH% max) y contracción radial y tangencial, fueron afectadas significativamente por la posición radial.

Además, no se presentó un patrón definido del perfil de variación radial de las propiedades físicas, a excepción de la contracción radial y tangencial, las cuales muestran que la contracción disminuye desde la región interna a la región externa del tronco.

Respecto a las propiedades mecánicas, los diferentes ensayos realizados revelaron que la posición radial no afectó significativamente la mayoría de las propiedades mecánicas, con excepción de la dureza.

Asimismo, no se evidenció un patrón de variación radial de las propiedades mecánicas, incluyendo la dureza; es decir, la resistencia de la madera a los esfuerzos mecánicos no se incrementa desde la parte más interna a la parte más externa del tronco.

En general, los hallazgos del estudio sugieren un muy bajo grado de variación radial de las propiedades físicas y mecánicas de *A. leiocarpa*, que puede estar influenciado por el lento crecimiento de la especie y, en consecuencia, por la baja proporción de madera juvenil. Esto indica que la madera aserrada obtenida de la región posterior a la médula posee una calidad muy semejante a la madera más intermedia o cercana a la corteza.

SUGERENCIAS

Se recomienda realizar estudios de variación radial de las características anatómicas de la madera de *A. leiocarpa*, que pueden ayudar a entender los resultados observados en las propiedades físicas y mecánicas desde el punto de vista de la estructura anatómica de las células de la madera.

Se sugiere también que los estudios de variación radial se realicen en las demás especies comerciales de madera dura, para conocer la variabilidad interespecífica de la variación radial.

Los resultados del estudio sugieren que la madera de *A. leiocarpa*, independientemente de su posición radial, es adecuada para aplicaciones en construcción estructural, fabricación de durmientes, parquet y pisos de alto desempeño.

Futuros estudios deben evaluar también la variación longitudinal de las propiedades de la madera, es decir, desde la base hasta la copa; junto con los estudios de variación radial, esto permitiría crear un mapa tridimensional de la calidad de la madera del fuste completo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALDERETE VILLARROEL, P.R., 2018. *Variación radial de las propiedades físicas de la especie Hymenaea courbaril L., en el consolidado Maderacre-Tahuamanu*. S.l.: Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.
- AMARAL, A.C.B., 1994. *Implantação da metodologia de densitometria de raios X em madeira*. S.l.: Universidade de São Paulo.
- BEHAR RIVERO, D.S., 2008. *Introducción a la metodología de la investigación*. S.l.: Editorial Shalom. ISBN 978-959-212-783-7.
- BENDTSEN, B.A. y SENFT, J., 2007. Mechanical and Anatomical Properties in Individual Growth Rings of Plantation-Grown Eastern Cottonwood and Loblolly Pine. *Wood and Fiber Science*, vol. 18, no. 1, pp. 23-38. ISSN 0735-6161.
- BOWYER, J.L., SHMULSKY, R. y HAYGREEN, J.G., 2007. *Forest Products and Wood Science: An Introduction*. S.l.: Wiley. ISBN 9780813820361.
- CAHUANA, L.A.P., 2017. *Potencial Dendrocronológico De Árvores Da Família Fabaceae Na Floresta Tropical Amazônica Do Peru*. S.l.: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
- CAHUANA, L.A.P., PIÑA, E.A.G., TUESTA, G.P. y TOMAZELLO-FILHO, M., 2023. Radial variation of wood density and fiber morphology of two commercial species in a tropical humid forest in Southeastern Peru. *Cerne*, vol. 29, no. 1, ISSN 01047760. DOI 10.1590/01047760202329013143.

