



UNIVERSIDAD DE SANCTI SPIRITUS  
José Martí Pérez



## FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DEPARTAMENTO DE AGRONOMÍA

### TRABAJO DE DIPLOMA

Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Pinus caribaea* M. var. *caribaea* B & G y su relación con las variables dasométricas en una población de 40 años de la UEB Agroforestal Trinidad

Autora: Yeileny Barreto Gómez

2019

“Año 61 de la Revolución”

UNIVERSIDAD DE SANCTI SPÍRITUS “JOSÉ MARTÍ PÉREZ”  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DEPARTAMENTO DE AGRONOMÍA

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

*Presentado en opción al título académico de Ingeniero Forestal*

Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Pinus caribaea* M. var. *caribaea* B & G y su relación con las variables dasométricas en una población de 40 años de la UEB Agroforestal Trinidad

Autora: Yeileny Barreto Gómez

Tutores: MSc. Luis Alberto Delgado Fernández (Prof. Auxiliar)

Ing. Yordani Crespo Martínez

Sancti Spíritus, 2019  
“Año 61 de la Revolución”

## **DEDICATORIA**

Dedico la presente, especialmente a mi familia, que siempre estuvo para mí en la formación pedagógica y personal de mi vida; rebasando conmigo cada una de las trabas; a mi esposo por su apoyo incondicional y por su dedicación, firmeza y perseverancia que me ha brindado en todo momento para poder terminar mis estudios con éxito.

## **AGRADECIMIENTOS**

Le agradezco inmensamente a:

- ✓ Mis tutores: Yordani Crespo Martínez y Luis Alberto Delgado Fernández por toda su dedicación para poder culminar mi trabajo de diploma.
- ✓ A toda mi familia por su apoyo incondicional para poder terminar mis estudios, en especial a mis padres, hermana y mi esposo.
- ✓ A todos los profesores de la carrera que me impartieron clases en estos cinco años y me ayudaron a formarme como futura ingeniera.
- ✓ A los compañeros que atienden la ordenación y el aprovechamiento en la UEB Agroforestal de Trinidad por su apoyo en la toma de las muestras.
- ✓ A la técnica del laboratorio del INA por su ayuda en las labores del laboratorio.

A todos muchas gracias.

## RESUMEN

Con el objetivo de evaluar propiedades físico-mecánicas de la madera de *P. caribaea* var. *caribaea* y su relación con las variables dasométricas en una población de 40 años de la UEB Agroforestal de Trinidad se realizó un análisis del comportamiento de estas de acuerdo a su ubicación respecto al radio del fuste, en dirección médula-corteza. Para ello, se establecieron parcelas temporales de muestreo en el rodal donde la empresa se encontraba realizando labores de aprovechamiento. Se derribaron 6 árboles a partir de los cuales se tomaron las muestras necesarias para la determinación de las propiedades físico-mecánicas según la Norma UNE-56528-78. Las probetas elaboradas correspondieron a cuatro posiciones (1- médula, 2- duramen, 3- albura y 4- corteza). Las propiedades evaluadas mostraron una variación significativa en correspondencia con la posición; la densidad, contracción (radial, tangencial, longitudinal y volumétrica), compresión paralela y perpendicular, así como la flexión estática, aumentaron a medida que se aleja la madera de la médula, algunas de estas tuvieron variaciones, debido al alto contenido de resina que posee la madera en la posición uno. En el caso del coeficiente de anisotropía dimensional se constató una disminución en las posiciones 1 y 4. En general los mejores resultados se obtuvieron a medida que las muestras se encontraban más alejadas de la médula del árbol. A partir de los resultados obtenidos se pudo clasificar la madera de los árboles en el área de estudio en pesada a muy pesada por su densidad, de contracción mediana, con un módulo de ruptura a compresión muy alto y a flexión estática de medio a bajo. Se determinó que las variables dasométricas que más influyen sobre el comportamiento de las propiedades estudiadas fueron las relacionadas con el crecimiento del árbol.

