



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: CARACTERIZACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD  
ESTÁTICO Y DINÁMICO DE LA MADERA BACTRIS GASIPAES  
(CHONTA) DE ECUADOR**

**AUTOR:**

**GUARDERAS SÁNCHEZ, DIEGO ANDRÉS**

**DIRECTOR:**

**ING. SEGURA SANGUCHO, LUIS JAVIER, MSc.**

**SANGOLQUÍ – ECUADOR**

**2018**



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, "**CARACTERIZACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO Y DINÁMICO DE LA MADERA BACTRIS GASIPAES (CHONTA) DE ECUADOR**" fue realizado por el señor **Guarderas Sánchez, Diego Andrés** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 25 de julio 2018

Firma:

ING. SEGURA SANGUCHO, LUIS JAVIER, MSC.

C.C. 1718162686



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Guarderas Sánchez, Diego Andrés**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Caracterización del módulo de elasticidad estático y dinámico de la madera *Bactris gasipaes* (chonta) de Ecuador** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 25 de julio 2018

Firma:

Sr. Diego Andrés Guarderas Sánchez

C.C: 1723976088



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Guarderas Sánchez, Diego Andrés** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Caracterización del módulo de elasticidad estático y dinámico de la madera *Bactris gasipaes* (chonta) de Ecuador** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 25 de julio 2018

Firma:

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Diego Guarderas Sánchez", escrita sobre una línea horizontal.

Sr. Diego Andrés Guarderas Sánchez

C.C: 1723976088

## DEDICATORIA

Este trabajo está especialmente dedicado a mi “heroína”, mi madre Mónica, la persona que me enseñó lo duro y bello que puede ser la vida, que no existen decisiones malas, sino que a partir de ellas te encontraras con una gran enseñanza o satisfacción de éxito, que la familia es lo más importante siempre brindándote amor y apoyo incondicional, y sobre todo que con esfuerzo y dedicación todo es posible.

A mis abuelos maternos José y Griselda que desde pequeño estuvieron conmigo criándome, enseñándome con el ejemplo el verdadero amor, la humildad, la religión, valores. Brindarme su tiempo y darme todo lo que estuvo a su alcance.

A mi hermano Pablo, por ser mi mejor amigo y a la vez un padre que con su ejemplo y consejos me han permitido dar lo mejor de mí en todos los obstáculos que se me han presentado en el camino.

*Diego Guarderas.*

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por estar presente siempre iluminando mi camino, brindándome salud y la oportunidad de culminar con éxito mi carrera.

A mi madre, hermano y abuelos por todo el amor que me demostraron cada día y el apoyo a las decisiones tomadas en cada etapa de mi carrera.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, que me abrió sus puertas y me puso en el camino excelentes docentes.

Al director del proyecto Ing. Luis Segura por su apoyo y guía a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Al señor Alejandro Pinzón, que me brindó su apoyo con la empresa Aserradero Maderpin en el transporte, secado y manufactura de los tablonos de madera para el presente proyecto de Titulación.

A la empresa Mastersolution S.A por brindarme la oportunidad de trabajar y realizar al mismo tiempo mi trabajo de titulación.

A mi familia, amigos y todas las personas que de una u otra forma me brindaron su apoyo en esta etapa.

*Diego Guarderas.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CERTIFICACIÓN .....</b>	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN .....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS.....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xiv</b>
 <b>CAPÍTULO I</b>	
<b>GENERALIDADES</b>	
1.1. Introducción .....	1
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Definición Del Proyecto .....	6
1.4. Objetivos.....	8
1.4.1. Objetivo General.....	8
1.4.2. Objetivos Específicos .....	8
1.5. Justificación e Importancia .....	8
1.6. Alcance.....	9
 <b>CAPÍTULO II</b>	
<b>ESTADO DEL ARTE</b>	
2.1. Origen, domesticación y distribución .....	11
2.2. Taxonomía.....	12

2.3. Morfología.....	14
2.3.1. Tronco .....	15
2.3.2. Hojas .....	16
2.3.3. Flores y frutas.....	17
2.4. Cultivo y manejo .....	18
2.4.1. Clima .....	18
2.4.2. Topografía .....	19
2.4.3. Suelo .....	19
2.5. Usos generales.....	20
2.5.1. Madera del tronco.....	20
2.5.2. Hojas .....	21
2.5.3. Palmito.....	22
2.5.4. Fruto .....	23
2.6. Anatomía del tronco .....	24
2.7. Palma de bambú y chonta como material compuesto .....	26
2.8. Propiedades físicas .....	28
2.8.1. Contenido de humedad .....	28
2.8.2. Densidad y gravedad específica.....	28
2.9. Propiedades mecánicas .....	29
2.9.1. Propiedades elásticas.....	29
2.9.2. Propiedades de resistencia .....	30
2.10. Ensayos no destructivos (END) en madera.....	31
2.11. Desarrollo de ensayos no destructivos (END) en madera.....	33
2.11.1. Espectro visible como END .....	33



2.11.2. Propiedades eléctricas usados como END.....	33
2.11.3. Ultrasonidos.....	34
2.11.4. Microondas.....	34
2.11.5. Vibración y ondas de tensión.....	34
2.12. Módulo de elasticidad dinámico.....	36
2.13. Relación entre MOE estático y MOE dinámico.....	38
2.13.1. Módulo elástico longitudinal dinámico (EL) .....	39
2.13.2. Módulo de elasticidad dinámico (EF) .....	39

### **CAPÍTULO III**

#### **EXPERIMENTACIÓN**

3.1. Origen del material, manejo y procesamiento .....	41
3.2. Secado de la madera .....	42
3.3. Procesamiento.....	43
3.4. Microestructura.....	43
3.4.1. Máquina, equipo y procedimiento.....	43
3.5. Macroestructura.....	44
3.5.1. Ensayo contenido de humedad (% CH).....	45
3.5.2. Ensayo tracción paralela a la fibra.....	47
3.5.3. Ensayo Compresión paralela a la fibra .....	50
3.5.4. Ensayo Compresión perpendicular a la fibra .....	52
3.5.5 Ensayo Flexión estática (MOE estático) .....	54
3.5.6 Ensayo MOE dinámico.....	57

### **CAPÍTULO IV**

#### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

4.1. Descripción microestructural .....	61
4.2. Descripción macroestructural .....	62
4.2.1 Contenido de humedad (%CH) .....	62
4.2.2 Resistencia a la tracción paralela a la fibra.....	64
4.2.3 Resistencia a la compresión paralela a la fibra.....	66
4.2.4 Resistencia a la compresión perpendicular a la fibra.....	68
4.2.5 Módulo de elasticidad estático (MOE estático) .....	70
4.3. Descripción dinámica.....	72
4.3.1 Gráfica aceleración vs tiempo.....	72
4.3.2 Grafica espectro de frecuencia .....	75
4.3.3 Módulo de elasticidad dinámico (MOE dinámico) .....	76
4.4. Comparación módulo de elasticidad estático (MOE estático) contra módulo de elasticidad dinámico (MOE dinámico) .....	80
<b>CAPÍTULO V</b>	
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
5.1. Conclusiones.....	83
5.2. Recomendaciones .....	85
5.3. Trabajos futuros .....	85
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>86</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Resistencia a la tensión y módulo de Young de la <i>Bactris Gasipaes Kunth</i> .....	5
<b>Tabla 2.</b> Módulo de Elasticidad de la <i>Bactris Gasipaes Kunth</i> .....	5
<b>Tabla 3.</b> Características de la madera .....	41
<b>Tabla 4.</b> Coeficientes para la vibración transversal de una viga empotrada en un extremo y libre en el otro. ....	60
<b>Tabla 5.</b> Resultados de ensayo %Humedad “método A” ASTM D4442-16.....	63
<b>Tabla 6.</b> Distribución de probabilidad resistencia a la tracción.....	65
<b>Tabla 7.</b> Distribución de probabilidad resistencia a la compresión paralela a la fibra ..	67
<b>Tabla 8.</b> Distribución de probabilidad resistencia a la compresión perpendicular a la fibra .....	69
<b>Tabla 9.</b> Distribución de probabilidad resistencia a la compresión perpendicular a la fibra .....	71
<b>Tabla 10.</b> Distribución de probabilidad MOE dinámico “método A” .....	78
<b>Tabla 11.</b> Distribución de probabilidad normal MOE dinámico método “B” .....	80
<b>Tabla 12.</b> Resultados MOE estático y MOE dinámico de probetas con densidades similares. ....	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Chicha de Chonta .....	4
<b>Figura 2.</b> Cultivo de palmito y fruto de la chonta.....	4
<b>Figura 3.</b> Origen, domesticación y distribución aproximada de la palma de chonta ( <i>Bactris Gasipaes</i> ) .....	13
<b>Figura 4.</b> Mapa de los principales nombres regionales.....	14
<b>Figura 5.</b> <i>Morfología general de la palma de chonta</i> .....	15
<b>Figura 6.</b> a) Entrenudos con espinas, b) Tronco.....	16
<b>Figura 7.</b> Hoja de la palma de chonta. ....	16
<b>Figura 8.</b> a) Flor, b) Racimo lleno de frutos.....	17
<b>Figura 9.</b> Fruto de palma de chonta.....	18
<b>Figura 10.</b> Arcos de flecha.....	21
<b>Figura 11.</b> Casa indígenas amazónicos con hojas de chonta en el techo. ....	21
<b>Figura 12.</b> Principales mercados del palmito ecuatoriano.....	22
<b>Figura 13.</b> Cosecha de palmito, transporte de palmitos, venta de palmito procesado..	23
<b>Figura 14.</b> Frutos de chontaduro, pulpa fermentada de chontaduro cubierta con hojas de plátano, frutos secos y cocinados para la venta. ....	24
<b>Figura 15.</b> (a) Esquema de la sección transversal de una palmera, compuesta de fibras que varían su volumen en función al radio, produciendo un gradiente radial. (b) Representación esquemática de la distribución del tejido del tallo de palma joven (izquierda) y un tallo de palma vieja (derecha) (según Rich, 1987).....	25
<b>Figura 16.</b> Prototipo de medición de frecuencia de vibración. ....	37
<b>Figura 17.</b> Corte in situ de la palma de chonta. ....	42
<b>Figura 18.</b> Cortado de trozas, secado al ambiente y secado al horno. ....	42
<b>Figura 19.</b> Cepillado de los tablones.....	43
<b>Figura 20.</b> Microscopio electrónico de barrido TESCAN.....	44
<b>Figura 21.</b> Pesaje y secado de muestras.....	47
<b>Figura 22.</b> Dimensiones probeta tracción según ASTM D143-14.....	48
<b>Figura 23.</b> Equipos y probetas, máquina de ensayos universales AMSLER. ....	49

<b>Figura 24.</b> Dimensiones probetas ensayo compresión paralela a la fibra.....	50
<b>Figura 25.</b> Equipos y probetas, probeta ubicada en el centro de los topes cilíndricos..	51
<b>Figura 26.</b> Dimensiones probetas ensayo compresión perpendicular a la fibra.....	52
<b>Figura 27.</b> Probetas, placa metálica ubicada en la superficie radial de la probeta. ....	53
<b>Figura 28.</b> Dimensiones probetas ensayo flexión estática. ....	54
<b>Figura 29.</b> Equipos, probetas, ensayo flexión estático.....	55
<b>Figura 30.</b> Dimensiones probetas “método A”. ....	57
<b>Figura 31.</b> Dimensiones probetas “método B”. ....	57
<b>Figura 32.</b> Secciones transversales que muestran cambios en el desarrollo del tejido del tallo a la altura del pecho de la palma de chonta. 1. Tejido del tallo periférico. 2. Tejido central del tallo. El tejido (G) consiste en células de parénquima con lagunas (L) que se forman en el tejido central de la planta. Los haces vasculares consisten en la xilema (X), el floema (P) y la envoltura de la fibra (B).....	62
<b>Figura 33.</b> Histograma %CH distribución normal. ....	63
<b>Figura 34.</b> Comparación resultados %CH obtenidos con investigaciones anteriores..	64
<b>Figura 35.</b> Probetas ensayo tracción después del ensayo. ....	64
<b>Figura 36.</b> Graficas distribución de probabilidad resistencia a la tracción. ....	65
<b>Figura 37.</b> Comparación resultados resistencia a la tracción con investigaciones anteriores.....	66
<b>Figura 38.</b> Graficas distribución de probabilidad resistencia a la compresión paralela a la fibra.....	67
<b>Figura 39.</b> Comparación resultado resistencia a la compresión paralela a la fibra con otras investigaciones. ....	68
<b>Figura 40.</b> Graficas distribución de probabilidad resistencia a la compresión perpendicular a la fibra. ....	69
<b>Figura 41.</b> Gráfica fuerza vs deflexión obtenida de la máquina de ensayos universales AMSLER.....	70
<b>Figura 42.</b> Grafica distribución de probabilidad MOE estático. ....	71
<b>Figura 43.</b> Comparación MOE estático con otras investigaciones.....	72
<b>Figura 44.</b> Gráficas aceleración vs tiempo “método A”. ....	73

<b>Figura 45.</b> Gráficas aceleración vs tiempo “método B” .....	74
<b>Figura 46.</b> Grafica espectro de frecuencia “método A” .....	75
<b>Figura 47.</b> Grafica espectro de frecuencia “método B” .....	76
<b>Figura 48.</b> Banco de pruebas Martinez (2017) “método A” .....	77
<b>Figura 49.</b> Grafica distribución de probabilidad MOE dinámico “método A” .....	78
<b>Figura 50.</b> Banco de pruebas “método B” .....	79
<b>Figura 51.</b> Grafica distribución normal MOE dinámico ”método B” .....	80
<b>Figura 52.</b> Gráfico de dispersión MOE estático vs MOE dinámico. ....	81
<b>Figura 53.</b> Datos valor de correlación investigaciones anteriores.....	82

## RESUMEN

El uso de la madera de las palmas ecuatorianas está limitado por tradiciones culturales con poca estandarización, por ejemplo, el material de construcción de las armas, artesanías y casas de nuestros indígenas es la madera de esta planta. Para que los materiales puedan aplicarse en la industria de la construcción deben ser evaluados bajo normas de ingeniería que aseguren el rendimiento estructural. Este trabajo de investigación presenta los resultados de “microestructura” y “macroestructura” para el tallo de la palma *Bactris gasipaes* Kunth (Chonta). El análisis microestructural se realizó para observar el diseño tipo panal de las fibras. La macroestructura se la caracterizó mediante la propiedad física del contenido de humedad y propiedades mecánicas de tracción (resistencia a la tracción), compresión (resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra) y flexión (MOE). Además, paralelamente se utilizó un END basado en la teoría de vibraciones para obtener el módulo de elasticidad (MOE) dinámicamente.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **BACTRIS GASIPAES KUNTH**
- **CHONTA**
- **CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA**
- **CARACTERIZACIÓN DINÁMICA**
- **MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO**
- **MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO**

## ABSTRACT

The use of the Ecuadorian palms wood is limited by cultural traditions with little standardization, for example, the construction material for weapons, crafts and houses of our natives is based on the wood of this plant. For materials to be applicable in the construction industry, they must be evaluated under engineering standards that ensure structural performance. This research project demonstrates the results of "microstructure" and "macrostructure" for the stem of the palm *Bactris gasipaes* Kunth (Chonta). The microstructural analysis was performed to observe the honeycomb design of the fibers. The macrostructure study was characterized by the study of the physical property of moisture content and mechanical properties of tension, compression parallel and perpendicular to grain and Static bending (MOE). In addition, an END based on vibration theory was used simultaneously to obtain dynamic modulus of elasticity (MOE).

### KEYWORDS:

- **BACTRIS GASIPAES KUNTH**
- **CHONTA**
- **STATIC CHARACTERIZATION**
- **DYNAMIC CHARACTERIZATION**
- **STATIC MODULUS OF ELASTICITY**
- **DYNAMIC MODULUS OF ELASTICITY**



# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

### 1.1. Introducción

En el Ecuador las plantas con alto impacto económico y mayor número de usos son las pertenecientes a la familia Arecales conocidas comúnmente como palmeras o palmas (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013). La diversidad de flora de palmeras es significativa en relación al tamaño del país, no solo en número de especies, también en una extensa gama de variaciones morfológicas. Se las puede encontrar en tres de las cuatro regiones del país, de manera abundante en bosques húmedos y lluviosos como en las regiones Costa y Amazonía. Todas estas plantas tienen un alto potencial de desarrollo económico, debido a los usos que se le puede dar, como fuente de productos naturales hasta maderas para muebles o construcción (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013). Sin embargo, existen pocos estudios con una buena evaluación para el uso de estos recursos.

Este proyecto está dirigido sobre el uso y las características de una palmera en particular, conocida como palma de Chonta (*Bactris Gasipaes*), una especie muy utilizada artesanalmente por comunidades indígenas de la Amazonía e industrialmente para la obtención del palmito para posteriormente ser exportado a nivel mundial (Van der Eynden, 2004). Se ha cultivado desde la era precolombina, reconocida como un árbol frutal en muchas comunidades indígenas en América Central y como una palmera tradicional en la amazonia del Brasil, Colombia, Ecuador y Perú. Se la puede encontrar desde el noroccidente de Honduras hasta el centro de Bolivia y desde el estuario del

Amazonas hasta la costa pacífica de Ecuador y Colombia (Patiño, 1960; Mora-Urpi & Echeverria, 1999).

Se la conoce con diferentes nombres, por ejemplo, “Tembé o palma de castilla” en Bolivia, “Pupunha” en Brasil, en América del Sur donde abundan tierras bajas del Amazonas “Pijuayo” en Perú mientras que en Colombia y Ecuador se lo llama “Chontaduro” (Mora-Urpi, Weber, & Clement, 1997). Se lo cultiva para la producción de frutos y palmito, en el caso del palmito se lo realiza industrialmente para exportación, a nivel local los pueblos indígenas utilizan la planta como alimento a través de sus frutos y como madera para la fabricación de armas, a su vez como columnas y pilares de sus casas. Adicionalmente derriban los troncos para que se desarrollen larvas (Chontacuro) y sean utilizadas para su consumo (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013).

Países como Brasil y Costa Rica han creado sistemas de construcción modernos que incluyen el uso de la palma de Chonta, recurso que se encuentra en su entorno. La palma de Chonta se la considera como material compuesto de fibra similar al bambú, que podría ser útil para la ingeniería estructural (Martinez, 2013). Para utilizar materiales en la construcción a gran escala u obtener materiales compuestos es necesario realizar análisis físicos, químicos, mecánicos y dinámicos junto con su comportamiento en el tiempo, a su vez, estudios científicos sistemáticos que puedan dar información sobre cultura, técnicas, recolección, curado y post-tratamiento (Ghavami, Rodrigues, & Paciornik, 2003). Por esta razón, es necesario iniciar una investigación científica sobre el uso de la palma de Chonta que sirva como base para fines de extracción de su madera,

aprovecharla en la construcción y futuras investigaciones en la creación de materiales compuestos, dándole valor agregado a materias primas de nuestro país.

## 1.2. Antecedentes

La planta *Bactris Gasipaes* pertenece a la familia de las palmeras, reconocida como un árbol frutal en muchas comunidades indígenas en América Central y como una palmera tradicional en la amazonia del Brasil, Colombia, Ecuador y Perú. Presente desde Honduras hasta el centro de Bolivia y desde el Amazonas hasta la costa pacífica de Ecuador y Colombia. (Patiño, 1960; Calvo, 1981). La palma cultivada se conoce correctamente como *Bactris Gasipaes* Kunth (Uhl & Dransfield, 1987), pertenece a la familia: *Arecacea*. Se conocen más de doscientos nombres para la *Bactris gasipaes* kunth, los más comunes son: Pupunha (Brasil), Chontaduro (Colombia y Ecuador), Pejibaye (Costa Rica y Nicaragua) (Patiño, 1960). Conocida como la única palmera domesticada por sus frutos desde la época precolombina a manos de los pueblos amerindios. La domesticación se realizó con fines de mejorar las características agronómicas del fruto, tamaño, forma, color, sabor y composición química. El chontaduro en el Ecuador tiene un crecimiento de 1.5 – 2 m por año, y la producción de frutos se inicia de 3 – 5 años después de la plantación (Castillo, 2015; Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013).

Esta planta proporcionó productos de alimentos básicos para muchos amerindios y comunidades en América Central y del Sur. Su importancia fue gracias a su alto contenido nutricional de la fruta y la variedad de alimentos que proporciona, nativos prepararon su

fruto de distintas maneras correspondiente a cada región (Patiño, 1989). Las diferentes preparaciones han cambiado con el tiempo y algunas tienen potencial comercial significativo y otras se han vuelto muy tradicionales de los pueblos indígenas, como en Colombia o Brasil se realiza una bebida con el mesocarpio de la fruta mezclada con leche, azúcar y varios condimentos (Calvo, 1981) como se puede apreciar en las *Figuras 1 y 2*. Hoy en día la Chonta proporciona alimentos de una dieta diaria, como fruta y palmito. Además, los tallos maduros y las hojas maduras se utilizan para la construcción de casas, medicina y construcción artesanal de las comunidades o pueblos indígenas (CORPOICA, El cultivo de chontaduro (*Bactris Gasipaes*), 1996).



**Figura 1.** Chicha de Chonta

Recuperado de: <[http://i.eldiario.com.ec/fotos-manabi-ecuador/2016/12/20161228040000\\_bebida-de-ritual.jpg](http://i.eldiario.com.ec/fotos-manabi-ecuador/2016/12/20161228040000_bebida-de-ritual.jpg)> Imagen de: eldiario ecuador.