- CASTRO, V.R. de, 2011. *Aplicação de métodos não destrutivos na avaliação das propriedades físicas do lenho de árvores de Pinus caribaea var . hondurensis Barr . et Golf . e Tectona grandis (L . f .)*. S.l.: s.n.
- CASTRO, V.R. de, 2014. *Efeitos do potássio, sódio e da disponibilidade hídrica no crescimento e qualidade do lenho de árvores de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden*. Piracicaba: Universidade de São Paulo.
- CHAMBI-LEGOAS, R., 2016. *Efeito do potássio e do sódio no crescimento e nas propriedades do lenho de árvores de Eucalyptus grandis sob duas condições de regime hídrico*. S.l.: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
- CHAMBI-LEGOAS, R., CHAIX, G., CASTRO, V.R., FRANCO, M.P. y TOMAZELLO-FILHO, M., 2021. Inter-annual effects of potassium/sodium fertilization and water deficit on wood quality of Eucalyptus grandis trees over a full rotation. *Forest Ecology and Management*, vol. 496, no. May, pp. 119415. ISSN 03781127. DOI 10.1016/j.foreco.2021.119415.
- CHAVESTA, M.C., 2005. *Maderas para pisos*. Primera ed. Lima, Perú: ESERGRAF. ISBN 9972-2624-1-3.
- CUSTODIO, M.C., TOMAZELLO-FILHO, M., CARNEIRO, M.E.B. y NISGOSKI, S., 2020. Axial and radial evaluation of the basic density and fiber dimensions of Guazuma crinita martius wood. *Floresta*, vol. 50, no. 2, pp. 1143-1150. ISSN 19824688. DOI 10.5380/rev.v50i2.58356.
- DEBELL, D.S., SINGLETON, R., HARRINGTON, C.A. y GARTNER, B.L., 2002. Wood density and fiber length in young Populus stems: relation to clone, age, growth rate, and pruning. *Wood and Fiber Science*, vol. 34, no. 4, pp. 529-539.
- FRANCO, M.P., 2014. *Efeito da substituição do potássio pelo sódio em árvores de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden, visando a expansão das plantações florestais sob condições de estresse hídrico*. Piracicaba: Universidade de São Paulo.
- FRANCO, M.P., 2018. *Plasticidade de árvores de Eucalyptus grandis no contexto das mudanças climáticas : interação do déficit hídrico e da fertilização no crescimento e qualidade do lenho das árvores de árvores de Eucalyptus grandis*. S.l.: Universidade de São Paulo.
- GÁLVEZ, G.I.E.C., ROCHA, M.P. da, KLITZKE, R.J. y MORA, H.E.G., 2020. Caracterización anatómica y variabilidad de los componentes de la madera de Calycophyllum spruceanum (Benth). Hook. *Revista Ciência da Madeira - RCM*, vol. 11, no. 2, pp. 93-106. DOI 10.12953/2177-6830/rcm.v11n2p93-106.
- GOREMAD, 2010. Estudio de diagnóstico y zonificación para el tratamiento de la demarcación territorial de la provincia Tahuamanu-Volumen I. . Puerto Maldonado:
- HERNÁNDEZ ESCOBAR, A.A., RAMOS RODRÍGUEZ, M.P., PLACENCIA LÓPEZ, B.M., INDACOCHEA GANCHOZO, B., QUIMIS GÓMEZ, A.J. y MORENO PONCE, L.A., 2018. *Metodología de la investigación científica*. S.l.: ÁREA DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO, S.L. ISBN 9788494825705.
- INACAL, 2014a. *Madera. Método para determinar la compresión axial o paralela al grano*. 2014. Lima, Perú: Instituto Nacional de Calidad.
- INACAL, 2014b. *NTP 251.010. 2014. MADERA. Métodos para determinar el contenido de humedad*. 2014. Lima, Perú: Instituto Nacional de Calidad.