**Palabras claves:** *Pinus caribaea*, propiedades físico-mecánicas; variables dasométricas

## **ABSTRACT**

In order to evaluate physical-mechanical properties of the wood of *P. caribaea* var. *caribaea* and its relationship with the dasometric variables in a population of 40 years of the UEB agroforestry of Trinidad was an analysis of the behavior of these according to their location with respect to the radius of the shaft, in the medulla-cortex direction. To do this, temporary sampling plots were established in the stand where the company was performing harvesting work. Six trees were felled from which the necessary samples were taken for the determination of the physical-mechanical properties according to Standard UNE-56528-78. The processed specimens corresponded to four positions (1- marrow, 2- heartwood, 3- sapwood and 4- cortex). The evaluated properties showed a significant variation in correspondence with the position; the density, contraction (radial, tangential, longitudinal and volumetric), parallel and perpendicular compression, as well as the static flexion, increased as the wood moved away from the marrow, some of these had variations, due to the high resin content It has wood in position one. In the case of the dimensional anisotropy coefficient, a decrease was observed in positions 1 and 4. In general, the best results were obtained as the samples were farthest from the marrow of the tree. From the results obtained it was possible to classify the wood of the trees in the study area from heavy to very heavy due to its density, of medium contraction, with a modulus of rupture at very high compression and static flexion from medium to low. It was determined that the dasometric variables that most influence the behavior of the properties studied were those related to the growth of the tree.

**Keywords:** *Pinus caribaea*, physico-mechanical properties; dasometric variables

## ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN .....   | 1  |
| 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....  | 5  |
| 2.1 Concepto de madera y aspectos que la distinguen.....  | 5  |
| 2.2 Estructura macroscópica de la madera .....  | 6  |
| 2.2.1 Corteza .....   | 7  |
| 2.2.2 Anillos de crecimiento.....   | 7  |
| 2.2.3 Textura .....   | 8  |
| 2.2.4 Albura y duramen .....  | 9  |
| 2.2.5 Color de la madera .....  | 9  |
| 2.3 Estructura microscópica de la madera .....  | 10 |
| 2.3.1 Estructura microscópica de las maderas de coníferas .....   | 11 |
| 2.4 Propiedades de la madera .....  | 11 |
| 2.4.1 Las propiedades básicas de la madera .....  | 12 |
| 2.4.1.1 Humedad de la Madera.....   | 12 |
| 2.4.1.2 Humedad en la madera aserrada.....  | 13 |
| 2.4.2 Propiedades físicas de la madera.....   | 14 |
| 2.4.2.1 Densidad.....   | 15 |
| 2.4.2.2 Contracción e Hinchazón .....   | 16 |
| 2.4.3 Propiedades mecánicas de la madera.....   | 18 |
| 2.4.3.1 Resistencia a la compresión .....   | 18 |
| 2.4.3.2 Flexión estática .....  | 21 |
| 2.5 Comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de la madera del género <i>Pinus</i> en diferentes regiones: ..... | 23 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS .....   | 23 |
| 3.1 Generalidades y ubicación del estudio.....  | 23 |
| 3.1.1 Ubicación del área de estudio.....  | 23 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.2     | Toma de Muestras .....  | 24 |
| 3.3     | Preparación de las muestras.....  | 25 |
| 3.4     | Realización de ensayos .....  | 26 |
| 4       | Humedad de la madera.....   | 26 |
| 5       | Ensayos de densidad.....  | 27 |
| 5.1.1.1 | Densidad Aparente .....   | 28 |
| 5.1.1.2 | Densidad verde o saturada .....   | 28 |
| 5.1.1.3 | Densidad seca al aire.....  | 28 |
| 5.1.1.4 | Densidad Anhidra.....   | 28 |
| 5.1.1.5 | Densidad Básica .....   | 28 |
| 6       | Ensayos de Contracción .....  | 29 |
| 6.1.1.1 | Anisotropía de contracción.....   | 31 |
| 6.2     | Ensayos de Compresión .....   | 31 |
| 6.3     | Ensayo de Flexión estática .....  | 32 |
| 6.4     | Influencia de las variables dasométricas en las propiedades físico-mecánicas de la madera de <i>P. caribaea var caribaea</i> .....  | 33 |
| 6.5     | Análisis estadístico.....   | 33 |
| 4.      | RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....   | 34 |
| 4.1     | Comportamiento de las propiedades físicas de la madera de <i>P. caribaea var caribaea</i> en relación a su ubicación respecto al radio del fuste.....   | 34 |
| 4.1.1   | Resultados de los ensayos de densidad de la madera. ....  | 34 |
| 4.1.1.1 | Comparación de los valores de densidad de la madera de <i>P. caribaea var caribaea</i> en las diferentes posiciones respecto al radio del fuste.....  | 34 |
| 4.1.1.2 | Clasificación de la madera <i>P. caribaea var caribaea</i> según su densidad  | 39 |
| 3.1.1   | Comportamiento dimensional de la madera de <i>P. caribaea var caribaea</i> ...  | 40 |
| 3.1.1.1 | Comparación de la contracción radial, tangencial, longitudinal y Anisotropía de la madera de <i>P. caribaea var caribaea</i> de acuerdo con las diferentes posiciones respecto al radio del fuste. .... | 40 |