**Figura 2.** Cultivo de palmito y fruto de la chonta.

Fuente: (CORPOICA, 1996)

Investigaciones realizadas en Brasil presentan resultados obtenidos al caracterizar la palma de Chonta en microestructura, mesoestructura y macroestructura. La microscopía óptica se realizó para el microanálisis estructural. El procesamiento digital de imágenes se utilizó para caracterizar la macroestructura, la variación de la fracción de volumen de fibra (RVE). Además, se llevó a cabo una investigación experimental para determinar las propiedades físicas básicas (humedad y gravedad específica) y propiedades mecánicas de tensión, flexión y torsión, generando como resultado la resistencia máxima a la tracción (TS), el módulo de elasticidad a la tracción (TMOE), módulo de elasticidad de flexión (BMOE) y módulo de rigidez (MOR) (Martinez, 2013; Vargas, 2015; Bacellar & R, 2009) como se pueden ver en las Tablas 1 y 2 a continuación:

**Tabla 1.**

*Resistencia a la tensión y módulo de Young de la Bactris Gasipaes Kunth*

Edad árbol (años)	Núm. probetas	Tensión máxima (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Desviación estándar	Distribución de probabilidad	Contenido de humedad MC (%)
6	20	76,98	25142,9	4,3	Weibull	14,91
20	20	103,23	22966,0	7,5	Weibull	16,87

Fuente: (Martinez, 2013)

**Tabla 2.**

*Módulo de Elasticidad de la Bactris Gasipaes Kunth*

Edad árbol (años)	Núm. probetas	Módulo de Elasticidad (GPa)	Desviación estándar
6	14	21,444	1,15
20	14	24,703	1,90

Fuente: (Martinez, 2013).

### 1.3. Definición Del Proyecto

En el diseño de elementos la selección de un material se basa a partir del conocimiento de las propiedades mecánicas de este, tales como su resistencia, dureza, elasticidad, etc., debido a que los elementos que se van a diseñar se encontrarán sometidos a diferentes cargas, las cuales deben ser soportadas (Budynas & Nisbett, 2008). La determinación de las propiedades mecánicas estáticas de los materiales sólidos se las realiza mediante ensayos destructivos, en muestras estandarizadas del material; lo que quiere decir que las muestras son sometidas a la acción de una fuerza hasta que fallan (Pytel & Singer, 1994).

La caracterización dinámica de elementos formula que se puede medir de forma no destructiva mediante el uso de ensayos no destructivos (END), basados en el almacenamiento de energía y propiedades de disipación de materiales de madera. A nivel microscópico, las propiedades de almacenamiento de energía se controlan mediante la orientación de las células y composición estructural, factores que contribuyen a la elasticidad y la resistencia estática. Estas propiedades son observables como frecuencia de oscilación en la transmisión de vibración o velocidad del sonido. Debido a esto la frecuencia de la vibración libre o las mediciones de atenuación de ondas acústicas se las puede utilizar para observar las propiedades de disipación de energía en la madera y otros materiales (Baker, 2001).

El estudio plantea realizar ensayos mecánicos de flexión estática y dinámica, para determinar el Módulo de Elasticidad (MOE) estático y dinámico, de la madera de chonta producida en el Ecuador. Conjuntamente se realizará ensayos de tracción y compresión

paralela y perpendicular a la fibra, para obtener las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción y compresión paralela y perpendicular a la fibra respectivamente. Datos que servirá para futuros trabajos de investigación en materiales compuestos.

Los ensayos destructivos con sus respectivas probetas se guiarán bajo los procedimientos de las normas NTC 301, ASTM D143 y ASTM D2395. Las probetas por analizar deben ser como mínimo 30 y si se puede obtener del lugar de origen, estas deben provenir de por lo menos 5 árboles diferentes (INCOTEC, 2007), con el fin de que las mismas tengan diferentes densidades. Cada probeta se ensayará en la máquina de ensayos universales del laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Para la obtención del MOE dinámico se realizará mediante las normas ASTM E1875 y ASTM E1876, en las cuales da a conocer los regímenes de los experimentos donde se considera la aplicación de la teoría ondulatoria unidimensional a la barra elástica homogénea. Así como el procedimiento de Martínez, Almeida. (2017) en su proyecto de investigación “Caracterización dinámica de la madera de balsa de Ecuador”, la cual se basa en la técnica de vibración en vigas. Las probetas se ensayarán en el banco de pruebas del proyecto de investigación mencionado anteriormente ubicado en el laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Realizar la caracterización del módulo de elasticidad estático y dinámico de la madera *Bactris Gasipaes* (Chonta) de Ecuador.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Determinar el valor del módulo de elasticidad, utilizando la norma de ensayos mecánicos ASTM.
- Obtener las curvas de comportamiento dinámico, Aceleración vs Tiempo, espectro de frecuencias y obtención del MOE dinámico en madera de *Bactris Gasipaes* (Chonta) de Ecuador.
- Determinar la resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra, y la resistencia a la tracción paralela a la fibra.
- Comparar los resultados obtenidos de la caracterización entre el MOE estático y el MOE dinámico.

## **1.5. Justificación e Importancia**

En el Ecuador la palma de Chonta (*Bactris Gasipaes*) tiene múltiples usos, la que más destaca es el cultivo para obtener el palmito a partir de la sección apical del tronco para posteriormente ser exportada a diferentes países. Desde el 2008 hasta el 2011 fue el primer exportador de palmito procesado con el 57% del mercado mundial (CORPEI, 2009; Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013). Sus demás usos como la comercialización y consumo del fruto (Chontaduro), bebidas fermentadas o la fabricación



de harina a partir del mismo son conocidos solamente por comunidades de la Costa y Amazonía, al igual que el uso de la madera para la fabricación de muebles, artesanías, instrumentos musicales y vigas o pilares para sus construcciones (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013).

Lamentablemente estas otras aplicaciones no han sido explotadas aun existiendo un gran nicho de mercado. A nivel mundial, países como Brasil y Costa Rica han desarrollado en los últimos años investigaciones sobre el tema, debido a su uso en la construcción tradicional (Mora-Urpi & Echeverria, 1999; Martinez, 2013). Hoy en día el nivel de investigación acerca de la caracterización estática y dinámica de la madera de Chonta en el país es escaso. Por lo tanto, el estudio planteado en el presente proyecto es importante para conocer las propiedades mecánicas de la madera de Chonta, específicamente de la Amazonía. De esa manera ser una referencia para fomentar la plantación de esta palma para fines de extracción de su madera y explotar su aplicación en la construcción, a su vez sea una base para nuevas aplicaciones y futuras investigaciones en la creación de materiales compuestos que sean de beneficio para el desarrollo de la ciencia y economía del Ecuador.

## **1.6. Alcance**

Se pretende de determinar las propiedades mecánicas de la madera *Bactris Gasipaes* (Chonta) específicamente el módulo de elasticidad estático y dinámico. Para la determinación de estas propiedades se realizarán ensayos mecánicos de flexión y la teoría de vibraciones en vigas, así como otros ensayos de tracción y compresión paralela

y perpendicular a la fibra; mediante protocolos de propia autoría y protocolos que se establecen en la norma ASTM D143, obteniendo las propiedades mecánicas de MOE estático, resistencia a la compresión y resistencia a la tracción. A la par junto con la metodología y el banco de prueba utilizados en el proyecto de investigación “Caracterización dinámica de la madera de balsa de Ecuador” obtener el MOE dinámico y compararlo con el MOE estático.

## CAPÍTULO II

### ESTADO DEL ARTE

#### 2.1. Origen, domesticación y distribución

La palma de Chonta es una planta nativa de América, varios autores no han podido determinar el lugar de origen debido a la extensa distribución geográfica, presente en las cuencas oriental y occidental del Amazonas, el lado occidente y noroeste de los Andes y determinadas costas sudamericanas (Camacho, 1972; CORPOICA, 1996; Mora-Urpí, Weber, & Clement, 1997). Poblaciones nativas han sido encontradas específicamente en Bolivia, Brasil, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Panamá, Perú y Venezuela (CORPOICA, 1996).

Su origen indeterminado y la extensa variedad morfológica, bioquímica y genética se apoyan a hechos precisos, tales como: mutaciones espontáneas a través del tiempo y la domesticación. Muchas especies silvestres con frutos pequeños podrían provenir de la palma de Chonta, debido a que mutaciones espontáneas dan lugar a frutos más grandes (Mora-Urpí, Weber, & Clement, 1997). Por otro lado, las comunidades indígenas antes de la era precolombina seleccionaban frutos con tamaños más grandes para seguir cultivando, práctica conocida como domesticación, realizada con fines de mejorar las características del fruto, como tamaño, forma, color, sabor y composición química (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013).

Por lo tanto, la palma de chonta posiblemente surgió de la repetición de la domesticación, el intercambio entre comunidades y alguna hibridación entre palmeras,

generando una gran diversidad (Martinez, 2013). No se sabe exactamente cuando los nativos indígenas empezaron a domesticar la planta, la comunidad Chibcha introdujo la palma de Chonta como alimento básico en Centroamérica, juzgando por las semillas encontradas en Costa Rica, los Chibchas pueden haber cultivado desde hace 2300 a 1700 años atrás (Mora-Urpí, Weber, & Clement, 1997).

Hoy en día la palma de chonta está presente en el norte de México y algunas islas del caribe, en la región amazónica (Brasil, Colombia, Ecuador, Perú, Venezuela), Guyanas y costas del pacífico de Ecuador y Colombia (Mora-Urpí, Weber, & Clement, 1997).

## **2.2. Taxonomía**

Humboldt y Bonpland introdujeron el nombre científico *Bactris Gasipaes* (Clement, 1988), pero la palma cultivada se conoce correctamente como *Bactris Gasipaes* Kunth (Uhl & Dransfield, 1987), el género *Bactris* pertenece al reino: Plantae; División: Magnoliophyta; Orden: Arecales; Familia: Arecacea.

La *Figura 3* muestra una amplia variedad morfológica local como se mencionó anteriormente, donde se clasificó en subconjuntos occidentales y orientales, basados en el tamaño del fruto, “microcarpa (<20g)”, “mesocarpa (20-70g)” y “macrocarpa (70-250g)” (Mora-Urpí, Weber, & Clement, 1997).

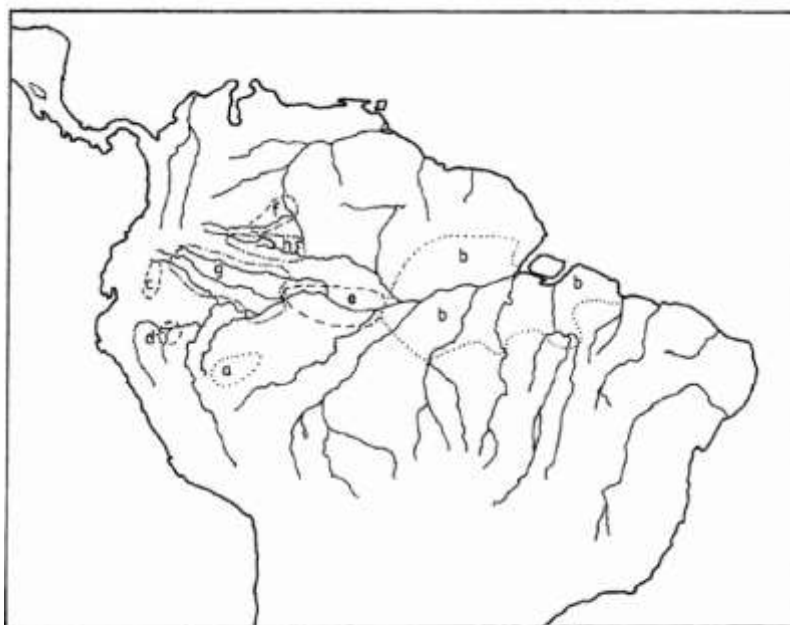
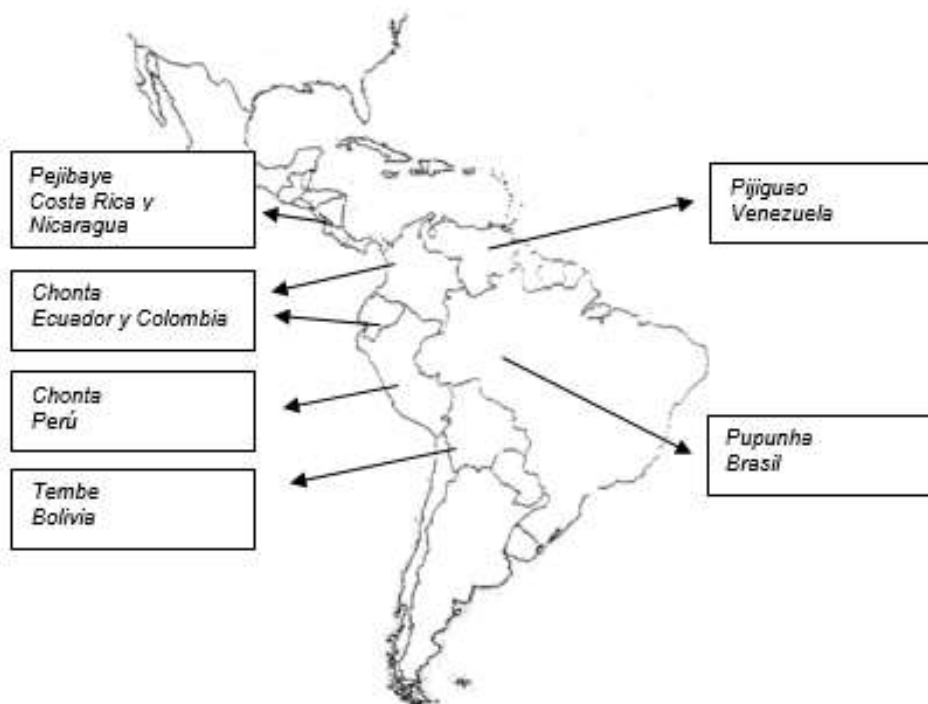


FIG. 3. Approximate distributions of the pejobaye (*Bactris gasipaes*) landraces found in Amazonia by the US AID expeditions. Dotted lines represent the "microcarpa" landraces: a. Juruá; and b. Pará. Dashed lines represent the "mesocarpa" landraces: c. Pastaza; d. Pampa Hermosa; e. Solimões; and f. Iniridá. Dashed and dotted lines represent the "macrocarpa" landraces: g. Putumayo; and h. Vaupés.

**Figura 3.** Origen, domesticación y distribución aproximada de la palma de chonta (*Bactris Gasipaes*)  
Fuente: (Clement, 1988)

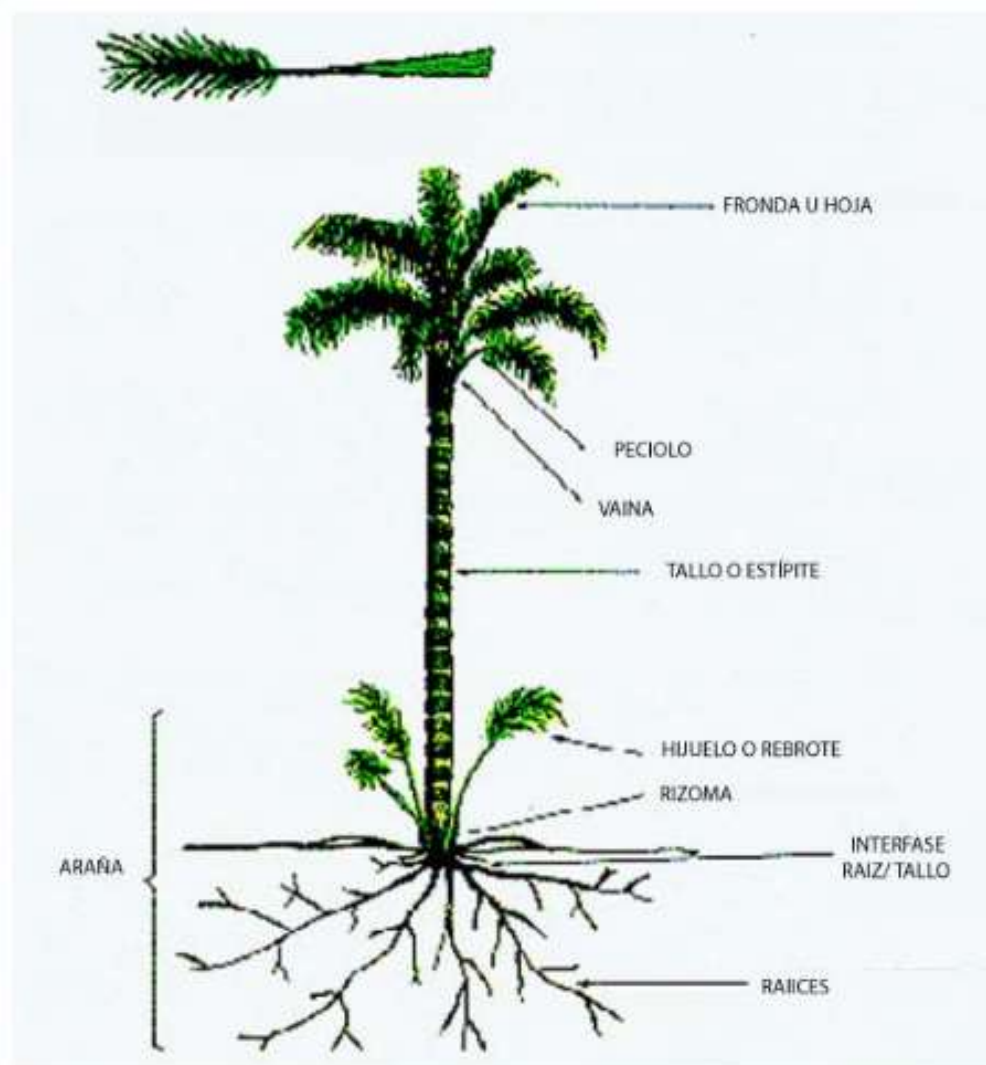
Debido a su distribución geográfica la palma implica un patrón complejo de variedades locales, en la *Figura 4* se indica la variedad de sinónimos comunes: *Guilielma speciosa* Martius, *Guilelma gasipaes* (kunth) Bailey, *Guilielma utilis* Oersted (Mora-Urpí, Weber, & Clement, 1997). Existen más de doscientos nombres para la *Bactris gasipaes* kunth, los más comunes son: Tembé o palma de castilla (Bolivia), Pupunha (Brasil), Chontaduro (Colombia y Ecuador), Pejobaye (Costa Rica y Nicaragua), Piba (Panamá), Pijigao o Macana (Venezuela), Pijuayo (Perú), Parepon (Guayana Francesa) (Patiño V. , 1960).



**Figura 4.** Mapa de los principales nombres regionales

### 2.3. Morfología

La palma de chonta crece rápidamente entre 1.5 a 2 metros por año, en la *Figura 5* se observa que tiene un tronco principal solitario o formado de rizomas cortos (cespitoso), cubierto densamente por espinas negras entre los nudos o en menor porcentaje sin espinas. Su corona está conformada de hojas arqueadas de gran longitud, presenta inflorescencia interfoliar en la base y posteriormente infrafoliar ramificada y con pocas espinas, un racimo de fruta para cada hoja. Sin embargo, solo desarrolla una cantidad de inflorescencias y racimos según el suelo y condición nutricional. El fruto es de tamaño variable y de geometría esférica u ovoide. (Mora-Urpí, Weber, & Clement, 1997; Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013)



**Figura 5.** *Morfología general de la palma de chonta.*

Fuente: (OTCA, 2003)

### 2.3.1. Tronco

Su forma es cilíndrica, de 8 a 25 centímetros de diámetro, 2 a 18 metros de alto y como se indica en la Figura 6 esta densamente cubierto de espinas negras de 5 a 15 cm de largo en los entrenudos o en menor porcentaje sin espinas. El palmito surge de la sección apical del tronco y de la sección basal de las nuevas hojas (interfoliar) (CORPOICA, 1996; Martínez, 2013; Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013).

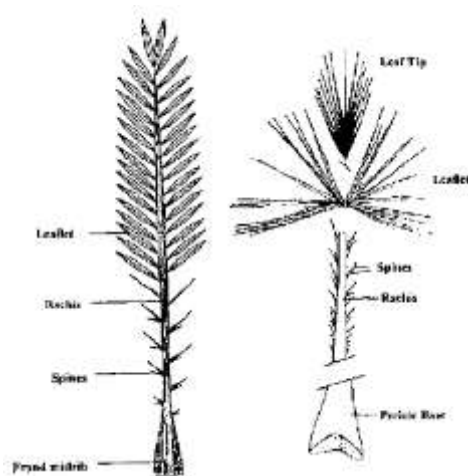


**Figura 6.** a) Entrenudos con espinas, b) Tronco.

Fuente: (Martinez, 2013; Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013)

### 2.3.2. Hojas

La *Figura 7* muestra, una corona formada de 10 a 30 hojas pinnadas arqueadas de 2 a 5 metros de largo, con raquis espinoso y resistente, las espinas son cortas y se encuentran a lo largo de la vaina, peciolo y nervadura. La vaina del peciolo mide entre 49 a 179 centímetros de largo, el raquis mide 179 a 396 centímetros de largo (*Figura 7*). Cuando la palma de chonta es joven presenta inflorescencias en la base de sus hojas, que posteriormente generan racimos de frutos (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013).



**Figura 7.** Hoja de la palma de chonta.

Fuente: (Martinez, 2013)



### 2.3.3. Flores y frutas

La palma de chontaduro es una planta monoica donde sus primeras inflorescencias aparecen alrededor del tercer o cuarto año (Camacho, 1972). En la Figura 8 se observa que las flores aparecen debajo de las hojas en forma de racimos, densamente cubiertas por espinas cortas, constan de un eje central con numerosas ramillas cubiertas de flores masculinas y femeninas (Camacho, 1972). Las flores masculinas son color crema-amarillo y de 2 a 6 mm de largo y 2 a 6 mm de ancho, con seis estambres dispuestos en pares en los lados de la corola. Las flores femeninas suelen ser de color amarillo, o raramente verde, de 3 a 13 mm de largo y 4 a 12 mm de ancho (*Figura 8*), ocasionalmente flores hermafroditas están presentes en la planta, especialmente en las plantas jóvenes (Mora-Urpí, Weber, & Clement, 1997).