- INACAL, 2014c. *NTP 251.011. Madera. Método para determinar la densidad*. 2014. Lima, Perú: Instituto Nacional de Calidad.
- INACAL, 2014d. *NTP 251.015. Madera. Método de determinación de la dureza*. 2014. Lima, Perú: Instituto Nacional de Calidad.
- INACAL, 2014e. *NTP 251.017.2014. Madera: Método para determinar la flexión estática*. . Lima:
- INACAL, 2015a. *NTP 251.012. Madera. Método de determinación de la contracción*. 2015. Lima, Perú: Instituto Nacional de Calidad.
- INACAL, 2015b. *NTP 251.086.2015. Madera: Determinación de la tensión perpendicular a las fibras*. . Lima:
- INACAL, 2016. *NTP 251.008. Madera y carpintería para construcción. Selección y colección de muestras*. 2016. Lima, Perú: Instituto Nacional de Calidad.
- JÚNIOR, C.R.S., FILHO, M.T., DIAS, C.T.D.S., CHAGAS, M.P. y LACLAU, J.P., 2009. EFEITO DA APLICAÇÃO DE POTÁSSIO E SÓDIO NAS CARACTERÍSTICAS DO LENHO DE ÁRVORES DE *Eucalyptus grandis* W.HILL, AOS 24 MESES DE IDADE. *Floresta*, vol. 39, no. 3, pp. 535-546.
- KOJIMA, M., YAMAMOTO, H., YOSHIDA, M., OJIO, Y. y OKUMURA, K., 2009. Maturation property of fast-growing hardwood plantation species: A view of fiber length. *Forest Ecology and Management*, vol. 257, no. 1, pp. 15-22. ISSN 03781127. DOI 10.1016/j.foreco.2008.08.012.
- LACHENBRUCH, B., MOORE, J.R. y EVANS, R., 2011a. Radial Variation in Wood Structure and Function in Woody Plants, and Hypotheses for Its Occurrence. En: F.C. MEINZER, B. LACHENBRUCH y T.E. DAWSON (eds.), *Size- and Age-Related Changes in Tree Structure and Function*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 121-164. ISBN 978-94-007-1242-3.
- LACHENBRUCH, B., MOORE, J.R. y EVANS, R., 2011b. Radial Variation in Wood Structure and Function in Woody Plants, and Hypotheses for Its Occurrence. En: F.C. MEINZER, B. LACHENBRUCH y T.E. DAWSON (eds.), *Size- and Age-Related Changes in Tree Structure and Function* [en línea]. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 121-164. ISBN 978-94-007-1242-3. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-1242-3_5.
- LENZ, O., SCHÄR, E. y SCHWEINGRUBER, F.H., 1976. Methodische Probleme bei der radiographisch-densitometrischen Bestimmung der Dichte und der Jahrringbreiten von Holz. *Holzforschung*, vol. 30, pp. 114-123.
- MIRANDA, I., ALMEIDA, M.H. y PEREIRA, H., 2001. Provenance and site variation of wood density in *Eucalyptus globulus* Labill. at harvest age and its relation to a non-destructive early assessment. *Forest Ecology and Management*, vol. 149, no. 1-3, pp. 235-240. ISSN 03781127. DOI 10.1016/S0378-1127(00)00560-0.
- MIRANDA, I., SOUSA, V. y PEREIRA, H., 2011. Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. *Journal of Wood Science*, vol. 57, no. 3, pp. 171-178. ISSN 14350211. DOI 10.1007/s10086-010-1164-8.
- OLIVEIRA, J.T.S., 1997. *Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil*. S.l.: Universidade de São Paulo.

- PARKER, M.L. y KENNEDY, W.W., 1993. The status of radiation densitometry for measurement of Wood specific gravity. *Non-destructive evaluation of wood by near infrared reflectance spectroscopy*. Kolding: Biotechnological Institute, pp. 57.
- POLGE, H., 1966. Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants. Application dans les domaines technologique et physiologique. *Annual Science Forestry*, vol. 23, no. 1, pp. 1-206.
- PORTAL-CAHUANA, L.A., PAYEZA-TUESTA, G., GRANDEZ-PIÑA, E.A., VINICIUS, M. y TOMAZELLO-FILHO, M., 2025. Radial variation of fiber morphology and wood density of the commercial. *Maderas. Ciencia y Tecnologia*, DOI 10.22320/s0718221x/2025.11.
- PRETZSCH, H., 2009. From Primary Production to Growth and Harvestable Yield and Vice Versa. *Forest Dynamics, Growth and Yield*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 41-99.
- ROSZYK, E., MOLIŃSKI, W. y FABISIAK, E., 2013. Radial variation of mechanical properties of pine wood (*Pinus sylvestris* L.) determined upon tensile stress. *Wood Research*, vol. 58, no. 3, pp. 329-342. ISSN 13364561.
- SALVADOR, M.I.C., 2010. Protocolo de campo para la selección y colección de muestras para la caracterización anatómica y de propiedades físicas, mecánicas, químicas y tecnológicas de la madera. . Pucallpa, Perú:
- SERFOR, 2016. Anuario Forestal 2015 «Perú Forestal en Números 2015». . Lima, Perú:
- SETTE JR, C.R., OLIVEIRA, I.R. De, TOMAZELLO FILHO, M., MINORU, F. y LACLAU, J.P., 2012. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatómicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, vol. 36, no. 6, pp. 1183-1190. ISSN 0100-6762. DOI 10.1590/S0100-67622012000600019.
- SILVA, C., FILHO, T. y OLIVEIRA, S., 2007. Influência da idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex . Maiden. *Revista Árvore*, vol. 31, no. 6, pp. 1081-1090. ISSN 01006762. DOI 10.1590/S0100-67622007000600013.
- TOMAZELLO FILHO, M., 2006. *Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de Eucalyptus grandis x urophylla*. S.l.: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- TOMAZELLO, M., BRAZOLIN, S., CHAGAS, M.P., OLIVEIRA, J.T.S., BALLARIN, a. W. y BENJAMIN, C. a, 2008. Application of X-Ray Technique in Nondestructive Evaluation of Eucalypt Wood. *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 10, no. 2, pp. 139-149. ISSN 0718-221X. DOI 10.4067/S0718-221X2008000200006.
- TUISIMA-CORAL, L.L., ODICIO-GUEVARA, J.E., WEBER, J.C., LLUNCOR-MENDOZA, D. y LOJKA, B., 2017. Variación de las propiedades físicas en troncos de *Guazuma crinita*, una especie maderable en el Amazonas Peruano. *Madera Bosques*, vol. 23, no. 1, pp. 53-61. ISSN 14050471. DOI 10.21829/myb.2017.2311534.
- VIGNOTE PEÑA, Santiago. y MARTÍNEZ ROJAS, I., 2006. *Tecnología de la madera*. S.l.: Ediciones Mundi-Prensa. ISBN 8484762637.
- WALKER, J.C.F., 2006. Water in wood. *Primary Wood Processing*. S.l.: Springer Netherlands, pp. 69-94.