|                                  |   |    |
|----------------------------------|---|----|
| 3.1.1.2                          | Clasificación de la madera de <i>P. caribaea</i> var <i>caribaea</i> en cuanto a su variación dimensional. ....   | 47 |
| 3.2                              | Comportamiento de las propiedades mecánicas de la madera de <i>Pinus caribaea</i> var <i>caribaea</i> en relación a su ubicación respecto al radio del fuste. ....                                      | 48 |
| 3.2.1                            | Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra de la madera. ....   | 48 |
| 3.2.1.1                          | Comparación de los esfuerzos de compresión paralela y perpendicular a la fibra de la madera de <i>Pinus caribaea</i> var <i>caribaea</i> de las diferentes posiciones respecto al radio del fuste. .... | 49 |
| 3.2.1.2                          | Clasificación de la madera de <i>P. caribaea</i> var <i>caribaea</i> en cuanto a los esfuerzos de compresión paralela y perpendicular de la fibra. ....   | 51 |
| 3.2.2                            | Resultados de los ensayos sobre resistencia de la madera de <i>P. caribaea</i> var <i>caribaea</i> a la flexión estática. ....  | 51 |
| 3.2.2.1                          | Comparación de los esfuerzos de compresión paralela y perpendicular de la fibra de la madera en las diferentes posiciones. ....   | 51 |
| 3.2.2.2                          | Clasificación de la madera de <i>P. caribaea</i> var <i>caribaea</i> en cuanto al módulo de ruptura a flexión estática. ....  | 55 |
| 3.3                              | Análisis de la relación entre las propiedades físicas, mecánicas y las variables dasométricas, en la madera de <i>P. caribaea</i> var <i>caribaea</i> . ....  | 55 |
| CONCLUSIONES.....                |   | 58 |
| RECOMENDACIONES .....            |   | 59 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... |   | 60 |
| ANEXOS. ....                     |   | 60 |

## 1. INTRODUCCIÓN

Con el aumento de la densidad poblacional del mundo es inevitable que se incrementen las necesidades óptimas de vida de la población humana y esto ha traído consigo una demanda de los recursos naturales sin tener en cuenta su capacidad de recuperación.