**Figura 8.** a) Flor, b) Racimo lleno de frutos.  
Fuente: (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013)

En la *Figura 9* se observa que los frutos son drupas de geometría esférica a ovoide y de tamaño variable entre 1 a 12 x 1 a 17 cm, son de color amarillo a rojo en la madurez, aparecen después del tercer o quinto año de su plantación (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013). El racimo de frutos puede pesar hasta 19 kg, dependiendo

del origen, suelo y condiciones ambientales, puede tener entre 75 a 420 frutos con un peso individual que varía entre 6.7 y 244 gramos. Los frutos se cosechan generalmente 2 veces al año, miden entre 1 a 9 cm de diámetro, contienen 3.8 a 225 gramos de mesocarpio y maduran a los 3 o 4 meses (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013). Son fuente importante de carbohidratos, del mesocarpio se obtiene un aceite rico en ácidos grasos insaturado, de la nuez (endospermo) se extrae aceite rico en ácidos grasos saturados. Tiene bajas concentraciones de proteínas y minerales, pero se ha reportado la presencia de todos los aminoácidos esenciales, también potasio, selenio y cromo como los minerales más abundantes (CORPOICA, 1996; Mora-Urpí, Weber, & Clement, 1997; Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013).



**Figura 9.** Fruto de palma de chonta.

Fuente: (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013)

## 2.4. Cultivo y manejo

### 2.4.1. Clima

La planta crece en climas cálido-húmedo con temperaturas entre 24 a 28 °C, se desarrolla muy lentamente en condiciones de sombra del bosque motivo por el cual al estar en su etapa de madurez requiere plena luz solar para la producción óptima de flores,

frutos y retoños. A su vez necesita un clima con precipitaciones abundantes, pero bien distribuidas entre 2000 a 5000 mm/año (CORPOICA, 1996; Zamora, 2003).

#### **2.4.2. Topografía**

La planta se adapta a una amplia gama de condiciones ecológicas, razón por la cual explica su extensa distribución geográfica en los trópicos y subtrópicos húmedos de América Latina, de 0 a 1300 msnm, pero su rango óptimo de altitud es menor a los 800 msnm. Posee la capacidad de soportar elevadas concentraciones de humedad atmosférica (mayor al 80%) durante periodos prologados, sin embargo, se desarrolla muy lentamente si el bosque presenta mucha sombra, debido que para la producción óptima de flores, frutos y retoños en su etapa de madurez requiere plena luz solar (Mora-Urpí, Weber, & Clement, 1997; Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013).

#### **2.4.3. Suelo**

La palma de chonta es muy productiva en suelos relativamente profundos, fértiles y bien drenados, pero también se adapta a suelos de baja fertilidad, altamente erosionadas con un 50% de suelos ácidos (pH entre 6.0 a 7.0), no tolera los suelos pantanosos. Puede resistir temporadas secas relativamente cortas entre 3 a 4 meses si los suelos no son excesivamente arenosos, pero las estaciones secas reducen significativamente el crecimiento y el rendimiento en la producción de frutos, otro factor que afecta la producción a largo plazo es si al suelo no se le aporta nutrientes adicionales en su etapa de crecimiento (Játiva, 1998; Mora-Urpí, Weber, & Clement, 1997).

## 2.5. Usos generales

En la era precolombina varios productos fueron proporcionados por la palma de chonta a pueblos amerindios de América Latina (Patiño, 1989), el principal fue brindarles alimentos básicos a partir de su fruto o tronco, gracias al alto contenido nutricional de la fruta y la variedad de alimentos que proporciona (Calvo, 1981).

Hoy, la palma de chonta está asociada a otros productos, como el fruto y el palmito que se consumen directamente en una dieta diaria. Además, los tallos maduros y las hojas maduras se utilizan para la construcción de granjas (CORPOICA, 1996). Muchas de sus partes también han servido a comunidades indígenas como medicina y construcción artesanal. Algunos de los usos según partes de la estructura y productos de la planta son los siguientes:

### 2.5.1. Madera del tronco

Es dura, de color café oscuro con vetas café claro, en el Ecuador se la utiliza para la elaboración de artesanías, pisos, muebles, vigas, encofrados, paneles y barandas. En la *Figura 10* muestra como los pueblos indígenas han utilizado esta madera para la fabricación de armas tales como flechas, arcos, cerbatanas y lanzas, a su vez como columnas y pilares de sus casas (Mora-Urpí, Weber, & Clement, 1997; Barrueco, 2007; Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013).

No existen plantaciones en el país con fines de extracción de madera (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013), como en otros que se la utiliza para la construcción

de casas como en Colombia, Brasil y Perú, o para la fabricación de muebles, instrumentos musicales y obsequios (Rutter, 1990; Garzón, y otros, 1993).



**Figura 10.** Arcos de flecha.

Recuperado de: [http://2.bp.blogspot.com/-6GWM\\_fZnL6c/UUkKj86YQkl/AAAAAAAAAHdw/hz4A82CiGkQ/s1600/DSC\\_0253.JPG](http://2.bp.blogspot.com/-6GWM_fZnL6c/UUkKj86YQkl/AAAAAAAAAHdw/hz4A82CiGkQ/s1600/DSC_0253.JPG)> Imagen de: Ecoamazónico.

### 2.5.2. Hojas

Se usa como alimento en Colombia; como pinturas en Perú y como se muestra en la *Figura 11* como techo de casas en Brasil y Ecuador (Brooks, 1984; Duke, 1977; Grazón y otros,1993).

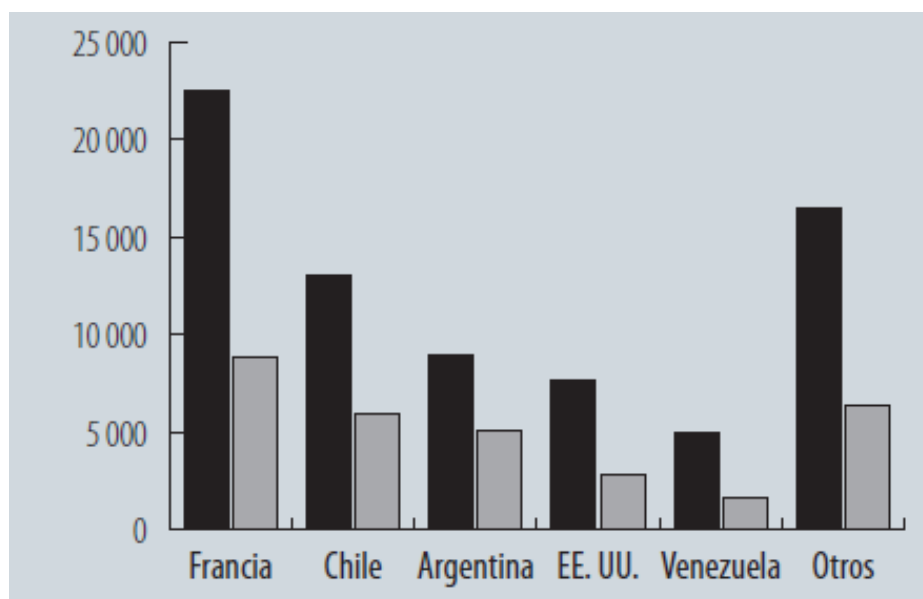


**Figura 11.** Casa indígenas amazónicas con hojas de chonta en el techo.

Recuperado de: [http://www.elcomercio.com/files/article\\_main/uploads/2016/10/28/5813d459a728d.jpeg](http://www.elcomercio.com/files/article_main/uploads/2016/10/28/5813d459a728d.jpeg)> Imagen de: Modesto Moreta.

### 2.5.3. Palmito

Existen más de 10,000 ha de cultivos en Costa Rica y alrededor de 8,000 ha en Brasil para la obtención de este producto. En el Ecuador el cultivo se realiza a escala industrial en la Costa y la Amazonía debido a las exportaciones que en los últimos años ha crecido. A nivel nacional su consumo no es significativo, pero en el exterior es un producto apreciado para las ensaladas, gracias a ello es exportado a nivel mundial. El Palmito proviene de la sección apical del tronco y de la sección basal de las hojas nuevas (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013; CORPEI, 2009). Es de color blanco y textura suave, es un alimento rico en carbohidratos bajo en grasa y proteínas con una significativa cantidad de vitamina C (Clement, y otros, 2004). En el 2011 Ecuador fue el primer exportador de este producto procesado, teniendo una gran alza a lo largo de los años tanto en valores como en volúmenes (*Figura 12, Figura 13*).



**Figura 12.** Principales mercados del palmito ecuatoriano.

Fuente: (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013)



**Figura 13.** Cosecha de palmito, transporte de palmitos, venta de palmito procesado.

Fuente: (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013)

#### 2.5.4. Fruto

Tiene alto valor nutritivo, categorizado como una fuente importante de carbohidratos y grasas donde se lo puede comparar con la papa el arroz o la yuca. A pesar de todas las características mencionadas este no es explotado industrialmente sino solo de manera local (Vargas, 2015; Castillo, 2015).

Para su consumo este fruto debe ser hervido para eliminar sustancias químicas, luego se pela el fruto y se prepara la pulpa de la semilla, donde se obtiene la nuez que los pueblos indígenas lo consumen en coladas. La pulpa extraída se aísla y se la deja fermentar se la almacena y posteriormente se utiliza para obtener una bebida fermentada (Chicha), artesanalmente se realizan mermeladas y harinas. La elaboración de la chicha de chonta es muy conocida en los pueblos de la Amazonía y de la Costa, siendo un alimento indispensable para sus comunidades o como una bebida refrescante, cuando se la mezcla con agua (Barrueco, 2007).



En la *Figura 14* indica la comercialización local de este fruto en el Ecuador, en las ciudades principales del país no se conoce sus productos ni sus derivados, debido al poco conocimiento de los valores nutritivos este producto no ha sido explotado como en países aledaños, Colombia reporta con 7 000 hectáreas para comercialización del fruto, en Costa Rica este producto es consumido por todo el país y consta con 1 500 hectáreas (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013).



**Figura 14.** Frutos de chontaduro, pulpa fermentada de chontaduro cubierta con hojas de plátano, frutos secos y cocinados para la venta.

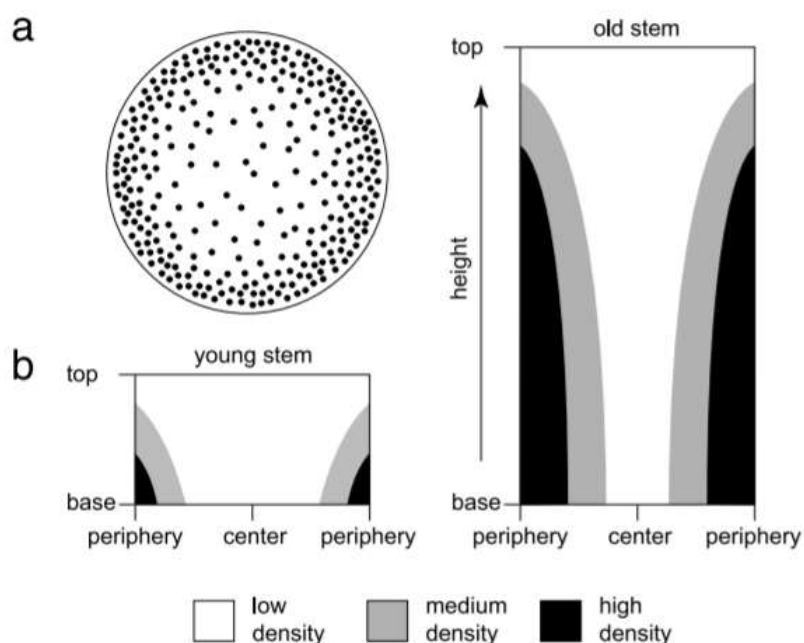
Fuente: (Valencia, Montúfar, Navarrete, & Balslev, 2013)

## 2.6. Anatomía del tronco

La raíz sirve para las funciones básicas de soporte mecánico. El interior del tronco de la palma de chonta se compone de un cilindro central con tejido leñoso y una estrecha región cortical. Los haces vasculares se distribuyen por todo el cilindro central, pero usualmente se concentran hacia la periferia.



En la *Figura 15* muestra como cada haz tiene vainas fibrosas, pero las que se encuentran en la periferia del tallo tienen vainas más extensas. En consecuencia, la fuerza y rigidez se concentra hacia la porción externa del tallo (Rich, 1987). La porción externa consiste en una corteza estrecha que se compone de parénquima de suelo y hebras fibrosas o fibrovasculares (Rich, 1987). Estudios de anatomía del desarrollo realizados por Rich (1985; 1986) en dos diferentes especies de tallos de palma *Welfia georgii* e *Iriartea gigantea* mostraron que los haces vasculares se concentraron hacia la periferia del tallo y los periféricos contenían más fibras que los haces centrales.



**Figura 15.** (a) Esquema de la sección transversal de una palmera, compuesta de fibras que varían su volumen en función al radio, produciendo un gradiente radial. (b) Representación esquemática de la distribución del tejido del tallo de palma joven (izquierda) y un tallo de palma vieja (derecha) (según Rich, 1987).

Fuente: (Wegst, 2011)

Los estudios de la anatomía del desarrollo del tallo demostraron la importancia de los cambios secundarios debajo de la corona. La expansión celular sostenida permite un

aumento limitado pero significativo del diámetro del tallo en muchas especies de palmeras (Wegst, 2011).

La esclerificación o producción de esclerénquima (soporte tisular de ciertas plantas formadas por células muertas en la madurez), da como resultado mayores incrementos en la rigidez y resistencia del tallo en todas las palmas arborescentes.

## 2.7. Palma de bambú y chonta como material compuesto

Una característica compartida entre las dos plantas es que la distribución de las fibras alineadas paralelamente al tronco no es uniforme. Las palmeras y el bambú tienen un gradiente radial de fibras paralelas en base a su densidad, en una matriz de células tipo panal, característica que aumenta su rigidez a la flexión (Wegst, 2011).

Se puede lograr una evaluación preliminar del comportamiento mecánico de los materiales compuestos en el rango elástico usando la regla de mezclas, que es un grupo de ecuaciones que da los valores de las propiedades mecánicas de los compuestos basados en las propiedades mecánicas y la fracción de volumen de sus constituyentes, fibras y matriz (Ghavami, Rodrigues, & Paciornik, 2003). Como ejemplo, la ecuación (1) muestra cómo establecer el módulo de Young para un material compuesto que conoce los valores del módulo de Young de las fibras y la matriz y sus fracciones de volumen.

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (1)$$

La hipótesis en el desarrollo de las ecuaciones de la regla de mezclas supone fibras largas y alineadas, con una unión perfecta entre fibras y matriz y fibras dispuestas uniformemente dentro de la matriz. Sin embargo, se observa que tanto el área como la

distribución de las fibras no son uniformes, variando a través del grosor de los tallos de bambú y las palmeras (Ghavami, Rodrigues, & Paciornik, 2003). Muchos trabajos de investigación han demostrado cómo el Bambú puede clasificarse como un material compuesto funcionalmente graduado debido a su composición y distribución de fibra, que sigue un patrón organizado con mayor concentración de fibras en la superficie externa del tronco (Ghavami & Solorzano, 1995; Amada, 1996). Según Wegst (2011), la palma de chonta tiene una disposición similar de fibras alrededor de la matriz. Para que sea posible aplicar las ecuaciones de la regla de la mezcla, es necesario modificar estas ecuaciones para considerar la variación de la fracción de volumen de las fibras a lo largo de su espesor. Admitiendo un eje "x" en la dirección radial transversal de la caña de bambú y palmeras con su origen en la superficie interna del tallo y su límite máximo en la superficie externa, las ecuaciones de la regla de las mezclas se pueden utilizar en la ecuación (2) (Ghavami, Rodrigues, & Paciornik, 2003)

$$E_c = f(x) = E_f V_f(x) + E_m(1 - V_f(x)) \quad (2)$$

Dado que las ecuaciones utilizadas para modelar el comportamiento de los materiales compuestos asumen una distribución uniforme de las fibras en la matriz, (Ghavami, y otros, 2003) pudieron aplicar las ecuaciones de la regla de la mezcla para analizar el bambú considerando la variación de la fracción de volumen de las fibras a lo largo de su espesor. Esta ecuación se puede utilizar para el árbol de chonta, con una imagen digital de la sección transversal y la ayuda de nuevas herramientas para el procesamiento de imágenes digitales teniendo en cuenta la función de las fibras en relación con el espesor (Martinez, 2013).

## 2.8. Propiedades físicas

La madera, como muchos materiales naturales, es higroscópica; absorbe la humedad del ambiente circundante. El intercambio de humedad entre la madera y el aire depende de la humedad relativa, la temperatura del aire y la cantidad actual de agua en la madera. Esta relación de humedad tiene una influencia importante en las propiedades y el rendimiento de la madera (Glass & Zelinka, 2010), las propiedades que se describen a continuación son las más relevantes para este proyecto.

### 2.8.1. Contenido de humedad

Muchas propiedades físicas y mecánicas de la madera dependen del contenido de humedad de la madera (Glass & Zelinka, 2010). El contenido de humedad (CH) generalmente se expresa como un porcentaje y operacionalmente de una pieza de madera puede calcularse a partir de:

$$CH = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{dry}} (100\%) \quad (3)$$

Donde:

$m_{wet}$ : es la masa del espécimen a un contenido de humedad dado y,

$m_{dry}$ : es la masa del espécimen seco.

### 2.8.2. Densidad y gravedad específica

La densidad  $\rho$  de una sustancia se define como la relación entre su masa y su volumen y se expresa en el sistema internacional (SI) en unidades de kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg m}^{-3}$ ), o en el sistema de centímetro-gramo-segundo (CGS) en unidades de gramos por centímetro cúbico ( $\text{g cm}^{-3}$ ) (Glass & Zelinka, 2010). El sistema CGS es

conveniente debido a su relación con la gravedad específica (también conocida como densidad relativa). La gravedad específica  $G$  se define como la relación entre la densidad de una sustancia y la densidad del agua  $\rho_w$  a una temperatura de referencia específica, generalmente  $4^\circ \text{C}$ , donde  $\rho_w$  tiene un valor de  $1.000 \text{ g cm}^{-3}$  (Glass & Zelinka, 2010).

A temperatura constante, la densidad de los materiales que no adsorben la humedad es constante. Para los materiales que adsorben la humedad, pero no cambian el volumen, como la piedra y el ladrillo, la densidad depende del contenido de humedad. A diferencia de estos materiales, para la madera, tanto la masa como el volumen dependen del contenido de humedad (Glass & Zelinka, 2010).

## **2.9. Propiedades mecánicas**

### **2.9.1. Propiedades elásticas**

Se necesitan doce constantes (nueve son independientes) para describir el comportamiento elástico de la madera: tres módulos de elasticidad  $E$ , tres módulos de rigidez  $G$  y seis coeficientes de Poisson  $\mu$  (Kretschmann, 2010). Las relaciones generales entre el estrés y la tensión para un material ortotrópico homogéneo se pueden encontrar en textos sobre la elasticidad anisotrópica (Kretschmann, 2010).

#### ***Módulo de elasticidad***

La elasticidad implica que las deformaciones producidas por la baja tensión son completamente recuperables después de eliminar las cargas (Méndez, 2005). Cuando se carga a niveles de tensión más altos, se produce deformación o falla plástica. Los tres módulos de elasticidad, que se indican mediante  $E_L$ ,  $E_R$  y  $E_T$ , respectivamente, son los

módulos elásticos a lo largo de los ejes longitudinal, radial y tangencial de la madera (Kretschmann, 2010). Estos módulos generalmente se obtienen a partir de pruebas de compresión; sin embargo, los datos para ER y ET no son extensos. Las propiedades elásticas y las constantes elásticas varían dependiendo de la especie, el contenido de humedad y la gravedad específica (Kretschmann, 2010). El módulo de elasticidad se determina por flexión, EL, más que por una prueba axial, puede ser el único módulo de elasticidad disponible para una especie (Méndez, 2005; Kretschmann, 2010).

### **2.9.2. Propiedades de resistencia**

Las propiedades mecánicas comúnmente medidas y representadas como "propiedades de resistencia" para el diseño incluyen el módulo de ruptura al doblar, el esfuerzo máximo en compresión paralelo al grano, el esfuerzo de compresión perpendicular al grano y la resistencia al corte paralelo al grano (Kretschmann, 2010). A menudo se realizan mediciones adicionales para evaluar el trabajo hasta la carga máxima en flexión, resistencia a la flexión por impacto, resistencia a la tracción perpendicular al grano y dureza (Méndez, 2005; Kretschmann, 2010).

#### ***Resistencia a la compresión paralela al grano***

Tensión máxima sostenida por una compresión paralela a la muestra de grano que tiene una relación de longitud a dimensión menor de menos de 11 (Kretschmann, 2010).

#### ***Esfuerzo compresivo perpendicular al grano***

Se lo entiendo como estrés en el límite proporcional. No hay un estrés definitivo claramente definido para esta propiedad (Kretschmann, 2010).

### ***Resistencia a la tracción perpendicular al grano***

Resistencia de la madera a las fuerzas que actúan sobre el grano y que tienden a dividir un miembro (Kretschmann, 2010).

### ***Resistencia a la tracción paralela al grano***

Tensión máxima de tracción sostenida en dirección paralela al grano. Se dispone de relativamente pocos datos sobre la resistencia a la tracción de varias especies (Kretschmann, 2010).

## **2.10. Ensayos no destructivos (END) en madera**

Las técnicas de prueba no destructivas para madera difieren en gran medida de las de materiales isotrópicos homogéneos como metales, vidrio, plásticos y cerámica. En los materiales, cuyas propiedades mecánicas son conocidas y controladas estrechamente por los procesos de fabricación, las técnicas END se utilizan para detectar la presencia de discontinuidades, vacíos o inclusiones (Ross, 1991). Debido a que este material es un material biológico, donde estas irregularidades ocurren naturalmente y, además, pueden ocurrir debido a las agencias de degradación en el medio ambiente. Por lo tanto, estas nuevas técnicas se utilizan para medir cómo interactúan las irregularidades naturales y ambientales en un miembro de la madera para determinar sus propiedades mecánicas (Galligan, Pellerin, & Brashaw, 1991).