- WIEDENHOEFT, A., 2012. Structure and Function of Wood. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, Second Edition*. S.I.: CRC Press, pp. 9-32. ISBN 978-1-4398-5380-1.
- WILKINS, A.P. y HORNE, R., 1991. Wood-density variation of young plantation-grown *Eucalyptus grandis* in response to silvicultural treatments. *Forest Ecology and Management*, vol. 40, no. 1-2, pp. 39-50. ISSN 03781127. DOI 10.1016/0378-1127(91)90090-I.
- YANG, K.C., BENSON, C.A. y WONG, J.K., 1986. Distribution of juvenile wood in two stems of *Larix laricina*. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 16, no. 5, pp. 1041-1049. DOI 10.1139/x86-181.
- ZOBEL, B.J. y VAN BUIJTENEN, J.P., 1989. Variation Within and Among Trees. En: B.J. ZOBEL y J.P. van BUIJTENEN (eds.), *Wood Variation: Its Causes and Control*. S.I.: Springer-Verlag, pp. 72-131.

ANEXOS

Anexo 01. Matriz de consistencia

Título: Variación radial de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Apuleia leiocarpa*, Tambopata - Madre de Dios

Nombre de los tesisistas: CASTRO CUCHITINERI, Eduar Toribio; y GIRALDO HUAMAN, Arnold Paul