Debido al acelerado ritmo actual de consumo que están sufriendo los árboles, no será suficiente la reserva de estos para suplir las necesidades más inmediatas de las próximas generaciones, ya que, a pesar de ser un recurso renovable, muchas veces no se tiene en cuenta el tiempo que se tardan en ser aprovechables y los factores de los que depende este aprovechamiento, a lo cual se suma la demanda que tienen en el mercado y la consecuente disminución de los suministros de los mismos.

El incremento continuo de la población junto al consecuente aumento de la demanda de vivienda y otras necesidades, auguran un incremento notable del consumo de madera aserrada en los próximos años, según las estadísticas (FAO, 1993; citado por Leckoundzou, 2011).

La madera, es el material por excelencia más noble que jamás la especie humana ha utilizado tanto en la industria como en la construcción, (Martínez, 2014) pues su estructura y composición le confieren particulares propiedades que la convierten en un material idóneo para la fabricación de prácticamente cualquier obra, desde simples objetos hasta diseños de mayor tamaño y complejidad, como puede ser una edificación (Ibrahim, 2007).

Esta tiene como principal característica el estar compuesta por el elemento químico Carbono (-C-) (Fernández, 2001), que forma un conjunto de fibras especializadas en diferentes funciones las cuales le confieren a este material múltiples propiedades, de estas, las más importantes son las conocidas como propiedades físicas y mecánicas pues son las utilizadas como índice para evaluar si las características o calidad de una madera son adecuadas para un uso particular (Brazier y Howell, 1979), (Panshin y De Zeeuw, 1980),(Schniewind, 1989).

El estudio de las propiedades físicas y mecánicas de la madera sin duda es necesario para optimizar la utilización de este recurso. Este análisis no se realiza habitualmente en las Empresas Agroforestales del país y debido a esto se hace un uso inadecuado de esta materia prima.

De los bosques destinados a la producción de madera en Cuba los que más se destacan son los pinares. Estos ocupan grandes extensiones de tierra en el archipiélago y por tanto en los bosques de pinos cubanos se pueden encontrar una gran cantidad de recursos madereros y no madereros y una gran variedad de especies animales y vegetales las cuales se desarrollan en este tipo de formación boscosa (Crespo, 2017).

En la isla, habitan cuatro especies endémicas de pino: *Pinus tropicalis* Morelet, *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret & Golfari (Pc), *Pinus cubensis* Griseb y *Pinus maestrensis* Bisse, de ellas las dos primeras en la zona occidental y las dos últimas en la oriental. Además, se pueden encontrar algunas plantaciones de Pc en la región central del país, específicamente en el macizo montañoso de Guamuhaya, las cuales se han adaptado muy bien a las condiciones edafoclimáticas de esta zona.

Debido a que la madera de estas especies es una materia prima muy demandada en Cuba, es de suma importancia la racionalización de este recurso que desde los inicios de la humanidad fue de los primeros materiales utilizados en la elaboración de sus instrumentos y viviendas. La madera mediante simples transformaciones confeccionó los útiles más antiguos de los que hoy se tiene constancia (Ibrahim, 2007).

Entre las especies que más se aprovechan, se destaca Pc la cual ha sido objeto de estudio de un sin número de investigaciones, en las que sobresalen aquellas dedicadas al estudio de su madera. Sin embargo, estos estudios son casi en su totalidad para los árboles que crecen en la región occidental del país, donde la especie se desarrolla en condiciones edafoclimáticas muy distintas a las que influyen sobre las plantaciones de Pc en las áreas de la zona central. De acuerdo con Ibrahim, (2007); las características de la madera varían según las condiciones edáficas y climáticas.

Las propiedades físico-mecánicas de la madera que manifiesta una especie en particular, podrían variar debido a otros factores tales como: sitio y condiciones de crecimiento, edad, altura, tasa de crecimiento, prácticas silviculturales y estado fitosanitario, además, su valor o magnitud se vería afectado por la presencia en la madera de: gradientes de humedad, dirección o desviación del grano o fibra, nudos (vivos o muertos), madera de reacción, proporción de madera juvenil, deterioro por agentes bióticos y abióticos, así como por su ubicación respecto al radio del fuste, (Serrano *et al.*, 2001); por lo que, sin dudas el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de la madera es necesario para optimizar la utilización de este recurso.