Los investigadores de productos forestales examinaron enérgicamente varias técnicas para clasificar madera estructural y evaluar la calidad de los materiales laminados (Bell, y otros, 1950; Galiginaitis, y otros, 1954; James, y otros, 1959; Jayne, 1955; Jayne ,1959; Hoyle, 1961; McKean y Hoyle, 1962; Senft, y otros, 1962). De todos ellos se desarrolló una hipótesis, basada en propiedades fundamentales del material, para establecer relaciones entre los parámetros de los END y las propiedades mecánicas estáticas de los productos de madera. La hipótesis fundamental fue presentada por primera vez por Jayne (1959), donde propuso que las propiedades de almacenamiento y disipación de energía en la madera pueden medirse de forma no destructiva utilizando una variedad de técnicas estáticas y dinámicas, controladas por los mismos mecanismos que determinan el comportamiento mecánico de dichos materiales. Como consecuencia, las relaciones matemáticas útiles entre estas propiedades y el comportamiento elástico y de resistencia deberían ser alcanzables a través de métodos de análisis de regresión estadística (Ross, 1991).

Los primeros estudios fueron exitosos al demostrar una relación entre el almacenamiento de energía y las propiedades de disipación, medida utilizando técnicas de vibración transversal forzada, y las propiedades de flexión estática de especímenes pequeños de madera clara. La técnica se basaba en forzar a un miembro a flexión produciendo oscilaciones transversales. Pellerin (1965) verificó la hipótesis utilizando técnicas de vibración transversal libre y madera de dimensiones. Kaiserlik y Pellerin (1977) promovieron la hipótesis mediante el uso de técnicas de ondas de tensión



(oscilación longitudinal) para evaluar la resistencia a la tracción de una pequeña muestra de madera clara que contenía diversos grados de pendiente de grano.

## **2.11. Desarrollo de ensayos no destructivos (END) en madera**

La madera es heterogénea, contiene nudos y otras características que se consideran atributos en algunos productos y defectos en otros, los ensayos no destructivos en este material tienen como objetivo la detección y cuantificación de dichas características para aumentar la eficiencia en su uso (Galligan, Pellerin, & Brashaw, 1991).

### **2.11.1. Espectro visible como END**

El infrarrojo se ha utilizado para observar los patrones de grano a fin de clasificar la chapa de alto precio; actualmente también sirve como la base de un sistema de medidor de humedad. La luz en el rango visible se ha usado para detectar nudos y otros defectos en la clasificación de la chapa de madera blanda (Galligan, Pellerin, & Brashaw, 1991).

La radiación en el espectro ultravioleta se usa para estudiar la microestructura de la madera. Los rayos X se han usado comercialmente para encontrar la descomposición en los polos de potencia y otros productos. Los rayos gamma y los neutrones también se los se utiliza como detectores de humedad, que pueden separar la densidad de la madera de la medición de la humedad (Galligan, Pellerin, & Brashaw, 1991).

### **2.11.2. Propiedades eléctricas usados como END**

La conductividad se utiliza para medir porcentaje de humedad debido a que esta propiedad es proporcional al contenido de humedad e independiente de la densidad.

Otras características eléctricas, como las propiedades dieléctricas, se utilizan en importantes sistemas comerciales de control de la humedad. Todas estas técnicas son no destructivas; todos requieren calibración para predecir el contenido de humedad (Galligan, Pellerin, & Brashaw, 1991).

### **2.11.3. Ultrasonidos**

Se han usado para detectar la descomposición en los polos de potencia en servicio, cuantificar los complicados patrones de grano en la madera para el mecanizado posterior, medir el módulo de elasticidad en productos de tamaño completo y para estudiar los enlaces de un pegamento malo (Galligan, Pellerin, & Brashaw, 1991).

### **2.11.4. Microondas**

Su aplicación ha sido bastante limitada, su señal responde a muchas características de la madera, pero las interacciones a veces limitan el uso. Un ejemplo es la respuesta a la gravedad y humedad específica. Se necesita más investigación sobre la aplicación de microondas en la madera (Galligan, Pellerin, & Brashaw, 1991).

### **2.11.5. Vibración y ondas de tensión**

Son ondas de compresión inducidas por un impulso de choque o por un impacto. La investigación sobre las ondas de estrés ha sido extensa en la Universidad Estatal de Washington en Pullman y en el Laboratorio de Productos Forestales de los Estados Unidos en Madison (Galligan, Pellerin, & Brashaw, 1991). La aplicación principal, hasta la fecha, es para el cálculo del módulo de elasticidad a través de la medición del tiempo

de tránsito de la onda de choque y la densidad del miembro. Esto se aplicó con éxito a la madera aserrada, troncos y postes, y a productos de paneles de partículas reconstituidos. Los dispositivos comerciales están disponibles en diferentes configuraciones que permiten tamaños de prueba que van desde muestras pequeñas en un banco de laboratorio hasta grandes vigas laminadas en el lugar (Ross, 1991).

Una de las aplicaciones recientes más prometedoras de los sistemas de ondas de tensión es la identificación del decaimiento y la predicción del efecto de la desintegración sobre la resistencia (Ross, 1991). Esto ha sido durante mucho tiempo un área de interés intencionado, pero complicado por la naturaleza de la madera y la descomposición. El deterioro por hongos en descomposición, tienen un efecto perjudicial sobre las propiedades mecánicas de la madera y se encuentran comúnmente en las estructuras hechas con este material, se ha limitado a estudios que solo han empleado parámetros de almacenamiento de energía (Wang y otros. 1980). Por ejemplo, descubrieron que la frecuencia de oscilación de los especímenes plegables en voladizo pequeños, de pino oriental y albura, se veía significativamente afectada por la presencia de hongos (Pellerin, 1985) demostró que la velocidad de la onda de estrés podría usarse con éxito para controlar la degradación de muestras pequeñas de madera clara expuesta a hongos. Donde se encontró una fuerte relación correlativa entre la velocidad de la onda de esfuerzo y la resistencia a la compresión paralela al grano de la madera expuesta. Rutherford (1987) mostró resultados similares. También reveló que el MOE perpendicular al grano, medido utilizando técnicas de ondas de estrés, se vio significativamente

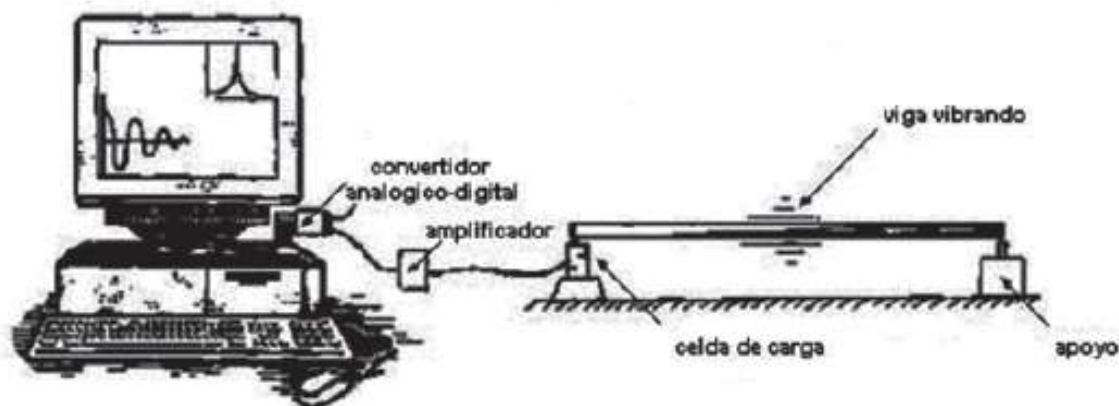
afectado por la degradación de la pudrición parda y podría usarse para detectar la descomposición incipiente.

## **2.12. Módulo de elasticidad dinámico**

Un importante uso industrial de la madera es como un elemento estructural, no solo en la construcción de viviendas familiares, sino también en estructuras comerciales e industriales como sistemas de techos y puentes. Al igual que con cualquier material de ingeniería, las propiedades de diseño describen el rendimiento de la fuerza axial, de flexión o de aplastamiento (Ross, 1991).

Durante muchos años, estas propiedades se establecieron para la madera sobre la base de pruebas de muestras pequeñas (ensayos destructivos). Con el avance de la tecnología y el uso ampliado de este material en las estructuras de ingeniería, ahora se pone más énfasis en las pruebas de productos de tamaño completo (Ross, 1991).

El módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de ruptura (MOR), pueden representarse por el almacenamiento y disipación de la energía, que se las puede obtener mediante frecuencia de oscilación en vibración o la velocidad de transmisión del sonido (Ross & Pellerin, 1994). Donde se pueden establecer relaciones matemáticas entre las propiedades vibratorias de la madera y el comportamiento estático elástico y la resistencia, a través de análisis estadísticos de regresión lineal. El MOE dinámico puede ser determinado usando la frecuencia de resonancia de vibración de manera sencilla (Baettig 2001), la Figura 16 muestra el primer prototipo de medición de frecuencia de vibración.



**Figura 16.** Prototipo de medición de frecuencia de vibración.  
Fuente: (Troncoso & Palma, 2009)

Para la evaluación del MOE se puede seguir la implementación de las normas ASTM E1876 y ASTM E1875, las cuales explican la metodología para caracterizar de manera no destructiva la madera. La primera utiliza la técnica de vibración transversal simple, IET (impulse excitation of vibration technique), estimulando a la probeta mediante impactos de duración corta con respecto a la oscilación que produce. La segunda norma utiliza una técnica de vibraciones transversales forzadas SR (Sonic resonance), donde la vibración es estimulada periódicamente mediante algún transductor (Troncoso & Palma, 2009).

Ross y Pellerin (1991), revisiones acerca de las técnicas de END implementadas en estructuras de madera. En dicha publicación se expone la analogía entre el comportamiento de una viga simplemente apoyada vibrando libremente y la vibración de una masa atada a un resorte y un amortiguador. A partir de dicha analogía y tomando en cuenta la geometría de la viga (momento de inercia,  $I$  y longitud total,  $L$ ) y las condiciones de apoyo, es posible medir el módulo de elasticidad dinámico como:

$$MOE_{tv} = \frac{F_f^2 \times m \times L^3}{12.65 \times I} \quad (4)$$

$$MOE_{tv} = \frac{F_f^2 \times m \times L^3}{2,46 \times I} \quad (5)$$

Donde:

MOE<sub>tv</sub>: módulo de elasticidad dinámico por el método de vibraciones transversales [Pa],

F<sub>f</sub>: frecuencia fundamental de vibración [Hz],

m: masa de la pieza [kg],

L: largo total de la pieza [m],

I: segundo momento de inercia [m<sup>4</sup>].

La ecuación (4), se utiliza para condiciones de apoyo en los nodos de la vibración, vale decir, usando una luz de 55,2% de L (ASTM E1876, 2001) y la ecuación (5), para condiciones de apoyo cerca de sus extremos (Metriguard Inc.1990).

No existen investigaciones previas relacionadas a la obtención del módulo de elasticidad (MOE dinámico). Esta será la primera investigación en medir este módulo de la madera *Bactris gasipaes* Kunth (chonta) y realizar una comparación entre el MOE dinámico y el MOE estático.

### **2.13. Relación entre MOE estático y MOE dinámico**

La mayoría de las investigaciones se ocupan de la determinación del módulo de elasticidad en flexión (MOE) y su correlación con el módulo de ruptura en flexión (MOR), pero el parámetro predictor de fuerza más importante es el MOE (Divós & Tanaka, 2005). Este predictor ha sido determinado por métodos estáticos y dinámicos, varios autores (Perstorper, 1994; Tanaka y otros., 1991; Kliger y otros., 1992; Jugo & Ozarska, 1996)

compararon la determinación estática y dinámica del MOE y encontraron una buena correlación ( $r^2$ : 0,90-0,96) entre los dos valores de MOE (Divós & Tanaka, 2005).

### 2.13.1. Módulo elástico longitudinal dinámico ( $E_L$ )

Ilic (2011) en su estudio con madera de eucalipto obtuvo una relación lineal considerablemente ( $r^2 = 0,95$ ). La razón entre  $E_L$  y MOE estático se debe a los efectos del corte en la flexión, pero esta propiedad depende del tipo de prueba estática que se compara, la especie utilizada y el tamaño de la probeta. El módulo elástico longitudinal dinámico ( $E_L$ ) se calculó a partir de la solución estándar de la ecuación de onda para vibraciones longitudinales de una barra delgada con condición de soporte libre y libre; usando la siguiente ecuación (Kollman y Krech 1960)

$$E_L = \frac{4 L^2 f_m^2 \rho}{m^2} \quad (6)$$

Dónde:

$E_L$ : módulo elástico longitudinal dinámico [Pa],

L: longitud de la barra [m],

$f_m$ : la frecuencia resonante [Hz],

m: modo de vibración (= 1, 2, 3, ...) p. ej.  $f_1$  = modo fundamental,  $f_2$  = primer armónico, etc,

$\rho$ : densidad aparente [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ].

### 2.13.2. Módulo de elasticidad dinámico ( $E_F$ )

Esta propiedad está altamente relacionada con el MOE estático ( $r^2 = 0,98$ ) (Ross & Pellerin, 1994; Ilic, 2001). El módulo elástico longitudinal dinámico ( $E_L$ ) es útil para estimar el módulo de Young real en especímenes en los que el efecto del cizallamiento

contribuye significativamente a la flexión (Divós & Tanaka, 2005). El módulo dinámico  $E_F$  puede usarse para indicar claramente el módulo estático de Young (Ilic, 2001).

$$E_F = \frac{4\rho\pi f^2 L^2}{i^2 m^4} \quad (7)$$

Cuando ambos extremos de la viga son libres, y donde:

$E_F$ : módulo de elasticidad dinámico (Pa),

$\rho$ : densidad ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),

$i$ : el radio de giro de la sección transversal (m) (haz rectangular  $i^2 = h^2/12$ ,  $h$  = espesor en el plano de flexión),

$f$ : frecuencia de vibración de flexión (Hz),

$L$ : longitud del haz (m),

$m$ : 4.73 (raíces de  $\cos m \cosh m = 1$ , para el primer modo).



## CAPÍTULO III

### EXPERIMENTACIÓN

Este capítulo presenta el procesamiento y los procedimientos experimentales implementados para generar resultados sobre características microestructurales y macroestructurales del tronco de la palma de chonta. La observación microscópica se llevó a cabo para visualizar la microestructura y la caracterización de la macroestructura se llevó a cabo para determinar sus propiedades físicas y mecánicas. Se requiere la caracterización de la macroestructura para la descripción y el análisis utilizando los estándares existentes que respaldan los materiales convencionales.

#### 3.1. Origen del material, manejo y procesamiento

Se seleccionaron cinco árboles entre 30 a 35 años y con una longitud de 15 a 18 metros, de la región Amazónica del Ecuador, específicamente de la provincia de Zamora Chinchipe, cantón el Pangui (3°37'30"S - 78°35'14"O); altitud a 750 msnm.

**Tabla 3.**

*Características de la madera*

Datos Palma de Chonta	
<b>Edad (años)</b>	30 - 35
<b>Origen</b>	El Pangui (Ecuador)
<b>Altitud</b>	750 msnm
<b>Temperatura</b>	20° - 24° C
<b>Suelo</b>	Baja fertilidad
<b>pH del suelo</b>	Ácido (5 a 6)

La *Figura 17*, muestra los troncos cortados en trozas de 2.10 m, se los dejó secar al ambiente por una semana.



**Figura 17.** Corte in situ de la palma de chonta.

### 3.2. Secado de la madera

En la *Figura 18* se muestra el proceso de corte y secado, se cortó radialmente las trozas, obteniendo 20 tablones los cuales se dejaron cinco días secar al ambiente y posteriormente secar en un horno para madera a 58° C por doce días, al final del proceso, los tablones tenían un contenido de humedad entre 12 a 14 %. El procedimiento se llevó a cabo para que el secado no sea brusco evitando el agrietamiento del material y que este sea factible para los procedimientos de caracterización posteriores.



**Figura 18.** Cortado de trozas, secado al ambiente y secado al horno.

### 3.3. Procesamiento

A los tablones se procedió a cortar en tiras de 28x28x2100 mm y 37x37x 2100 mm, las cuales se cepillaron posteriormente obteniendo tiras de sección transversal 25x25x2100  $\pm$  2 mm y 35x35x2100  $\pm$  2 mm especificadas en las normas a utilizar para caracterizar física y mecánicamente la madera (*Figura 19*).



**Figura 19.** Cepillado de los tablones.

### 3.4. Microestructura

#### 3.4.1. Máquina, equipo y procedimiento

En la caracterización microestructural se requirió de la identificación del plano tangencial-radial de la muestra y un microscopio. Inicialmente, se cortaron las muestras del tronco principal de la palma de chonta utilizando una sierra de metal de carburo de silicio para reducir la deformación en la superficie de la muestra.

Para proporcionar una superficie de muestra adecuada, se cortó una de las tiras con sección transversal de 25x25 mm en dos muestras del plano tangencial radial de dimensiones 10x10x3  $\pm$  1mm. El pulido de las muestras se hizo a mano utilizando papel

lija con sucesivos grados de arena progresivamente más fina, la muestra no requirió ningún otro tratamiento de pulido para identificar la matriz de fibra en el microscopio.

En la Figura 20 se observa a las muestras pulidas colocadas en el microscopio electrónico de barrido (SEM) que tiene un aumento de  $1 \times 1'000\ 000x$  a  $30[kV]$  y una resolución en modo de alto vacío de  $1,2 [nm]$  a  $30 [kV]$ ;  $2,5 [nm]$  a  $3 [kV]$ . La imagen fue tomada cuando el objeto estaba enfocado.



**Figura 20.** Microscopio electrónico de barrido TESCAN.

### 3.5. Macroestructura

Para establecer las propiedades físicas y mecánicas se realizaron los siguientes ensayos:

- Porcentaje de humedad.
- Tracción paralela a la fibra.
- Compresión paralela a la fibra.

- Compresión perpendicular a la fibra.
- Flexión estática.
- Ensayo MOE dinámico.

Previo a cada ensayo se registró el número de especímenes con sus características principales como orientación de la fibra, dimensiones y humedad, además de la temperatura de datos externos y la humedad relativa. Si esos parámetros no se usan dentro de las condiciones recomendadas, pueden afectar los resultados de la prueba.

### **Análisis estadístico**

Los resultados de los ensayos en la caracterización de los materiales naturales son datos variables aleatorios cuya distribución de la población, en general, se desconoce. Por lo tanto, fue necesario identificar la probabilidad de distribución que mejoró la bondad de ajuste de los datos experimentales, para estimar los parámetros de interés. En esa identificación, se usaron los métodos gráficos, siendo la gráfica de probabilidad la más común.

#### **3.5.1. Ensayo contenido de humedad (% CH)**

La relación entre la masa de agua y la masa sólida presente en los materiales orgánicos e inorgánicos se entiende como humedad. Las propiedades mecánicas de los materiales orgánicos dependen de esta propiedad física (Glass & Zelinka, 2010). Este ensayo se lo realizará en base al método descrito en ASTM D4442-16, que consiste en buscar el contenido de agua dentro de una probeta de palma de chonta expresada como porcentaje de masa seca.

La norma presenta varios métodos, se utilizó el “método A” que se basa en la diferencia en masa seca y masa original que para madera y materiales de base de madera una temperatura de secado de  $103 \pm 2$  °C y un periodo de tiempo superior a 24 horas. Para controlar la humedad relativa, las muestras se almacenaron en áreas libres de humedad y protegidas de la luz solar directa.

### **Máquinas y equipos**

- Estufa: marca Memmert de 108 litros, mantuvo una temperatura estable de  $104 \pm 1$  °C durante el tiempo requerido para que las muestras se sequen por completo. Se determinó que la humedad relativa del laboratorio era inferior al 65%.
- Balanza: marca Kern de precisión 0,1 mg.
- Pie de rey digital TRUPER, apreciación  $\pm 0,05$  mm.

### **Procedimiento**

En la Figura 21 se muestra el procedimiento de pesaje y secado de muestras; las probetas utilizadas de dimensiones  $35 \times 35 \times 41 \pm 2$  mm fueron almacenadas en un lugar protegido de la luz solar y el agua. Las muestras húmedas se pesaron utilizando la balanza descrita anteriormente y los valores se registraron (masa original). Después de que el material fue secado a 104 °C por un periodo de 24 horas, se apagó el horno y se esperó un periodo de 30 minutos para que disipara la energía térmica evitando que absorba la humedad de la atmósfera y se la pueda manipular de forma segura. Luego, se pesaron las muestras (masa seca) y se procedió a calcular.



**Figura 21.** Pesaje y secado de muestras.

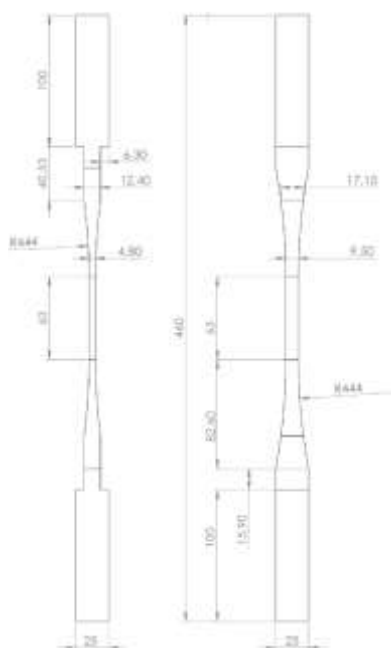
### Cálculo

El contenido de humedad se calculó mediante la ecuación (3) anteriormente descrita en el capítulo dos.

$$CH = \frac{m_{humeda} - m_{seca}}{m_{seca}} (100\%) \quad (3)$$

#### 3.5.2. Ensayo tracción paralela a la fibra

Esta práctica se basa en la metodología de la norma ASTM D143-14 para medir la resistencia a la tracción. Inicialmente se prepararon probetas de dimensiones  $25 \times 25 \times 410 \pm 2$  mm, para después ser manufacturadas en fresadora de madera y obtener la geometría especificada en la norma (*Figura 22*), en la cual se aplica una carga longitudinalmente hasta que se produce una falla en el material. Los datos de fuerza y desplazamiento se recopilaron a lo largo de la prueba para desarrollar las relaciones constitutivas de los materiales naturales.