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables e indicadores	Metodología
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variables dependientes	Tipo de estudio
¿Cómo es la variación radial de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de <i>A. leiocarpa</i> en los bosques de la provincia de Tambopata – Departamento de Madre de Dios?	Evaluar la variación radial de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de <i>A. leiocarpa</i> , en los bosques de la provincia de Tambopata – Departamento de Madre de Dios.	La madera de <i>A. leiocarpa</i> presenta variación radial significativa de las propiedades físicas y mecánicas, las cuales mejoran o incrementan desde la médula a la corteza.	Densidad básica de la madera: Masa seca anhidra (g). Volumen húmedo saturado (cm³). Contenido de humedad máximo (CH% max) Masa seca anhidra (g) Masa húmeda saturada (g) Contracción radial: Reducción de la longitud radial de la pieza (%). Contracción tangencial: Reducción de la longitud tangencial de la pieza (%).	Investigación observacional, no experimental. Investigación básica Diseño del estudio Diseño en bloques completamente aleatorizados. Factor de tratamiento: posición radial: interna (0-25% del radio), intermedia (35-60% del radio), y externa (75-100% del radio). Factor de bloque: árbol (04 individuos).
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas		
¿Cuál es el efecto de la posición radial en las propiedades físicas de la madera de <i>A. leiocarpa</i> ?	Determinar el patrón de variación radial de las propiedades físicas de la madera de <i>A. leiocarpa</i> .	H1: Existe efecto significativo de la posición radial en las propiedades físicas de la madera de <i>A. leiocarpa</i> .	Resistencia a la comprensión paralela al grano Máxima fuerza antes de la rotura (N m ⁻²).	Métodos
¿Cómo es el perfil de variación radial de las propiedades físicas de la madera de <i>A. leiocarpa</i> ?	Evaluar el efecto de la posición radial en las propiedades físicas de la madera de <i>A. leiocarpa</i> .	H2: La variación radial de las propiedades físicas de la madera de <i>A. leiocarpa</i> , sigue un patrón de incremento desde la médula hacia la corteza.	Resistencia a la comprensión perpendicular al grano Máxima fuerza antes de la rotura (N m ⁻²).	Población: 13 árboles de la concesión de otros productos del bosque N° 17-TAM/C-OPB-J-205-03.
¿Cuál es el efecto de la posición radial en las propiedades mecánicas de la madera de <i>A. leiocarpa</i> ?	Determinar el patrón de variación radial de las propiedades mecánicas de la madera de <i>A. leiocarpa</i> .	H3: Existe efecto significativo de la posición radial en las propiedades mecánicas de la madera de <i>A. leiocarpa</i> .	Resistencia a la tracción paralela al grano: Máxima fuerza antes de la rotura (N m ⁻²).	Muestra: 04 árboles en base a la Norma Técnica Peruana NTP 251.008. De cada árbol se extraerá una rodaja de 41 cm de longitud a la altura del dap. De cada rodaja se cortarán las probetas en 03 posiciones radiales.
¿Cómo es el perfil de variación radial de las propiedades mecánicas de la madera de <i>A. leiocarpa</i> ?	Evaluar el efecto de la posición radial en las propiedades mecánicas de la madera de <i>A. leiocarpa</i> .	H4: La variación radial de las propiedades mecánicas de la madera de <i>A. leiocarpa</i> , sigue un patrón de incremento desde la médula hacia la corteza.	Resistencia a la flexión estática: Módulo de rotura (MOR) (N m ⁻²). Módulo de elasticidad (MOE) (N m-2). Dureza: Fuerza (N m-2). Resistencia al cizallamiento: Máxima fuerza antes de la rotura (N m-2).	Técnicas de colección y análisis de datos: En laboratorio, se evaluaron las físicas propiedades físicas y mecánicas en base a las normas técnicas peruanas. Se construyeron los perfiles de variación radial, y se realizó ANOVA en cada variable para conocer el efecto la posición radial.
			Variables independientes	
			Posición radial: Distancia desde la médula (30%, 60%, 90%).	