Como se indicó antes, este análisis no se realiza habitualmente en las Empresas Agroforestales del país, la de Trinidad no escapa a este fenómeno, pues en sus aserraderos y carpinterías se procesan grandes cantidades de madera de la especie *Pc* procedente de plantaciones sobremaduras establecidas en el Escambray de las cuales, en su mayoría, no se conoce el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas.

Al ignorar el comportamiento de estas propiedades, se comete el error de darle a esta materia prima un uso indiscriminado, lo cual conlleva a una utilización inadecuada de los recursos naturales, afectando directamente un manejo sustentable de la biomasa que se desarrolla en los ecosistemas forestales pertenecientes a esta empresa. Teniendo en cuenta lo abordado anteriormente el problema científico de esta investigación radica en: ¿Cómo se comportan las propiedades físico- mecánicas de la madera de *Pinus caribaea* Morelet var *caribaea* Barret & Golfari en relación a su ubicación respecto al radio del fuste y a las variables dasométricas en una población de 40 años, de la UEB Agroforestal de Trinidad?

La investigación se desarrolló sobre la base de la siguiente **hipótesis**: las propiedades físico-mecánicas de la madera de *P. caribaea* var *caribaea* varían significativamente en relación a su ubicación respecto al radio del fuste y a las variables dasométricas en la población objeto de estudio.

El **objetivo general** fue: evaluar el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de la madera de *P. caribaea* var. *caribaea* en relación a su ubicación

respecto al radio del fuste y a las variables dasométricas en una población de 40 años de la UEB Agroforestal de Trinidad.

**Objetivos específicos:**

1. Determinar la variación que experimentan las propiedades físico-mecánicas de la madera de *P. caribaea* var *caribaea* en dirección médula-corteza.
2. Clasificar la madera de *P. caribaea* var *caribaea* en la población objeto de estudio de acuerdo a sus propiedades físico-mecánicas.
3. Determinar la relación entre las propiedades físico- mecánicas de la madera y las variables dasométricas de *P. caribaea* var *caribaea* a la edad de 40 años en la población objeto de estudio.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Concepto de madera y aspectos que la distinguen

La madera es la parte sólida de los árboles situada debajo de la corteza. Se define también como el leño situado entre el conducto medular y la corteza, estructurada en dos capas superpuestas que en intensidad de color ganan a medida que se acercan al centro, distinguiéndose por esta razón en dos partes, corazón o madera, y la otra parte periférica que se llama albura o alburno. En sentido amplio la madera es un conjunto de elementos lignificados de una planta cualquiera. (Díaz *et al.*, 1986).

Por otra parte, Álvarez *et al.*, (2013) denominan a la madera como el conjunto de tejidos del xilema que forman el tronco, las raíces y las ramas, de los vegetales leñosos, excluida la corteza.

Es importante señalar los factores que según Kollmann y Cote, (1963) distinguen la madera de los demás materiales:

1. La madera es bastante liviana y por tanto de manejo fácil. Cuando está seca puede transportarse a largas distancias con un costo relativamente bajo.
2. La madera puede trabajarse fácilmente en diversas formas con herramientas sencillas y relativamente con poca destreza.
3. Por su porosidad y por la naturaleza de las sustancias que conforman las paredes de la célula, la madera es una de las pocas materias primas que pueden unirse con clavos y tornillos.
4. La naturaleza porosa de la madera, posibilita la absorción de pinturas y otros acabados.
5. La madera caracterizada por ausencia de defectos y bajos niveles de humedad, puede compararse y muy favorablemente en resistencia con el acero y otros materiales de construcción.
6. La madera es mala conductora del calor, del sonido y de la electricidad, por lo que resulta un excelente material aislante.