**Figura 22.** Dimensiones probeta tracción según ASTM D143-14.

### Máquinas y equipos

- Máquina de ensayos universales AMSLER FM – 1033 capacidad 10 [t] tracción.
- Balanza electrónica Shimadzu TW423L, apreciación de 1[mg].
- Termohigrómetro BOECO BOE327, Temperatura (-10 a 50°C), humedad relativa (20 y 99%) y exactitud ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $\pm 5\%\text{HR}$ ).
- Pie de rey electrónico Fowler, apreciación  $\pm 0,02$  mm.

### Condiciones de montaje y prueba

La longitud, el ancho y el grosor de las muestras se midieron con la precisión deseada y se registró cualquier deformación observada. El ancho y el grosor se midieron en cuatro posiciones para promediar el área de la sección transversal. La *Figura 23* muestra la



máquina con la probeta montada, la cual se debe aplicar una carga longitudinal continua y una velocidad constante de 1 mm/min hasta que se llegue a la fractura, registrando la carga aplicada y la deformación durante toda la prueba.



**Figura 23.** Equipos y probetas, máquina de ensayos universales AMSLER.

### Cálculos

Los resultados obtenidos en el laboratorio reúnen la información necesaria para realizar los siguientes cálculos. La resistencia a la de tracción se calcula utilizando la ecuación (8):

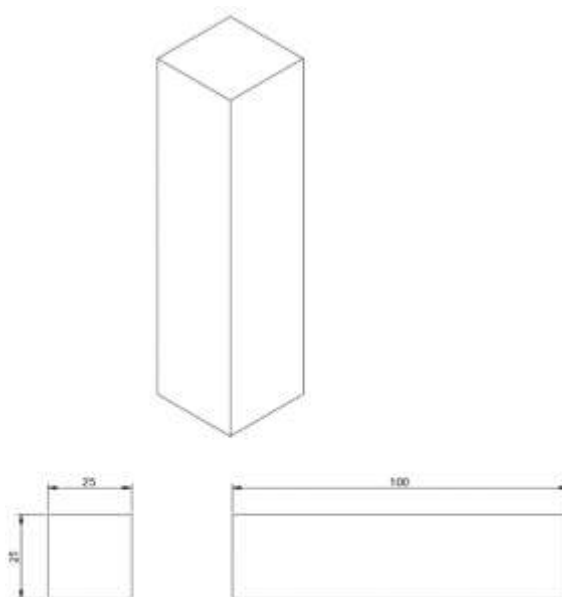
$$\sigma = \frac{P_{max}}{A} \quad (8)$$

Donde:

- $\sigma$  es la resistencia a la tracción paralela a la fibra [N/m<sup>2</sup>]
- $P_{max}$  es la carga máxima. [N]
- $A$  es el área de la sección transversal de la muestra. [m<sup>2</sup>]

### 3.5.3. Ensayo Compresión paralela a la fibra

Según metodología de la norma ASTM D143-14 para calcular la resistencia a la compresión se prepararon probetas de dimensiones  $25 \times 25 \times 100 \pm 2$  mm (*Figura 24*).



**Figura 24.** Dimensiones probetas ensayo compresión paralela a la fibra.

#### Máquinas y equipos

- Máquina de ensayos universales AMSLER FM – 1033 capacidad 200 [t].
- Balanza electrónica Shimadzu TW423L, apreciación de 1[mg].
- Termohigrómetro BOECO BOE327, Temperatura (-10 a 50°C), humedad relativa (20 y 99%) y exactitud ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $\pm 5\% \text{HR}$ ).
- Pie de rey digital Truper, apreciación  $\pm 0,05$  mm.

#### Condiciones de montaje y prueba

Las dimensiones de longitud, el ancho y el grosor de la probeta deben ser medidos con precisión, la norma especifica que se debe tener cuidado en la preparación de la

muestra sobre todo en que las superficies de las secciones cuadradas sean paralelas entre sí y perpendiculares al eje longitudinal. En la *Figura 25* se puede observar a las probetas en la máquina de ensayos universales de tal forma que quede en el centro de los topes cilíndricos (*Figura 25*), se aplica una carga de forma continua a una velocidad de 0.7 mm/min hasta que se llegue a la rotura, registrando la carga aplicada y la deformación durante toda la prueba.



**Figura 25.** Equipos y probetas, probeta ubicada en el centro de los topes cilíndricos.

### Cálculos

La resistencia a la compresión perpendicular a la fibra se calcula con la ecuación (8).

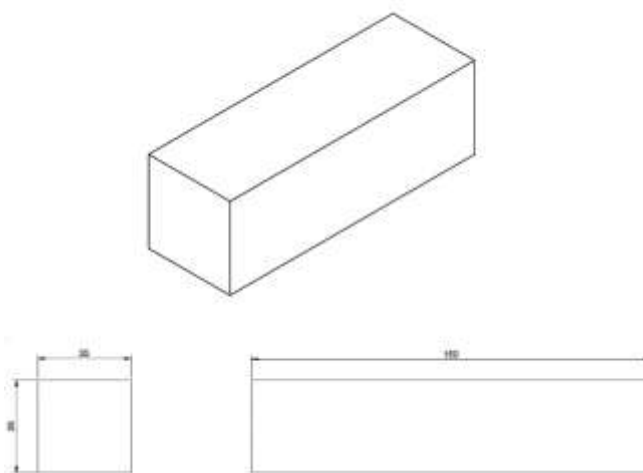
$$\sigma = \frac{P_{max}}{A} \quad (8)$$

Donde:

- $\sigma$  es la resistencia a la compresión paralela a la fibra. [N/m<sup>2</sup>]
- $P_{max}$  es la carga máxima. [N]
- $A$  es el área de la sección transversal de la muestra. [m<sup>2</sup>]

### 3.5.4. Ensayo Compresión perpendicular a la fibra

Se fabricaron muestras de  $35 \times 35 \pm 2$  mm de sección transversal y de longitud  $150 \pm 2$  mm (*Figura 26*). Se aplicará carga mediante una placa metálica de 50 mm de ancho, colocada en la superficie superior y a igual distancia a los extremos.



**Figura 26.** Dimensiones probetas ensayo compresión perpendicular a la fibra.

### Máquinas y equipos

- Máquina de ensayos universales AMSLER FM-1033 capacidad 200 [t].
- Balanza electrónica Shimadzu TW423L, apreciación de 1[mg].
- Termohigrómetro BOECO BOE327, Temperatura (-10 a 50°C), humedad relativa (20 y 99%) y exactitud ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $\pm 5\% \text{HR}$ ).
- Pie de rey digital Truper, apreciación  $\pm 0,05$  mm.

### Condiciones de montaje y prueba

Las dimensiones de longitud, el ancho y el grosor de la probeta deben ser medidos con precisión, en la *Figura 27* se observa que las probetas deben estar colocadas de

modo que la carga se aplique a través de la placa soporte a una superficie radial midiendo el ancho real en contacto con las probetas de la placa metálica de apoyo. A una velocidad constante 0.3 mm/min se debe aplicar carga de forma continua hasta que la placa se haya incrustado en la probeta 2,5 mm, registrando la carga aplicada y la deformación durante toda la prueba.



**Figura 27.** Probetas, placa metálica ubicada en la superficie radial de la probeta.

### Cálculos

La resistencia a la compresión perpendicular a la fibra se calcula con la ecuación (9).

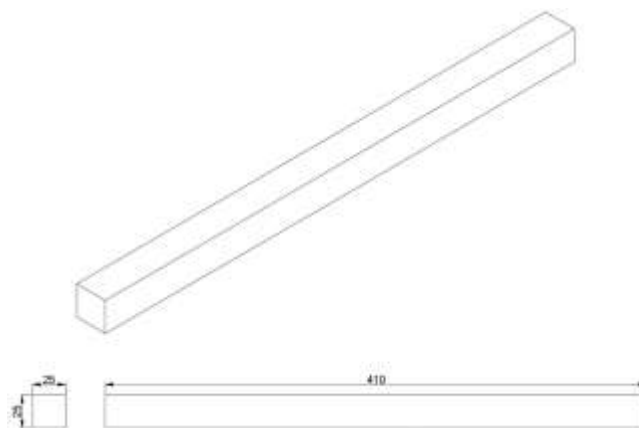
$$\sigma = \frac{P_{\delta=2.5mm}}{A_{contacto}} \quad (9)$$

Donde:

- $\sigma$  es la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra. [N/m<sup>2</sup>]
- $P_{\delta=2.5mm}$  es la carga aplicada hasta que la placa metálica se haya incrustado 2,5 mm. [N]
- $A_{contacto}$  es el área en contacto de la superficie de madera con la placa metálica. [m<sup>2</sup>]

### 3.5.5 Ensayo Flexión estática (MOE estático)

El ensayo se basa en la teoría de viga simplemente apoyada con una carga puntual en el centro, a su vez, utilizando la metodología de la norma ASTM D143-14, se fabricaron probetas de dimensiones  $25 \times 25 \times 410 \pm 2$  mm (*Figura 28*).



**Figura 28.** Dimensiones probetas ensayo flexión estática.

### Máquinas y equipos

- Máquina de ensayos universales AMSLER FM – 1033 con puente de flexión, capacidad 200 [t].
- Balanza electrónica Shimadzu TW423L, apreciación de 1[mg].
- Termohigrómetro BOECO BOE327, Temperatura (-10 a 50°C), humedad relativa (20 y 99%) y exactitud ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $\pm 5\% \text{HR}$ ).
- Pie de rey digital Truper, apreciación  $\pm 0,05$  mm.

### Condiciones de montaje y prueba

Se midieron la longitud, el ancho y el grosor de la probeta y se registró cualquier imperfección, el ancho fue medido en cuatro posiciones para promediar el área de la sección transversal. Se calibró el puente de flexión con una longitud entre apoyos de 360 mm, en la *Figura 29* se puede observar a la probeta montada en el puente de flexión y se aplicó una carga puntual continua con la máquina de ensayos universales a una velocidad de 2,5 mm/min en el centro hasta que se llegue a la rotura, registrando la carga aplicada y la deformación durante toda la prueba.



**Figura 29.** Equipos, probetas, ensayo flexión estático.

### **Cálculos y teoría de viga con apoyos simples**

Considere una probeta con dos apoyos simples a los extremos, a la que se aplica una fuerza  $F$  puntual en el centro. Teóricamente la viga es simétrica por lo tanto se analiza solo el primer tramo, utilizando la ecuación general del momento se establece la ecuación diferencial de la elástica (10).

$$EI \frac{d^2\delta}{dx^2} = \frac{Px}{2} \quad (10)$$

Se integra dos veces la ecuación, obteniendo las ecuaciones (11) y (12):

$$EI \frac{d\delta}{dx} = \frac{Px^2}{4} + c_1 \quad (11)$$

$$EI\delta = \frac{Px^3}{12} + c_1x + c_2 \quad (12)$$

La pendiente de la tangente es igual a cero en la mitad de la viga, es decir:

si  $x = \frac{L}{2}$  entonces  $\frac{d\delta}{dx} = 0$ ; reemplazando en la ecuación (11)

$$0 = \frac{P * L^2}{16} + c_1$$

$$c_1 = -\frac{PL^2}{16}$$

La deflexión es igual a cero en el apoyo, es decir:

$\delta = 0$  si  $x=0$ ; reemplazando en la ecuación (12), tenemos:

$$EI * 0 = \frac{P*0}{12} + c_1 * 0 + c_2$$

$$c_2 = 0$$

La deflexión máxima se obtiene cuando  $x = \frac{L}{2}$ ; por lo tanto:

$$E = \frac{PL^3}{48I\delta_{max}} \quad (13)$$

Donde:

- P valor de la carga en la zona elástica. [N]
- L distancia entre apoyos. [m]
- E módulo de elasticidad (MOE). [Pa]
- I inercia. [m<sup>4</sup>]
- $\delta_{max}$  Deflexión en el centro de la viga. [m]

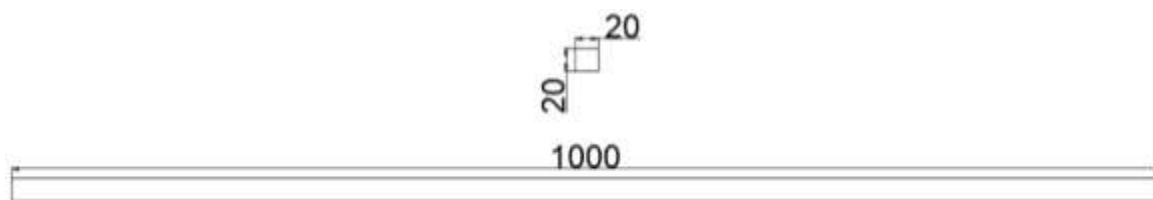


### 3.5.6 Ensayo MOE dinámico

El ensayo utiliza la metodología aplicada en el proyecto de grado “Caracterización dinámica de la madera de balsa de Ecuador” citada anteriormente, basada en la respuesta de vibración de un sistema dinámico lineal. Se fabricaron dos tipos de probetas debido a que se ensayó con bancos de pruebas distintos, las probetas para el “método A” fueron de dimensiones idénticas a las del ensayo estático es decir  $25 \times 25 \times 410 \pm 2$  mm (*Figura 30*) y para el “método B”  $20 \times 20 \times 1000 \pm 2$  mm (*Figura 31*), con el propósito de comparar los resultados obtenidos.



**Figura 30.** Dimensiones probetas “método A”.



**Figura 31.** Dimensiones probetas “método B”.

### Máquinas y equipos

- Banco de pruebas bajo régimen dinámico del laboratorio de reología.
- Soporte metálico.
- Balanza electrónica Shimadzu TW423L, apreciación de 1[mg].

- Termohigrómetro BOECO BOE327, Temperatura (-10 a 50°C), humedad relativa (20 y 99%) y exactitud ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $\pm 5\% \text{HR}$ ).
- Pie de rey digital Truper, apreciación  $\pm 0,05$  mm.
- Acelerómetro ADXL 335.
- Sistema de acoplamiento de señales (DAQ) NI USB 6009.
- Software adquisición de datos.
- Circuito de acoplamiento de señales.

### **Condiciones de montaje y prueba**

#### **“Método A”**

Se midieron las dimensiones de la probeta, el ancho se lo midió en cuatro posiciones obteniendo un promedio para la sección transversal, a su vez, se registró cualquier imperfección que las probetas presentaron. Se montó el banco de pruebas calibrando el sensor y realizando todas las conexiones entre los sensores, circuito de acoplamiento de señales y DAQ. Se procedió a acoplar la probeta a la máquina y se verificaron que las conexiones con ensayos de prueba. El acelerómetro y el sistema de fuerza de impacto de 2 N se lo colocó a  $320 \pm 1$  mm y  $396 \pm 1$  mm del borde empotrado de la probeta respectivamente.

Se procedió a que el sistema de fuerza por gravedad golpee a la probeta de tal manera que provoque una onda vibratoria cuyos datos serán registrados por el acelerómetro y mostradas en una computadora por el software que a su vez se encarga de exportarlos a Excel y a formato .lvm. Con el Excel se generó las gráficas aceleración vs tiempo, y al

formato .lvm utilizando un programa en Matlab de la transformada de Fourier inversa se obtuvo el espectro de frecuencias de cada probeta.

### “Método B”

De igual manera que en el método anterior se midieron las dimensiones de la probeta y se registró cualquier imperfección. Para este procedimiento se fabricó un nuevo sistema de sujeción que simule un empotramiento total de la probeta y de igual manera se siguió los puntos descritos en la metodología A, con excepción de que el sensor se ubicó a una distancia de  $940 \pm 1$  mm y el sistema de fuerza de impacto a  $970 \pm 1$  mm del borde empotrado de la probeta.

### Cálculos y teoría de viga con apoyos simples

Las ecuaciones que rigen la vibración transversal en vigas están en forma de ecuaciones diferenciales parciales de cuarto orden, para la vibración libre en base a la determinación de las frecuencias naturales se utiliza la siguiente ecuación (14):

$$\omega = \beta^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} = (\beta L)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}} \quad (14)$$

Despejando el módulo de elasticidad de la ecuación (14) tenemos:

$$E = \frac{\omega^2 \rho A l^4}{I (\beta l)^4} \quad (15)$$


Donde:

- $\omega$  es la frecuencia angular de la vibración. [rad/s]
- $\beta l$  coeficientes determinados por las condiciones de frontera.
- $I$  inercia viga. [m<sup>4</sup>]

- $\rho$  densidad. [kg/m<sup>3</sup>]
- A área sección transversal. [m<sup>2</sup>]
- L longitud de la fuerza aplicada. [m]

**Tabla 4.**

*Coeficientes para la vibración transversal de una viga empotrada en un extremo y libre en el otro.*

Condiciones en los extremos de la viga	Ecuación de la Frecuencia	Modo (función normal)	Valor de $\beta_n l$
Extremo empotrado y el otro libre	$\cos \beta_n l \cdot \cosh \beta_n l = -1$	$W_n(x) = C_n [\text{sen } \beta_n x - \text{senh } \beta_n x - \alpha_n (\cos \beta_n x - \cosh \beta_n x)]$ Donde:	$\beta_1 l = 1.8751$ $\beta_2 l = 4.6940$ $\beta_3 l = 7.8547$ $\beta_4 l = 10.9955$
		$\alpha_n = \left( \frac{\text{sen } \beta_n l + \text{senh } \beta_n l}{\cos \beta_n l + \cosh \beta_n l} \right)$	

Fuente: (Rao, 2011)

## CAPÍTULO IV

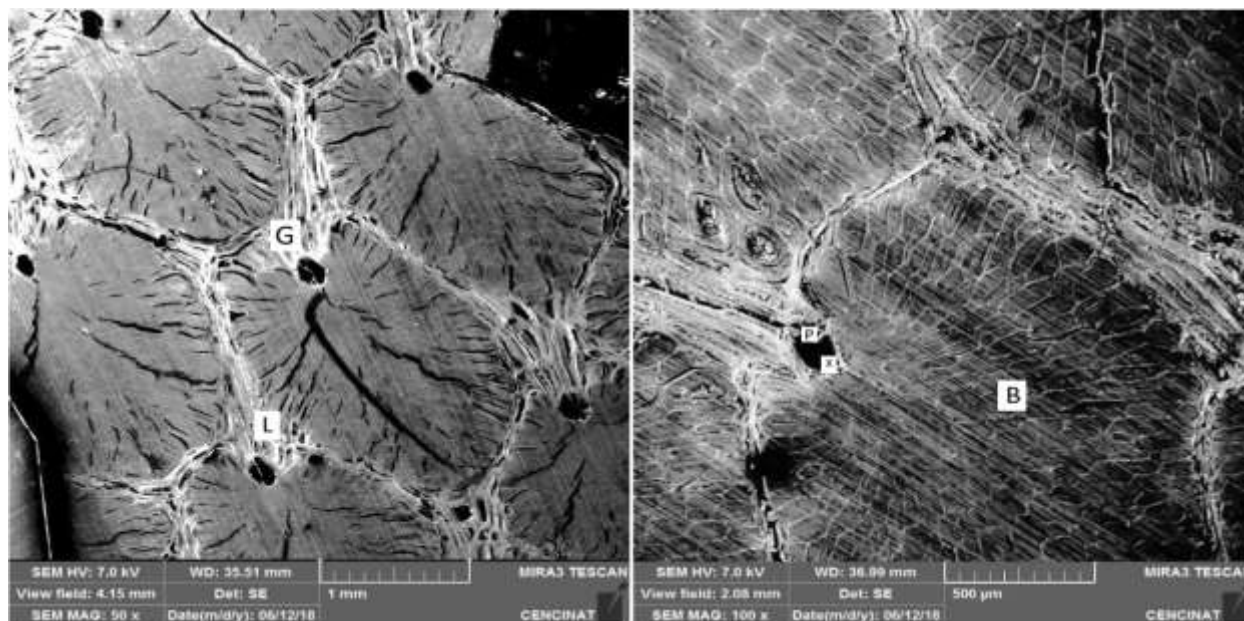
### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1. Descripción microestructural

Las paredes celulares de las plantas se componen de solo cuatro bloques de construcción básicos: celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina. La celulosa es la fibra estructural principal en el reino vegetal y tiene propiedades mecánicas notables, su módulo de Young es de aproximadamente 130 GPa, y su resistencia a la tracción es cercana a 1 GPa (Gibson, 2012). La estructura geométrica de las células vegetales también varía, desde las células prismáticas, en su mayoría en forma de panal de abeja, hasta los poliedros de parénquima de manzanas y papas, dando lugar a una gama amplia de propiedades mecánicas, por ejemplo, la fortaleza del parénquima y la palma más densa abarcan desde 0.3 a 300 MPa, un factor que es 1000 veces mayor de una madera en general (Gibson, 2012).

Las palmas no tienen una sección transversal uniformemente debido a que desarrolla una distribución de densidad radial, con tejido más denso en la base y la periferia del tallo, donde las tensiones de flexión en el tallo son mayores. La microestructura que se realizó es consistente a las observaciones de los estudios realizados por Rich (1987) y Martinez (2013), en la *Figura 32* se observa que las secciones transversales revelan haces vasculares, con sus células alineadas a lo largo del tallo, similar a un panal, separadas por tejido con células de parénquima más equiaxiales. Debido que a medida que el tallo de la palma aumenta en altura, se agregan capas adicionales a las paredes celulares en los haces vasculares, aumentando su densidad y propiedades mecánicas.

Dentro de un único tallo de palma, hay un gradiente de densidad que puede ser tan grande como de 60 a 1200 kg/m<sup>3</sup>.