Anexo 02. Panel fotográfico



Foto 1. Árbol de Ana caspi cortado

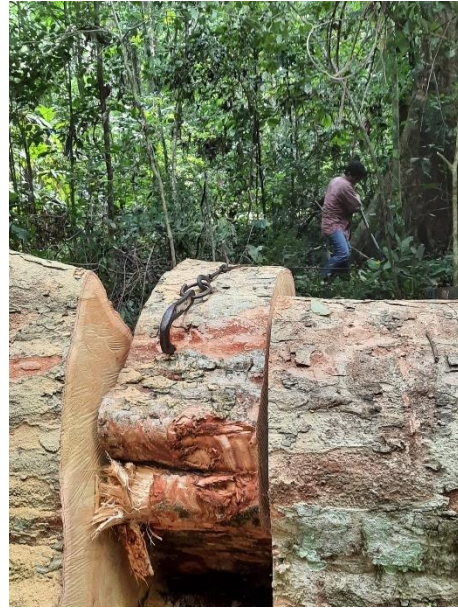


Foto 2. Rodaja cortada de la base del árbol



Foto 3. Una vigueta central cortada



Foto 4. Corte de probetas con sobredimensión



Foto 5. Probetas para ensayos físicos



Foto 6. Un bloque de probetas ordenadas por posición radial



Foto 7. Ensayo de contenido de humedad



Foto 8. Ensayo de contenido de humedad



Foto 9. Selección y organización de probetas



Foto 10. Preparación de probetas



Foto 11. Ensayo de flexión estática



Foto 12. Falla la madera en el ensayo de flexión



Foto 13. Ensayo de compresión paralela



Foto 14. Ensayo de compresión paralela



Foto 15. Ensayo de compresión perpendicular



Foto 16. Ensayo de compresión perpendicular



Foto 17. Ensayo de dureza



Foto 18. Registro de ensayo de dureza



Foto 19. Probetas para ensayo de tracción perpendicular



Foto 20. Ensayo de tracción perpendicular



Foto 21. Probetas para ensayo de cizallamiento



Foto 22. Ensayo de cizallamiento

AUTORIZACIÓN PARA ESTUDIO DE INVESTIGACIÓN

Yo, **JUSTO MONTAÑO ÁVILA**, identificado con DNI N° **04809050**, titular de la Concesión de Productos Forestales Diferentes a la Madera con Contrato **N°17-TAM/C-OPB-J-205-03**, por medio de la presente:

AUTORIZO a los bachilleres:

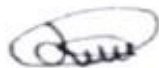
❖ **EDUAR TORIBIO CASTRO CUCHITINERI**, con DNI N.° **71266841**

❖ **ARNOLD PAUL GIRALDO HUAMÁN**, con DNI N.° **76039927**

ambos de la carrera profesional de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios – UNAMAD, a realizar el estudio de investigación titulado **“Variación radial de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de Apuleia leiocarpa, Tambopata - Madre de Dios”**, de la especie *Apuleia leiocarpa*, el cual cuenta con la aprobación otorgada mediante Resolución Gerencial Regional N° **1503-2021-GOREMAD-GRFFS** de la **Gerencia Forestal y de Fauna Silvestre**.

El presente permiso se otorga con fines estrictamente académicos y de investigación, dentro del área comprendida en el contrato de concesión forestal con fines no maderables de mi titularidad, quedando bajo responsabilidad de los bachilleres el cumplimiento de la normativa forestal vigente, las disposiciones técnicas aplicables y las medidas de seguridad en el desarrollo de las actividades autorizadas.

En constancia de lo expuesto, firmo la presente en la ciudad de Puerto Maldonado a los 03 días del mes de enero del año 2024.



JUSTO MONTAÑO ÁVILA

DNI: 04809050

Titular Contrato N° 17-TAM/C-OPB-J-205-03

Anexo 04. Constancia de identificación botánica de los árboles muestreados



UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZONICA DE MADRE DE DIOS

Centro Investigación del Herbario Alwyn Gentry

"Madre de Dios, Capital de la Biodiversidad del Perú"

Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las Heroicas Batallas de Junín y Ayacucho



CONSTANCIA

En mi calidad de Director del Centro de Investigación Herbario "Alwyn Gentry" de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios,

HACE CONSTAR:

Las muestras botánicas fueron presentadas en el marco de la tesis de pregrado de los bachilleres GIRALDO HUAMAN, Arnold Paul y CASTRO CUCHITINERI, Eduar Toribio, titulada: "**Variación radial de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Apuleia leiocarpa*, Tambopata - Madre de Dios**", para optar al título profesional de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente en la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.

El ejemplar ha sido entregado a la colección del herbario y consta de cuatro (04) especímenes vegetales provenientes del sector Bajo Alegria, distrito Las Piedras, región Madre de Dios. Dichos especímenes fueron verificados e identificados por el Centro de Enseñanza e Investigación HAG-UNAMAD. A continuación, se presenta el cuadro informativo de la especie.

Nº	Código	Nombre científico	Familia Según APG IV (2016)	Coordenada UTM
1	452	<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J.F.Machbr	Fabaceae	E=512183 N=8055050
2	451	<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J.F.Machbr	Fabaceae	E=512094 N=8055221
3	454	<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J.F.Machbr	Fabaceae	E=512234 N=8055054
4	528	<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J.F.Machbr	Fabaceae	E=511075 N=8054055

Se expide la presente constancia a solicitud de la interesada para los fines que considere conveniente.

Puerto Maldonado, 15 de enero de 2024.

Atentamente



UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZONICA DE MADRE DE DIOS

Centro de Investigación Herbario Alwyn Gentry

Dr. Silvio Hartz Quintanilla

Director del Centro de Investigación Herbario Alwyn Gentry

Cc:
Andrés