7. La madera se dilata y contrae muy poco con los cambios de temperatura.
8. La madera absorbe choques y vibraciones mejor que otros materiales con que compite, por lo que se prefiere para construir ejes de carros, radios de ruedas, traviesas de ferrocarril, entre otras aplicaciones fundamentales.
9. La madera no se oxida y resiste la acción del ácido y del agua salada mejor que la mayoría de los materiales.
10. Los defectos presentes en la madera pueden descubrirse frecuentemente en la superficie, lo que posibilita rechazarla o darle un destino específico según sea su grado de debilitamiento.
11. La madera no cristaliza ni se vuelve quebradiza como los metales, ni pierde sus características de cohesión como el hormigón, cuando se somete a temperaturas muy bajas.
12. Antes de quebrarse presenta síntomas que lo anuncian; hecho de suma importancia en algunas construcciones como son los puentes y soportes de minas.

## **2.2 Estructura macroscópica de la madera**

Se entiende por estructura macroscópica de la madera todos aquellos elementos que la conforman que se pueden apreciar a simple vista, sin necesidad de equipos o instrumentos sofisticados.

La madera no es un material homogéneo, sino que está formado por un conjunto de células especializadas en tejidos que llevan a cabo las tres funciones fundamentales del vegetal: la conducción de la savia, la transformación y almacenamiento de los productos vitales y el sostén del vegetal. (Álvarez *et al.*, 2013)

La formación de la madera tiene lugar a partir de una capa fina, llamada *cambium* (Figura 1), existente entre la madera y la corteza, donde se encuentran las células generadoras del crecimiento en espesor. Cuando las condiciones son favorables, mediante un proceso de división celular, las células cambiales producen células de madera hacia dentro y de corteza hacia fuera, añadiendo, cada período vegetativo, una

nueva capa de madera que cubre la ya existente y hace aumentar el espesor del árbol. (Álvarez *et al.*, 2013)

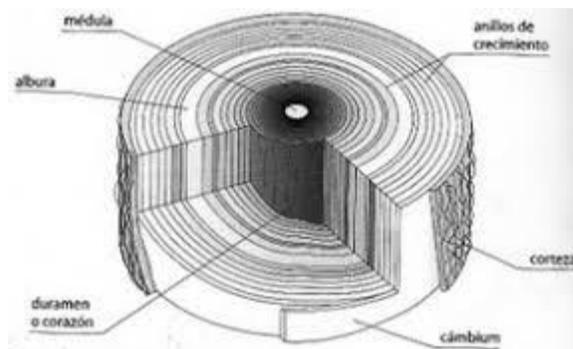


Figura 1. Sección transversal del fuste de un árbol.

Fuente: Armstrong, 2000 citado de (Álvarez *et al.*, 2013)

### 2.2.1 Corteza

De acuerdo con Winandy, (1994), la sección transversal de un árbol es dividida en tres claras categorías que consisten en la corteza, madera, y cambium.

La corteza es la capa exterior y está compuesta por floema exterior muerto de material poroso seco y floema interno delgado de células vivientes. Sus funciones primarias son protección y la conducción de nutrientes. El espesor y apariencia de la corteza varían sustancialmente dependiendo de las especies y de la edad del árbol. (Acuña y Casado, 2005)

### 2.2.2 Anillos de crecimiento

Estos están formados por una capa de madera de primavera y otra de verano (Figura 2); su número indica la edad de la sección que se considere y si esta es de la base del fuste, coincidirá con la edad del árbol. En las zonas tropicales, al poder existir más de un período vegetativo durante el año, no siempre coincide el número de anillos con la edad de los árboles. (Álvarez *et al.*, 2013)

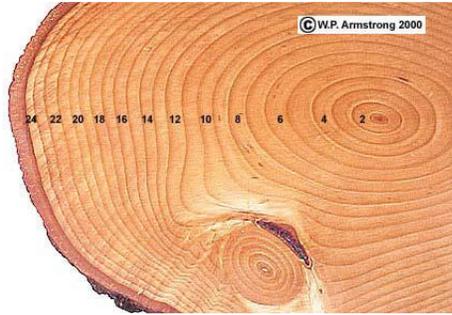


Figura 2. Muestra de anillos de crecimiento.