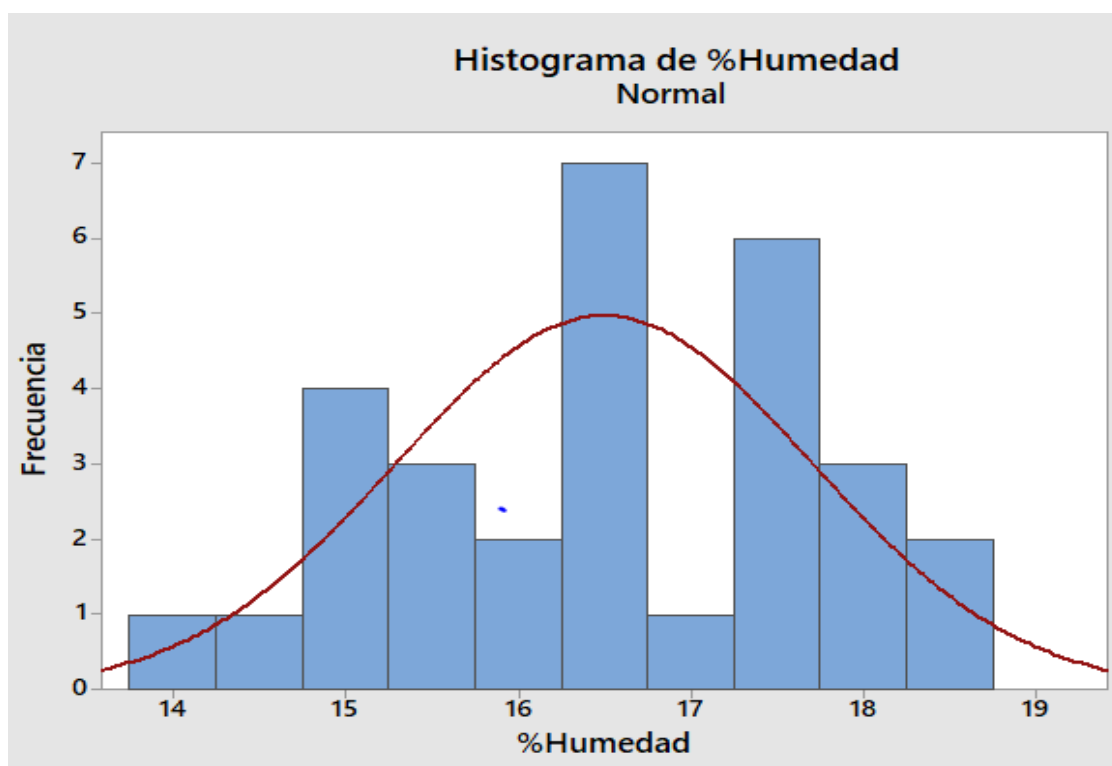


**Figura 32.** Secciones transversales que muestran cambios en el desarrollo del tejido del tallo a la altura del pecho de la palma de chonta. 1. Tejido del tallo periférico. 2. Tejido central del tallo. El tejido (G) consiste en células de parénquima con lagunas (L) que se forman en el tejido central de la planta. Los haces vasculares consisten en la xilema (X), el floema (P) y la envoltura de la fibra (B).

## 4.2. Descripción macroestructural

### 4.2.1 Contenido de humedad (%CH)

Aplicando la ecuación (3) el %CH es el porcentaje de agua en la muestra en relación con la masa seca, los resultados de la *Figura 33* y *Tabla 5* son los obtenidos de especies de palma de chonta con edades entre 30 a 35 años.



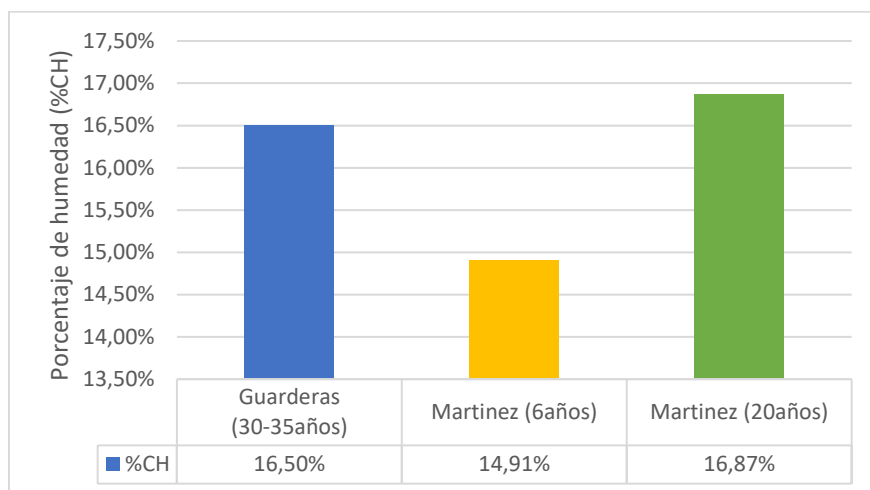
**Figura 33.** Histograma %CH distribución normal.

**Tabla 5.**

*Resultados de ensayo %Humedad "método A" ASTM D4442-16*

	# de muestras	% de Humedad	Desviación estándar
Chonta (30-35 años)	30	16.50	1.203

Los resultados de esta investigación tuvieron un 2,24% de variación si se compara con los datos obtenidos por Martínez (2013) 14,91% y 16,87% de humedad los cuales realizó con tallos de palma de chonta de edad de 6 y 20 años respectivamente ver *Figura 34*. A su vez, según Achá (2011) el contenido de humedad (%CH) varía de 155% a 70% desde las capas más internas a las capas periféricas en algunas especies, encontrando que esta planta tiene una mayor densidad y menor contenido de humedad en comparación con el bambú (*Dendrocalamus Gigantescus*).



**Figura 34.** Comparación resultados %CH obtenidos con investigaciones anteriores.

#### 4.2.2 Resistencia a la tracción paralela a la fibra

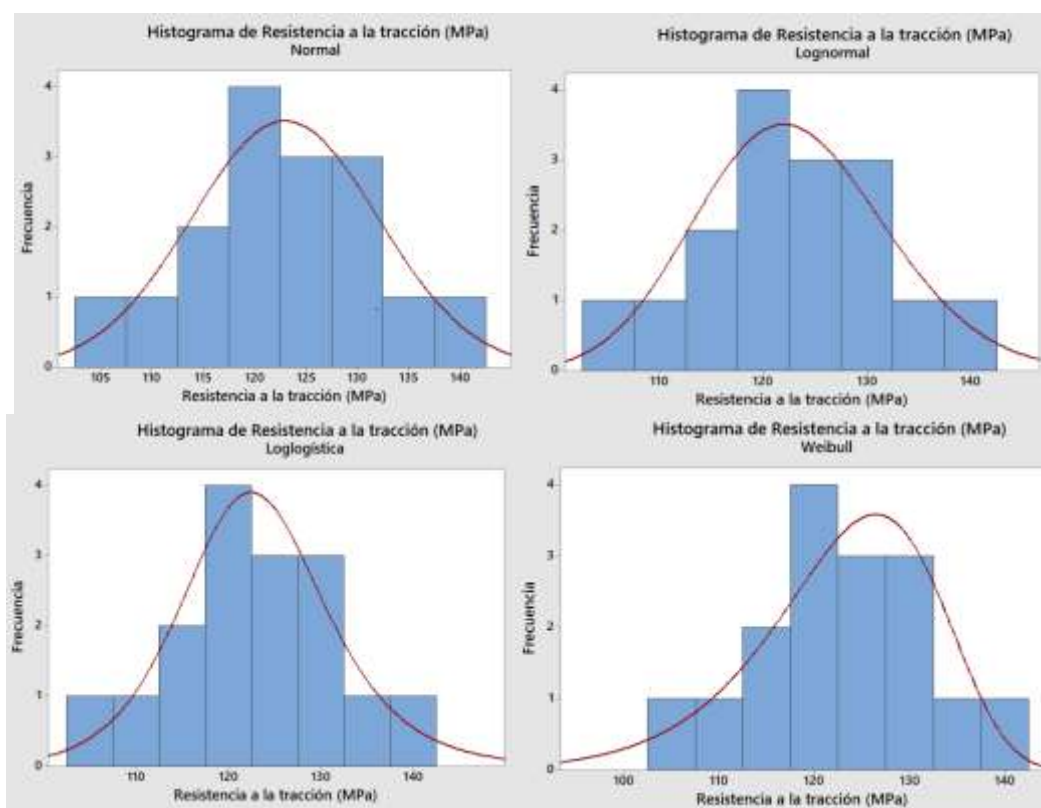
La resistencia a la tracción se determinó realizando probetas según ASTM D143-14 para edades de palma de chonta entre 30 a 35 años.



**Figura 35.** Probetas ensayo tracción después del ensayo.

Cuatro probetas ensayadas fueron descartadas de los resultados debido a que la fractura no se generó en la sección transversal reducida, sino en las áreas de agarre con la máquina AMSLER ver *Figura 35*.





**Figura 36.** Graficas distribución de probabilidad resistencia a la tracción.

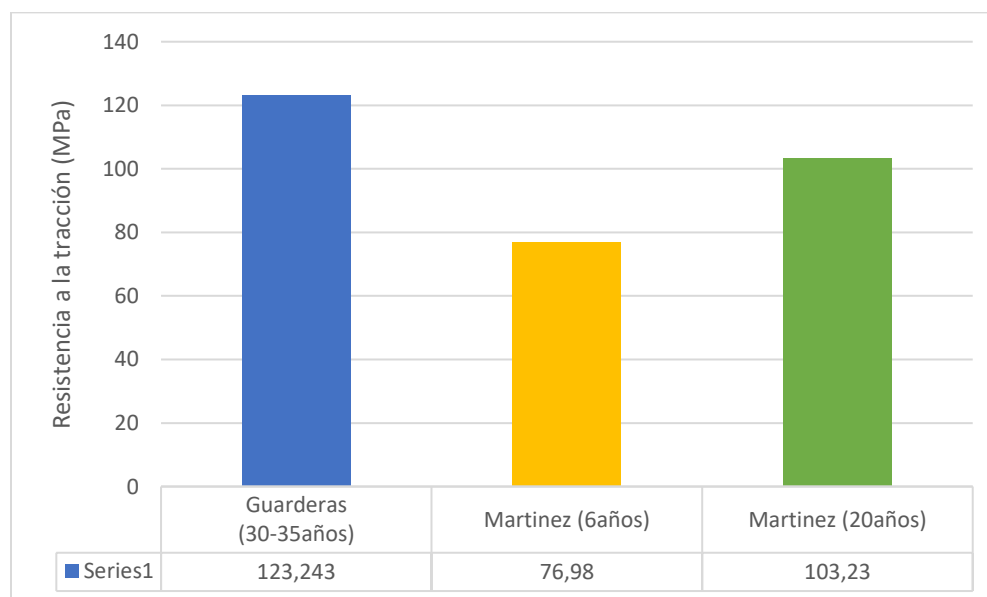
**Tabla 6.**

*Distribución de probabilidad resistencia a la tracción*

Distribución de probabilidad	Normal	Log-Normal	Log-Logística	Weibull
Número de probetas	16	16	16	16
Valor característico (MPa)	122,948	122,950	123,243	122,770
Desviación estándar	8,797	8,862	9,380	9,778
Anderson Darling	0,985	0,996	0,949	1,039

En base a los resultados descritos en la *Tabla 6* y *Figura 36*, la distribución de probabilidad Log-Logística describe de mejor forma el comportamiento de los datos

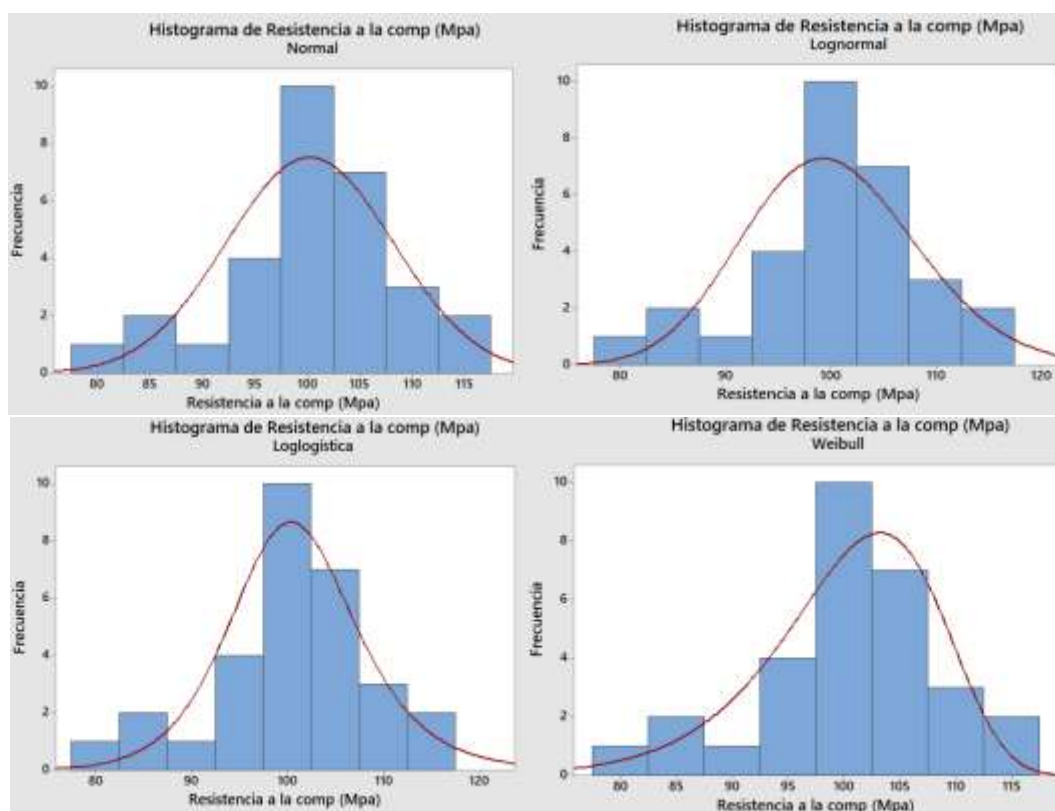
debido a que el estadístico Anderson-Darling es el menor de todas las distribuciones. Por lo que la resistencia a la tracción de la investigación es 123,243 MPa. Comparando con los resultados de Martinez (2013) 103,23 MPa tenemos una variación de 16.23% (*Figura 37*).



**Figura 37.** Comparación resultados resistencia a la tracción con investigaciones anteriores.

#### 4.2.3 Resistencia a la compresión paralela a la fibra

Un total de 30 probetas fueron ensayadas utilizando el procedimiento de la norma ASTM D143-14. Se realizó el respectivo análisis estadístico con cuatro distribuciones de probabilidad (*Figura 38*), donde en la Tabla 7 se puede visualizar los resultados del ensayo.



**Figura 38.** Graficas distribución de probabilidad resistencia a la compresión paralela a la fibra.

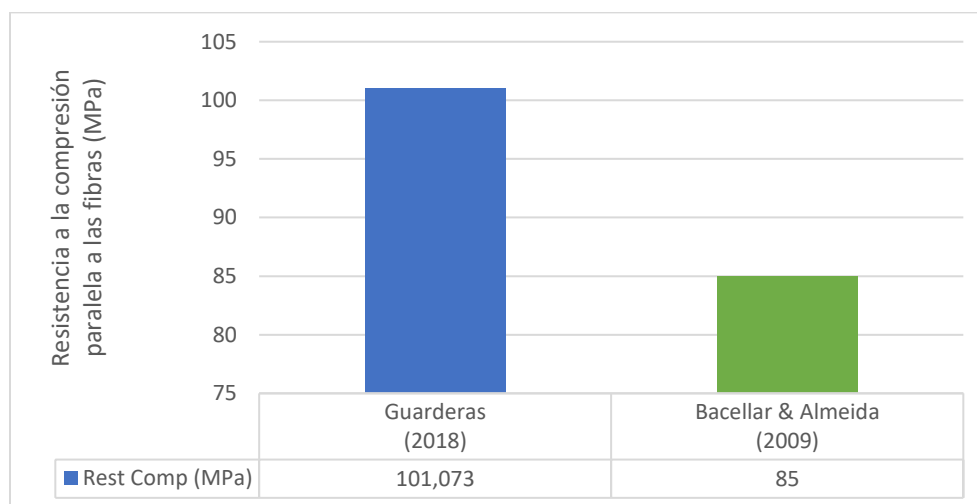
**Tabla 7.**

*Distribución de probabilidad resistencia a la compresión paralela a la fibra*

Distribución de probabilidad	Normal	Log-Normal	Log-Logística	Weibull
Número de probetas	30	30	30	30
Valor característico (MPa)	100,242	100,250	101,073	100,201
Desviación estándar	7,833	8,153	7,928	7,934
Anderson Darling	0,992	1,188	0,752	0,753

El menor valor del estadístico Anderson-Darling corresponde a la distribución de probabilidad Log-Logística, por lo tanto, la resistencia a la compresión paralela a la fibra

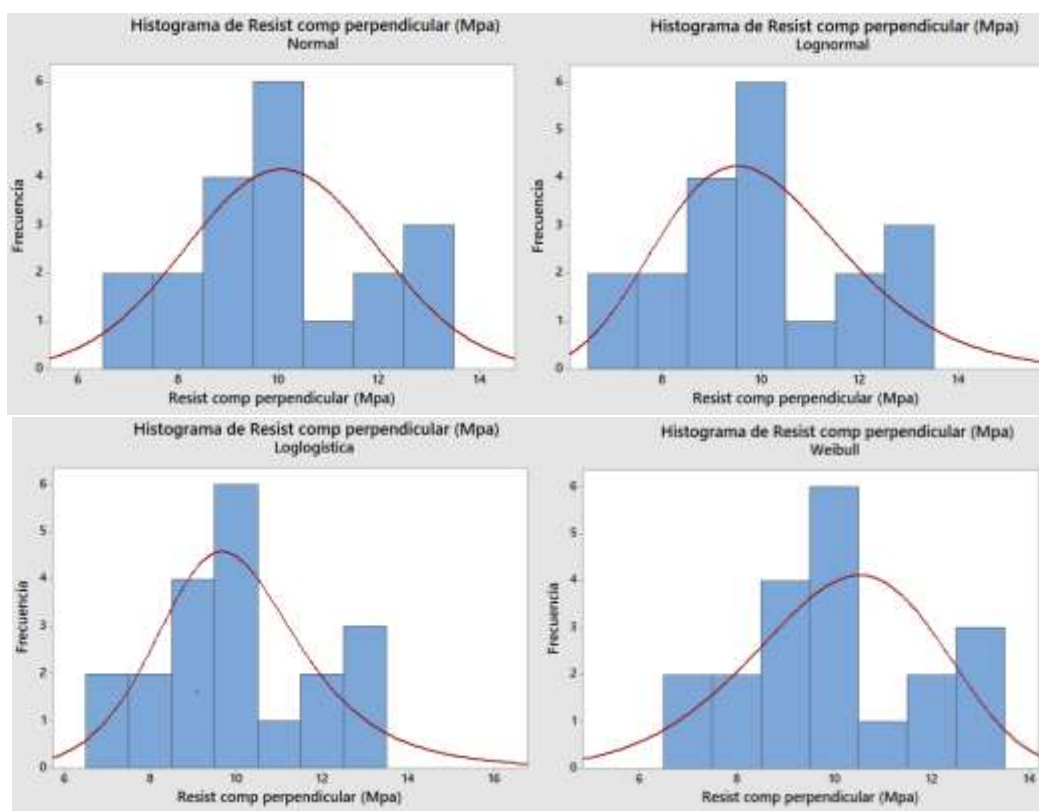
es de 101,073 MPa. Comparando con valores de anteriores investigaciones, Bacellar y Almeida (2009) obtuvieron una resistencia de 85 MPa un 15,902% de variación (*Figura 39*). Es importante recalcar que la variación se debe a la procedencia, edad, el clima y el suelo de la probeta o también por el tipo de ensayo.



**Figura 39.** Comparación resultado resistencia a la compresión paralela a la fibra con otras investigaciones.

#### 4.2.4 Resistencia a la compresión perpendicular a la fibra

Investigaciones anteriores no presentan resultados de este ensayo, se utilizó el procedimiento de la norma ASTM D143-14 donde se practicó con 20 probetas. En base a los resultados obtenidos en la Tabla 8, se eligió la resistencia de la distribución de probabilidad con el estadístico Anderson-Darling menor, ya que esta prueba mide que tan bien los datos siguen una distribución específica *Figura 40*.



**Figura 40.** Graficas distribución de probabilidad resistencia a la compresión perpendicular a la fibra.

**Tabla 8.**

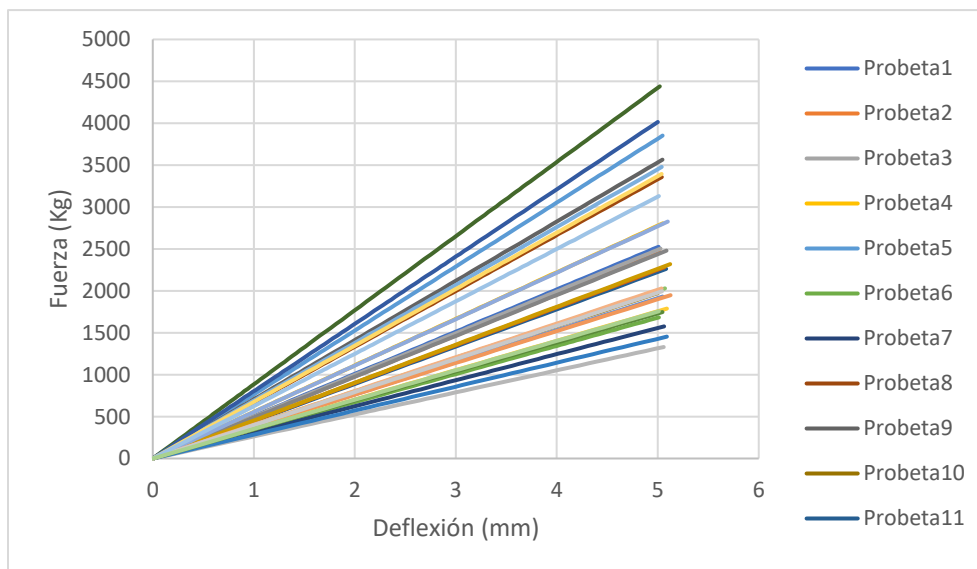
*Distribución de probabilidad resistencia a la compresión perpendicular a la fibra*

Distribución de probabilidad	Normal	Log-Normal	Log-Logística	Weibull
Número de probetas	20	20	20	20
Valor característico (MPa)	10,063	10,066	10,127	10,061
Desviación estándar	1,869	1,919	2,098	1,957
Anderson Darling	0,887	0,837	0,805	0,949

La distribución de probabilidad con menor Anderson-Darling es Log-Logística, por lo tanto, la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra es 10,127 MPa.