Fuente: Armstrong, 2000 citado de (Álvarez *et al.*, 2013)

El contraste entre las maderas de primavera y verano, más patente en las coníferas que, en las frondosas, hace fácilmente visible y diferenciable la madera formada cada período vegetativo. (Álvarez *et al.*, 2013)

La densidad de la madera temprana y el porcentaje de madera tardía, son dos importantes parámetros para determinar la densidad de la madera de un árbol. La relación de densidades entre madera de verano y la de primavera es muy alta en las coníferas. Esta diferencia de densidades es la causa de la formación de superficies rugosas en puertas y ventanas envejecidas por la erosión, en las que alternan líneas salientes, que corresponden a la madera de verano, con otras entrantes, de madera de primavera que, al ser blandas, han sufrido más el efecto de la erosión. (Ibrahim, 2007).

Además, según Lessing, (2016) el crecimiento del árbol es más rápido en primavera y más lento en el verano, de esta manera resulta maderas formadas en diferentes estaciones del año. Las bandas alternadas de madera de formación temprana y tardía marca el crecimiento de un año y la formación de un anillo.

### 2.2.3 Textura

La relación existente entre la anchura de la madera de verano, dentro del anillo de crecimiento y la total del anillo, se denomina textura, que presenta una importancia estratégica ya que permite un mejor análisis de la calidad para cada uno de los usos que se le pretenda dar a la madera durante su primera y segunda transformación mecánica. (Álvarez *et al.*, 2013)

Mayores texturas suelen ser indicativas de mayores densidades (por la mayor densidad de la madera de verano), si bien no es posible una correlación directa y universal textura – densidad de la madera. (Ibrahim, 2007).

#### Albura y duramen

Los anillos más exteriores del fuste que corresponden a los últimos formados por el cambium y, por tanto, los más próximos a él, ejercen las actividades normales de las células vivas. Esta zona del xilema, donde se desarrolla toda la actividad vital del mismo, recibe el nombre de Albura, debido a su color más o menos claro o blanquecino. El número de anillos que la forma varía con la especie, edad y condiciones de vida. (Álvarez *et al.*, 2013)

Con el paso del tiempo los anillos de la albura más alejados del cambium van perdiendo su actividad vital y mueren, sufriendo una serie de transformaciones químicas con la formación de compuestos que impregnan la pared celular y que le dan un color más oscuro, variable según la composición química, que caracteriza la madera de la especie. Esta zona recibe el nombre de duramen y su misión en el árbol es únicamente la resistencia (Ibrahim, 2007).

En las coníferas el duramen coloreado contiene mucha más resina y aceite que penetran por los intersticios de la pared celular. Esta impregnación reduce con su presencia el hinchamiento y contracción, así como la penetración de líquidos. Además, contiene sustancias solubles, hidratos de carbono polisacáridos y taninos que al oxidarse le dan su característico color oscuro. (Álvarez *et al.*, 2013)

#### **2.2.4 Color de la madera**

El color de la madera lo definen las sustancias que se encuentran en el lumen celular o impregnan sus paredes, tales como pigmentos, taninos, resinas, gomas o productos derivados, que pueden variar con el tiempo por oxidación. Igualmente teniendo en cuenta que la madera es un material fibroso, la distinta orientación de las fibras producen fenómenos de reflexión y refracción que dan tonalidades de color al variar la

incidencia de los rayos de luz sobre los planos definidos por los estratos de fibras. (Álvarez *et al.*, 2013)