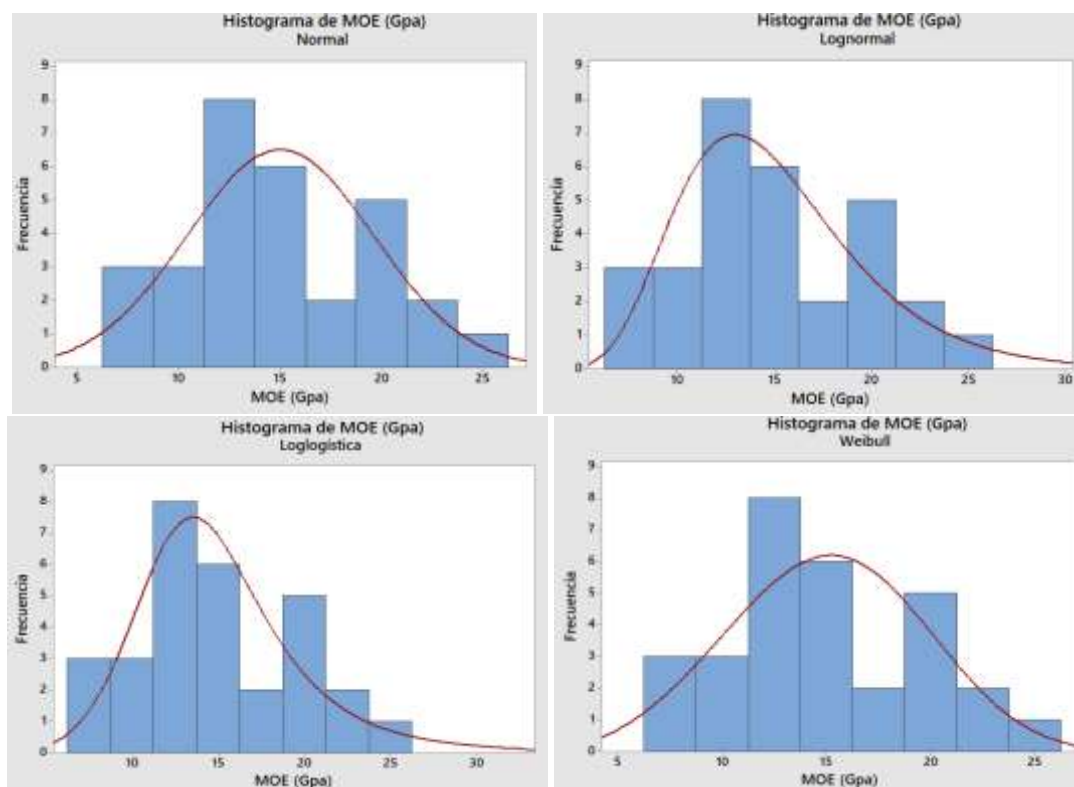
#### 4.2.5 Módulo de elasticidad estático (MOE estático)

La *Figura 41* muestra la gráfica fuerza vs deflexión, con el objetivo de determinar el módulo de elasticidad (MOE) para probetas de palma de chonta con edad entre 30 y 35 años. Utilizando la fórmula (13) se calculó el módulo, validando los datos con las distribuciones de probabilidad que más se ajuste en base al estadístico Anderson-Darling (*Figura 42*).



**Figura 41.** Gráfica fuerza vs deflexión obtenida de la máquina de ensayos universales AMSLER.

Esta validación permite una estimación más precisa de los parámetros, principalmente el valor característico que es críticamente significativo en el área de materiales compuestos naturales. Los resultados obtenidos se presentan en la *Tabla 9*.



**Figura 42.** Grafica distribución de probabilidad MOE estático.

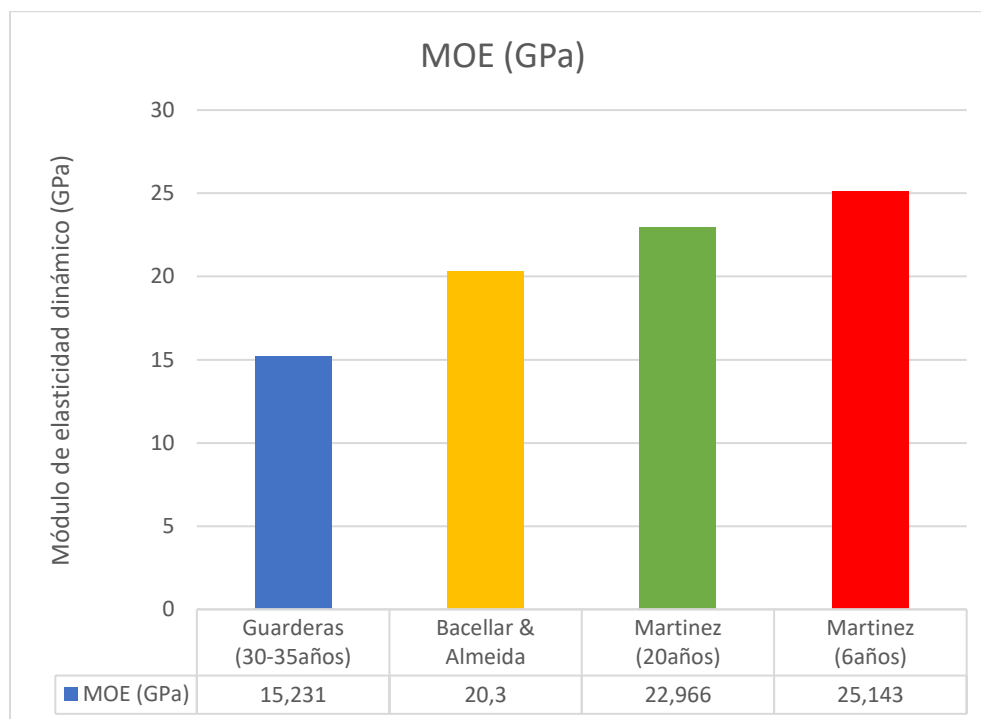
**Tabla 9.**

*Distribución de probabilidad resistencia a la compresión perpendicular a la fibra*

Distribución de probabilidad	Normal	Log-Normal	Log-Logística	Weibull
Número de probetas	30	30	30	30
Valor característico (GPa)	15,020	15,042	15,231	15,022
Desviación estándar	4,521	4,784	5,281	4,653
Anderson Darling	0,821	0,705	0,652	0,810

Por lo que el módulo de elasticidad de la palma de chonta es 15,231 MPa, Martínez (2013) en su investigación obtuvo módulos de 25,143 GPa y 22,966 GPa en probetas de

palma de 6 y 20 años respectivamente. También Bacellar y Almeida (2009) obtuvieron un MOE de 20,3 GPa (Figura 43).



**Figura 43.** Comparación MOE estático con otras investigaciones.

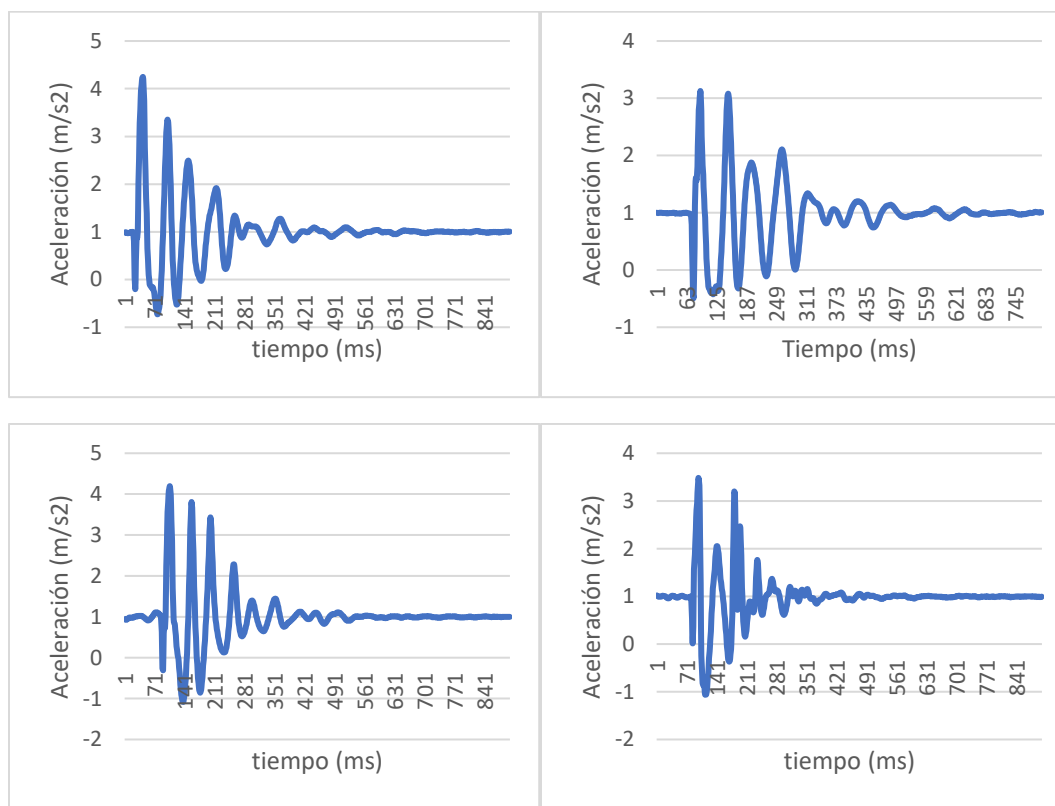
### 4.3. Descripción dinámica

#### 4.3.1 Gráfica aceleración vs tiempo

##### “Método A”

Para este análisis se escogió las gráficas de cuatro probetas, siendo estas las más representativas del ensayo (Figura 44).



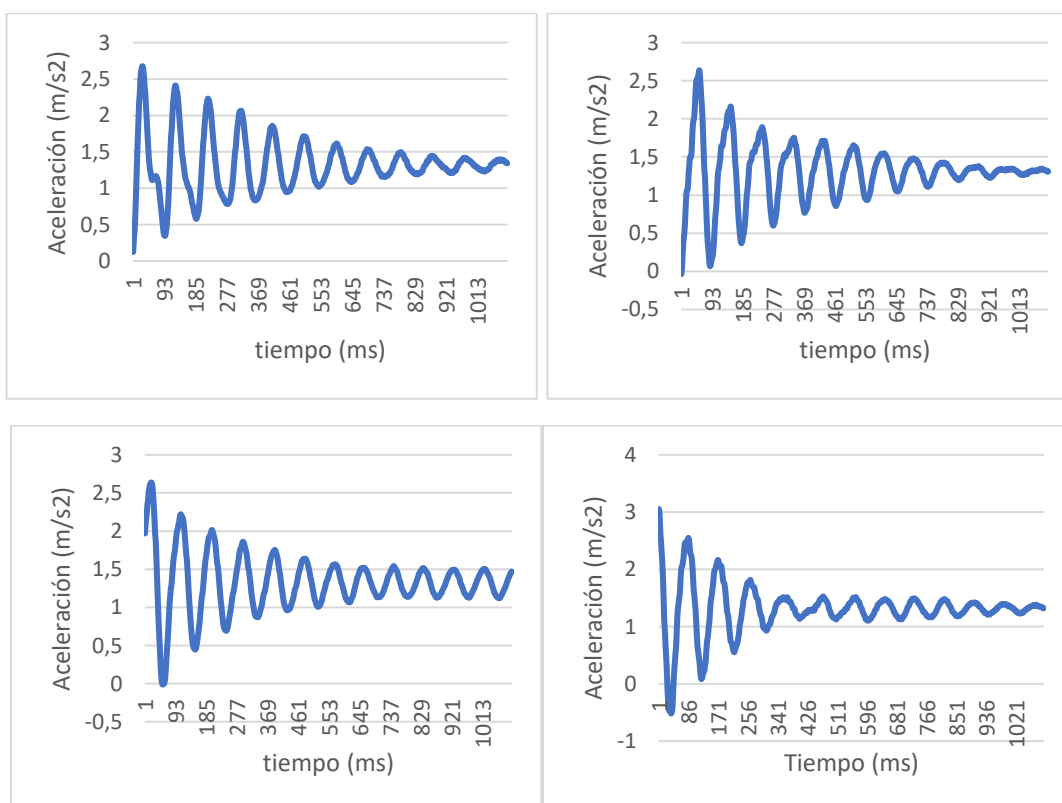


**Figura 44.** Gráficas aceleración vs tiempo “método A”.

Se puede observar claramente que el acelerómetro no pudo captar de manera correcta el fenómeno. Esto se debe a la dimensión geométrica de las probetas, la sección transversal de 25 x 25 mm era demasiado grande para la longitud de 410 mm, provocando que la razón de amortiguamiento de la vibración libre amortiguada sea mayor haciendo que la energía del golpe para causar la vibración se disipe en un menor tiempo. A su vez, también se puede observar unos picos de interferencia o ruido, producidos por una mala sujeción, lo cual nos indica que el sistema no simulaba un empotramiento total de la probeta. Por lo tanto, los datos obtenidos por este método no cumplen con el fenómeno de una viga empotrada en un extremo y libre en el otro.

### “Método B”

En este método en base a los resultados obtenidos anteriormente se calculó un promedio de la frecuencia natural que se requiere para llegar a obtener la razón de 0,98 entre el MOE estático y el MOE dinámico con una sección transversal de 20x20 mm. Con todos los datos se despejó la longitud de la ecuación (15) y se calculó, obteniendo una longitud de 1,1 m de largo, para que el ensayo obtenga datos confiables. Paralelamente, también se manufacturó un nuevo sistema de ajuste con el cual se pueda simular un empotramiento total de uno de los extremos de la probeta. En la *Figura 45* se muestran las gráficas obtenidas por el ensayo.

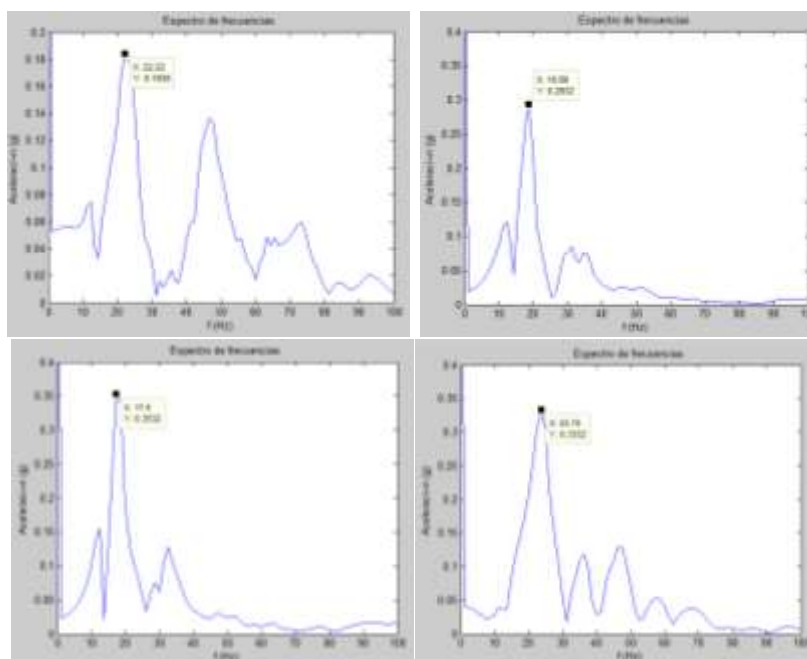


**Figura 45.** Gráficas aceleración vs tiempo “método B”.

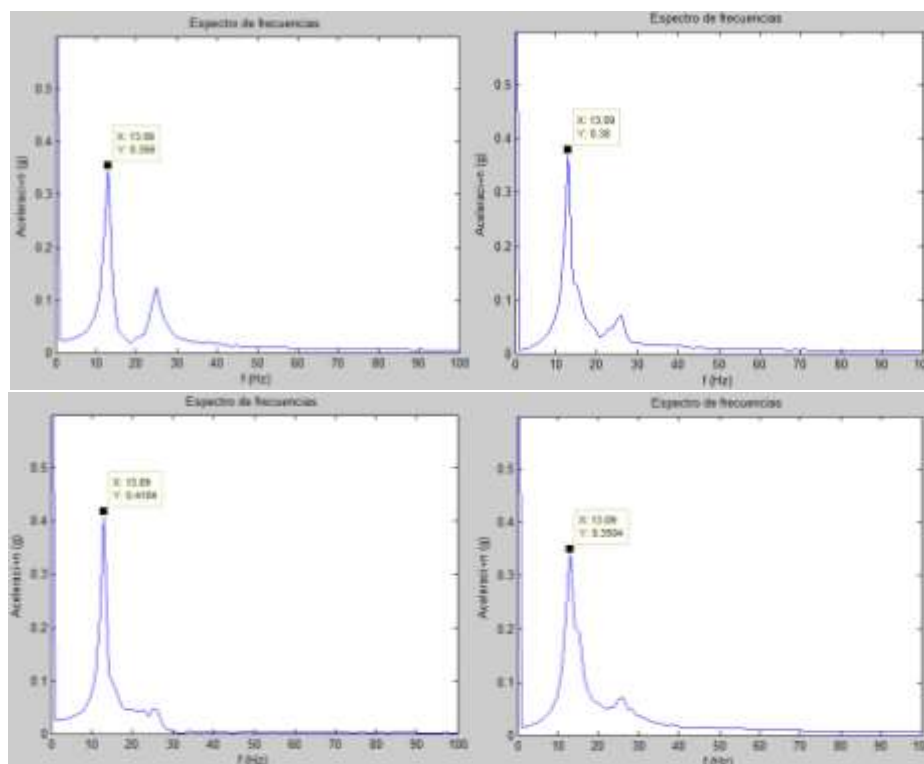
El acelerómetro pudo obtener resultados satisfactorios en respuesta al fenómeno, esta vez el factor de amortiguamiento fue menor, haciendo que la probeta vibre libremente hasta que se disipe la energía en un tiempo mayor al ensayo anterior.

### 4.3.2 Grafica espectro de frecuencia

Para la obtención del espectro de frecuencias se usó un programa con el algoritmo de la transformada rápida de Fourier, que es una transformación matemática que convierte una señal en el dominio del tiempo a una señal de dominio de la frecuencia o viceversa sin que se modifiquen la información contenida (Martinez 2013). Es decir, a las gráficas aceleración vs tiempo se las transformó obteniendo las gráficas aceleración vs frecuencia. El punto señalado en las *Figuras 46 y 47* indican la primera frecuencia natural de vibración del ensayo.



**Figura 46.** Grafica espectro de frecuencia “método A”.



**Figura 47.** Grafica espectro de frecuencia “método B”.

### 4.3.3 Módulo de elasticidad dinámico (MOE dinámico)

Aplicando la ecuación (15) se calculó el MOE dinámico,

$$E = \frac{\omega^2 \rho A l^4}{I (\beta l)^4} \quad (15)$$

Donde:

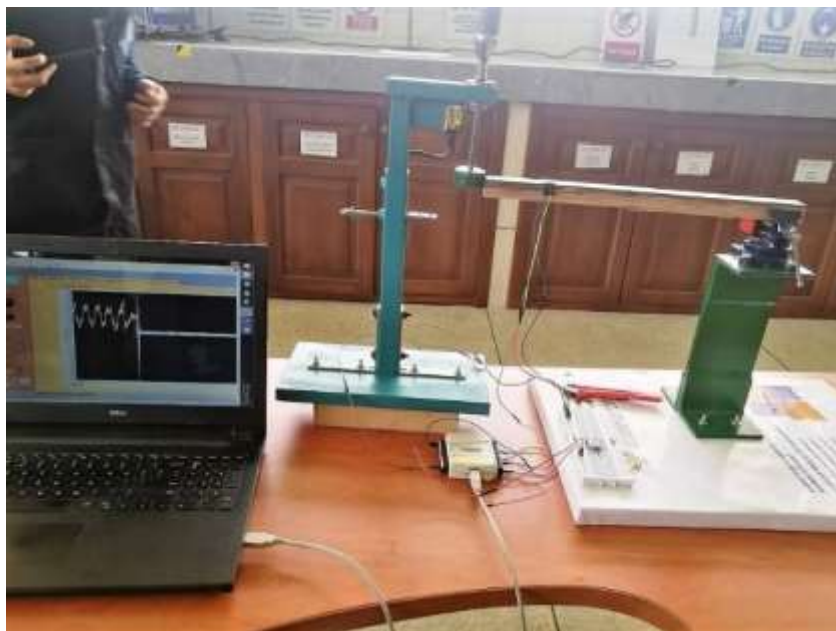
- $\omega$  es la frecuencia angular de la vibración, obtenida de las gráficas espectro de frecuencias multiplicada por  $2\pi$ . [rad/s]
- $\beta l$  coeficientes determinados por las condiciones de frontera y modo de vibración de la viga (*Tabla 4*).
- $I$  inercia viga. [m<sup>4</sup>]
- $\rho$  densidad. [kg/m<sup>3</sup>]
- $A$  área sección transversal. [m<sup>2</sup>]

- L longitud de la fuerza aplicada. [m]
- E Módulo de elasticidad dinámico. [Pa]

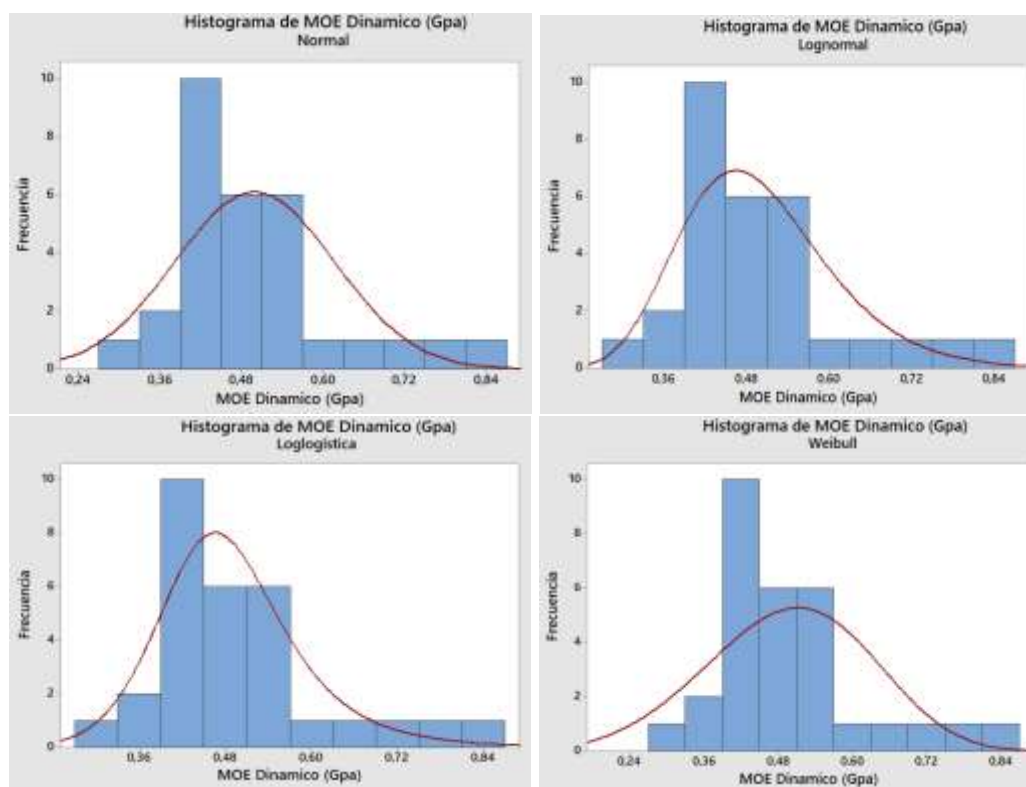
Se ensayó con el banco de pruebas de Martinez y Almeida (2017) el cual obtuvo los resultados que se describen en el “método A”. Paralelamente se ensayó con un nuevo sistema de sujeción para las probetas en el banco de pruebas anteriormente mencionado con el cual se obtuvo los resultados que se muestran en el “método B”.

### “Método A”

En total se ensayaron 30 probetas de dimensiones  $25 \times 25 \times 410 \pm 2$  mm con el banco de pruebas mencionado anteriormente (*Figura 48*). De igual manera que en los ensayos anteriores para validar los resultados se utilizaron distribuciones de probabilidad *Figura 49* y *Tabla 10*.



**Figura 48.** Banco de pruebas Martinez (2017) “método A”.



**Figura 49.** Grafica distribución de probabilidad MOE dinámico “método A”.

**Tabla 10.**

*Distribución de probabilidad MOE dinámico “método A”*

Distribución de probabilidad	Normal	Log-Normal	Log-Logística	Weibull
Número de probetas	30	30	30	30
Valor característico (GPa)	0,499	0,498	0,490	0,496
Desviación estándar	0,115	0,108	0,109	0,132
Anderson Darling	1,544	0,953	0,890	1,808

La distribución de probabilidad que describe de mejor forma los datos en base al menor estadístico Anderson-Darling es Log-Logística. Por lo tanto, el MOE dinámico de

la palma de chonta sería 0,490 GPa. Pero como pudimos apreciar en las gráficas aceleración vs tiempo este resultado no es confiable.

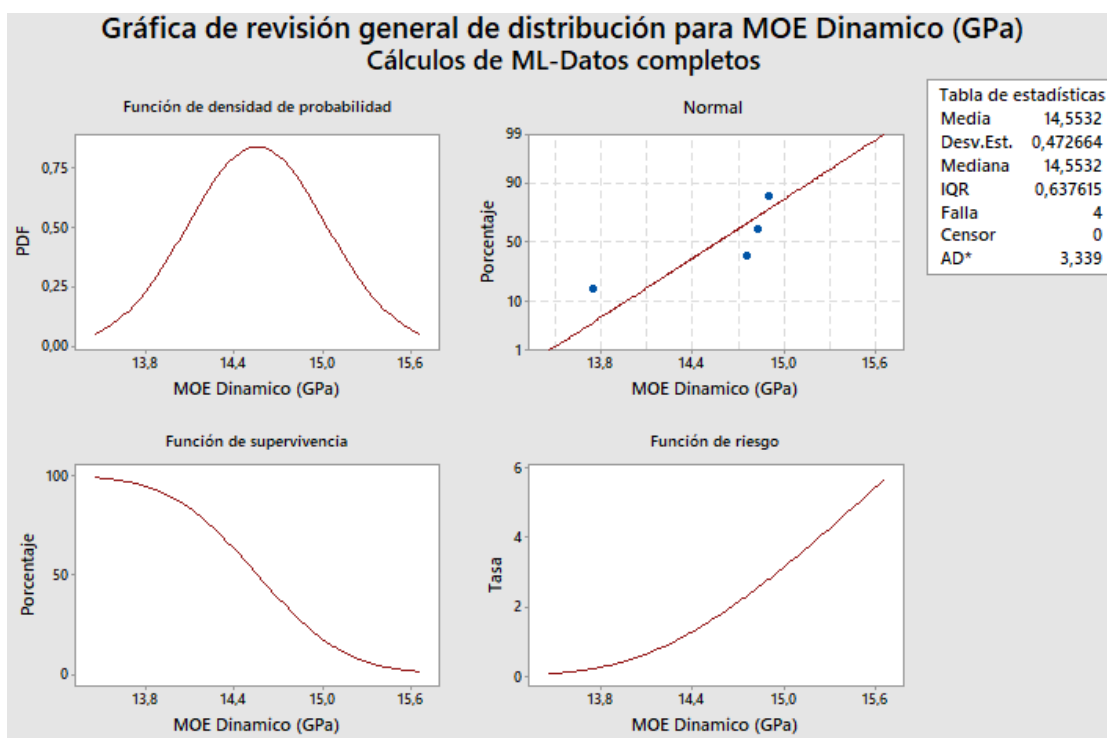
### “Método B”

Para este método se utilizaron 4 probetas de dimensiones  $20 \times 20 \times 1000 \pm 2$  mm, se ensayó con un nuevo sistema de sujeción para las probetas con el cual se podía simular de mejor manera el empotramiento que en el “método A” (*Figura 50*). Se utilizó la distribución de probabilidad normal para la validación de los datos debido al número de muestras (*Figura 51*), los resultados se encuentran en la *Tabla 11*.



**Figura 50.** Banco de pruebas “método B”.





**Figura 51.** Grafica distribución normal MOE dinámico "método B".

**Tabla 11.**

*Distribución de probabilidad normal MOE dinámico método "B"*

Espécimen Edad	Número de probetas	Distribución de probabilidad	Valor característico (GPa)	Desviación estándar
Palma chonta 30-35 años	4	Normal	14,553	0,4726

#### 4.4. Comparación módulo de elasticidad estático (MOE estático) contra módulo de elasticidad dinámico (MOE dinámico)

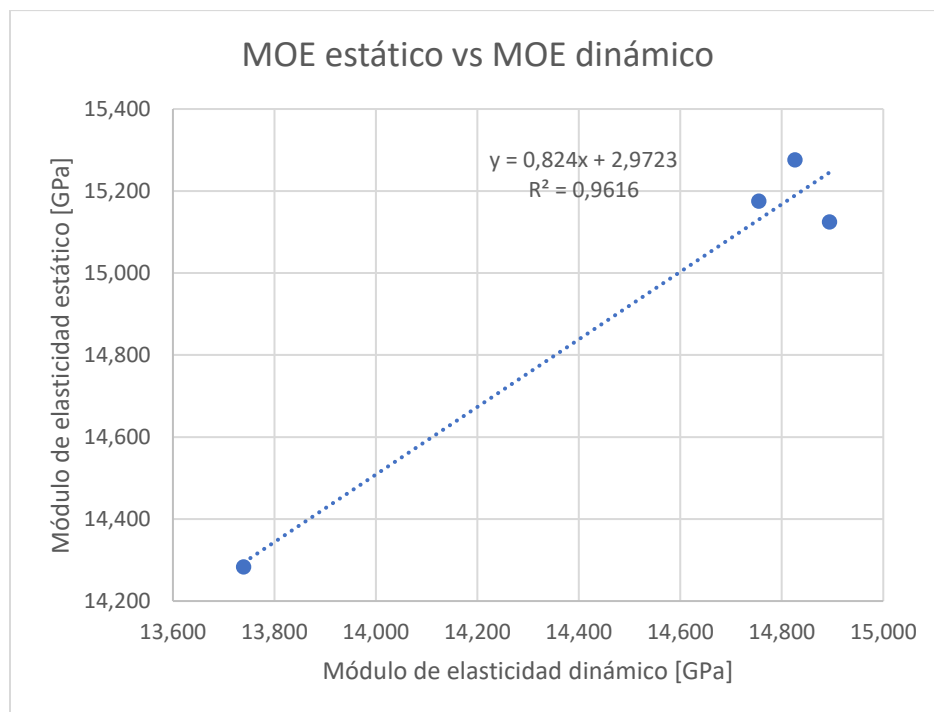
Se comparó los resultados mediante un gráfico de dispersión (*Figura 52*) de cuatro probetas del "método B" del MOE dinámico con cuatro probetas del MOE estático basándonos en que estos tengan densidades similares, ver *Tabla 12*.

**Tabla 12.**

*Resultados MOE estático y MOE dinámico de probetas con densidades similares.*

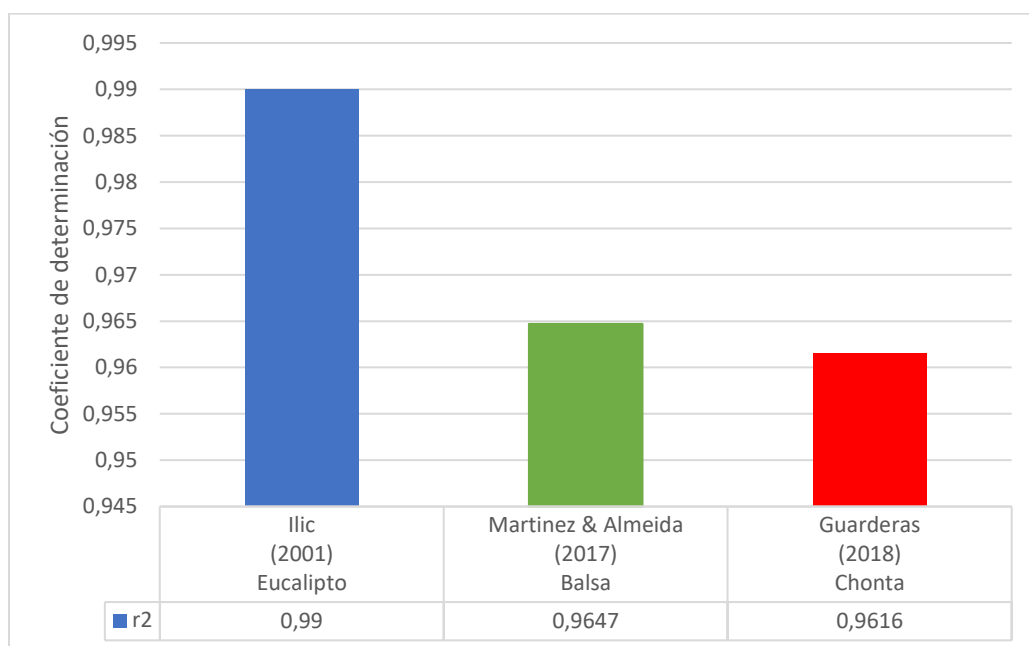


Densidad (kg/m3)	MOE Dinámico (GPa)	Densidad (kg/m3)	MOE Estático (GPa)
1126,035	14,754	1135,672	15,175
1096,427	14,825	1162,002	15,276
1113,591	14,894	1121,552	15,124
1036,564	13,739	1070,638	14,283



**Figura 52.** Gráfico de dispersión MOE estático vs MOE dinámico.

Estudios anteriores obtuvieron relaciones muy altas entre el MOE estático y el MOE dinámico, Ilic (2001) con la madera de eucalipto obtuvo un  $r^2 = 0,99$ , Martínez y Almeida (2017) con la madera de balsa obtuvo un  $r^2 = 0,9647$ . Como podemos apreciar en la Figura 52 se obtuvo un valor de correlación de  $r^2 = 0,9616$  con tendencia lineal, es decir que el MOE estático y el MOE dinámico son semejantes y que esta relación en los materiales de madera se cumple (ver Figura 53).



**Figura 53.** Datos valor de correlación investigaciones anteriores.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- Se caracterizó mecánicamente a la planta *Bactris gasipaes kunth* (chonta) basándose en los ensayos destructivos de la norma ASTM D143-14, la distribución de probabilidad Log-Logística permitió una estimación precisa del valor característico. Los valores medidos fueron para la resistencia a la tracción 123,243 MPa, resistencia a la compresión paralela a la fibra 101,073 MPa, resistencia a la compresión perpendicular a la fibra de 10,127 MPa y el módulo de elasticidad (MOE estático) fue de 15,23 GPa.
- Las variaciones de los resultados que se obtuvieron con respecto a otras investigaciones son principalmente por la edad de los árboles, el lugar de extracción, el tiempo y temperatura de secado. Como se observó el módulo de elasticidad (MOE) disminuye y las resistencias aumenta a mayor edad, a su vez, el clima y el suelo afecta en el crecimiento de la palma haciendo que la distribución radial de las fibras en la periferia sea menor. Si el secado de las probetas es rápido y a temperaturas altas la madera tiende a torcer generando pequeñas grietas internas que actúan como concentradores de esfuerzos disminuyendo las propiedades mecánicas de la palma.

- Las gráficas de aceleración vs tiempo y espectro de frecuencia son importantes para describir, obtener la frecuencia natural y verificar el comportamiento de la onda en la caracterización dinámica. En el “método A” los datos obtenidos no fueron confiables debido a que las probetas eran demasiado macizas dimensionalmente provocando que el acelerómetro obtenga ondas de vibración con una razón de amortiguamiento grande, disipando la energía de golpe rápidamente. Contrario al “método B”, donde las dimensiones de las probetas permitían una vibración libre con una razón de amortiguamiento menor disipándose la energía del golpe en un tiempo mayor, obteniendo un valor de 14,55 GPa.
- Existe una relación muy fuerte en maderas entre el MOE estático con el MOE dinámico, la investigación obtuvo un coeficiente de determinación de 0,9616, valor no muy alejado al que obtuvieron Martínez y Almeida (2017) de 0,9647 con la madera de Balsa y Ilic (2001) con 0,99 en la madera de eucalipto. Poniendo en consideración que las relaciones obtenidas en esta especie son consistentes porque son un claro indicador que las vibraciones de resonancia y el análisis espectral constituyen un medio adecuado, conveniente y simple para determinar las propiedades elásticas de la madera de diferentes tamaños como un ensayo END.

## 5.2. Recomendaciones

- Tener un control en los procesos de secado y corte para la obtención de las probetas evitará que la madera se doble y se agriete internamente disminuyendo la variación entre las muestras y se logre la mayor reproducibilidad posible en los datos obtenidos de las distintas caracterizaciones.
- Para el análisis dinámico en base a la teoría de viga empotrada a un extremo y libre en el otro, el sistema de sujeción de probetas tiene que simular el empotramiento total asegurando que la muestra no resbale y el sensor capte datos confiables.

## 5.3. Trabajos futuros

- Realizar un estudio microestructural y macroestructural de las propiedades termo físicas, químicas y dieléctricas, prueba de compresión en tronco completo (secciones circulares), y verificar las pruebas experimentales en modelos de elementos finitos.
- Profundizar el estudio y realizar el ensayo dinámico con un mayor número probetas, para validar los datos mediante técnicas estadísticas como distribuciones de probabilidad y gráficos de dispersión más específicos entre el MOE estático y el MOE dinámico.
- Realizar la caracterización dinámica de la madera *Bactris gasipaes* con otros métodos, como el análisis de imágenes, microondas o ultrasonido.
- Imitación de la estructura del tronco de la chonta mediante fibras de electrospinning.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achá N, E. (2011). *Bamboo: high tech material for concrete reinforcement*. Rio de Janeiro: Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro.
- Amada, S. (1996). The mechanical structures of bamboos in viewpoint of functionally gradient and composite materials. *Journal of Composites Materials*, 30.
- ASTM D143, A. (2014). *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. ASTM Internacional.
- ASTM D4442, A. (2016). *Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials*. ASTM Internacional.
- ASTM E1876, A. (2001). *Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by impulse Excitation of Vibration*. West Conshohocken: ASTM Internacional.
- Bacellar, J., & R, A. (2009). *Mechanical Propieties of Pupunha (Bactris gasipaes) Palm*. Río de Janeiro: Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro.
- Baker, R. (2001). Relationship among the dynamic and static elastic properties or air-dry Eucalyptus delegatensis. *Holz als Roh- und Werkstoff* , 169-175.
- Barrueco, P. D. (2007). *La fiesta del UWI (Crónicas, tradiciones y entrevistas)*. Quito: Abya Yala.

- Budynas, R., & Nisbett, J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana.
- Calvo, I. (1981). *Usos Culinarios del Chontaduro*. Cali, Colombia: Instituto Vallecano de Investigaciones Científicas.
- Camacho, E. (1972). *El pejibaye (Guilielma gasipaes (B.K) L. H. Bailey)*. Turrialba, Costa Rica: IICA.
- Castillo, P. (2015). *Proyecto de factibilidad para la creación de una empresa dedicada a la producción y comercialización de elaborados del chontaduro*. Cuenca : Universidad Politécnica Salesiana.
- Clement, C. (1988). Domestication of the Pejibaye Palm (*Bactris gasipaes*). *Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia*, 35 p.
- Clement, C y otros. (2004). Why extensive research and development did not promote use of peach palm fruit in Latin America. *Agroforestry Systems* , 195-206.
- CORPEI. (2009). *Perfil del palmito*. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- CORPOICA. (1996). El cultivo de chontaduro (*Bactris Gasipaes*). *Centro de investigaciones Macuagal. Programa regional agrícola*, 12 p.
- Ghavami, K., & Solorzano, I. (1995). *Comparison between microstructure of bamboo culm and wood*, In: *Acta Microscopia*. Caxambu, Brasil: 3rd inter-American conference on electron microscopy and XV meeting of the Brazilian society for electron microscopy.

- Ghavami, K., Rodrigues, C., & Paciornik, S. (2003). Bamboo: Functionally graded composite material. *Asian Journal of Civil Engineering (building and housing)*, 4: 1-10.
- INCOTEC. (2007). *NTC 301: Requisitos de las probetas pequeñas para los ensayos físicos y mecánicos de la madera* (Vol. 1).
- Játiva, M. (1998). *El palmito de chontaduro en la amazonía ecuatoriana*. Francisco de Orellana: INIAP - Estación experimental amazonica.
- Martinez, D. (2013). *Physical and Mechanical Properties of the Peach palm (Bactris gasipaes Kunth) as a Structural Composite Material*. Río de Janeiro, Brasil: Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro.
- Mora-Urpi, J., & Echeverria, J. (1999). *Palmito de pejibaye (Bactris Gasipaes Kunth)*. Universidad de Costa Rica.
- Mora-Urpí, J., Weber, J., & Clement, R. (1997). *Peach Palm. Bractis gasipaes Kunth. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops*. (G. P. Institute, Ed.) Rome, Italy: Institute of Plant Genetic Research.
- OTCA. (2003). *Tratado de cooperación Amazónica*. Lima.
- Patiño, V. (1960). Historia colonial y nombres indígenas de La Palma pejibaye (Guilielma gasipaes H.B.K. Bailey). *Academia Colombiana de Antropología*, 9 : 25-70.



- Patiño, V. (1989). Comportamiento de plantas nativas colombianas bajo cultivo: situación actual Del cultivo Del chontaduro. *Rev. Colombiana de Ciencia*, 17 : 259-266.
- Pytel, A., & Singer, F. (1994). *Resistencia de Materiales*. México: Oxford.
- Rich, P. (1987). Mechanical structure of the stem of arborescent palms. *Botanical Gazette*, 1(148), 42-50.
- S. Bacellar, R., & R. M. d'Almeida, J. (2009). *Palm, Mechanical Properties of Pupunha (Bactris gasipaes)*. Río de Janeiro: Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro.
- Valencia, R., Montúfar, R., Navarrete, H., & Balslev, H. (2013). *Palmas Ecuatorianas: biología y uso sostenible*. Quito, Ecuador: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Van der Eynden, V. (2004). Edible palms of Southern Ecuador. *Principes*, 48 : 141 - 147.
- Vargas, O. (2015). Caracterización físico-mecánica de las fibras de la palma de chontaduro. *Revista Inventum*, 10, 53-68.  
doi:10.26620/uniminuto.inventum.10.19.2015.53-58
- Vos, T., Barber, R., & Bel, B. (2015). Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 301 acute and chronic diseases and injuries in 188 countries, 1990–2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *Lancet* 386(9995),, 743–800.

Wegst, U. (2011). Bending efficiency through property gradients in bamboo, palm, and wood-based composites. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*(4), 744-755.

Zamora, L. (2003). *Determinación etimológica de la "bacteriosis" del palmito de pejibaye (Bactris gasipaes) en Costa Rica* . San José: Universidad de Costa Rica.