Los factores de los que depende el color son los siguientes:

1. Especie.
2. Edad.
3. Condiciones de crecimiento.
4. Clima.

La intensidad del color varía con la edad. La albura, en la mayor parte de las especies, varía de color amarillento al rojizo o parduzco. Al transformarse en duramen, los tonos se hacen más oscuros, mientras que los colores claros se conservan más. Es pues una característica muy variable. La madera de la mayor parte de las especies se oscurece con la exposición al aire y a la luz, debido a procesos de oxidación y reducción de sus productos de impregnación. (Álvarez *et al.*, 2013)

### **2.3 Estructura microscópica de la madera**

Se refiere a la constitución de la madera en términos de tejidos y células. Tanto en la madera de conífera como en las frondosas, existen dos tipos de tejidos fundamentales: el prosenquimatoso, constituido por células alargadas, fusiformes o filiformes, firmemente unidas por sus cabos o extremos puntiagudos de membranas, y el parenquimatoso, constituido por células más o menos isodiamétricas de membranas sutiles no lignificadas, con protoplasma parietal. (Álvarez *et al.*, 2013)

(Díaz *et al.*, 1986) afirma que la diferencia fundamental entre la conífera y la frondosa radica en que en las primeras predominan las traqueidas (cerca del 95%) con doble función de conducción y sostén. Puede distinguirse con relativa facilidad la madera de primavera de la madera de verano pues su diferencia estriba en el grosor de la pared celular, presentando la madera de primavera paredes más finas con cavidades celulares más amplias que las de verano y a simple vista se aprecian bandas claras y oscuras alternándose.

### **2.3.1 Estructura microscópica de las maderas de coníferas**

Según Álvarez *et al.*, (2013) los tejidos que constituyen la madera de coníferas se encuentran divididos en dos clases de elementos.

#### **ELEMENTOS LONGITUDINALES**

##### A) Prosenquimatosos

1. Traqueidas normales
2. Traqueidas resinosas
3. Traqueidas en cadena

##### B) Parenquimatosos

1. Parénquima longitudinal
2. Células epiteliales: células excretoras de los canales resiníferos

#### **ELEMENTOS TRANSVERSALES**

##### A) Prosenquimatosos

1. Traqueidas radiales, radios estrechos

##### B) Parenquimatosos

1. Parénquima radial, radios leñosos estrechos
2. Células epiteliales: células excretoras de los canales resiníferos

transversales: radios fusiformes.

### **2.4 Propiedades de la madera**

Las propiedades de las maderas varían de la misma forma que las especies vegetales, según las zonas geográficas y los climas. De esta manera, una especie vegetal desarrollada en la misma zona, pero en terrenos diferentes en cuanto a altitud, humedad o composición, acusa notables diferencias. La madera está constituida por células de diversas formas, con paredes de espesores variados y dispuestas diferentemente según las especies, pero siempre orientadas en las direcciones

ortogonales principales (longitudinal, radial y tangencial). Estas células forman la estructura peculiar de la madera, y explican su naturaleza heterogénea y anisótropa. En virtud de ello, las características de las maderas varían de un punto a otro, y también sus resistencias se modifican según las direcciones consideradas y según el origen del árbol. (Coronel, 1994)

#### 2.4.1 Las propiedades básicas de la madera

Vignote y Jiménez, (1996) han establecido tres propiedades básicas fundamentales que distinguen esta materia prima:

- **Anisótropa:** La madera no es un material homogéneo, sino un material muy heterogéneo según el plano o la dirección que se considere, axial, radial o tangencial. Según esto se debe, a que madera está formada por células alargadas, presentando una longitud muy superior a ancho y grueso (frecuentemente entre 50 y 100 veces mayor), y dispuestas principalmente en una dirección
- **Higroscópica:** Capaz de aumentar o disminuir su volumen de agua según sean las condiciones a la que este expuesta.
- **Polar:** Por su carácter polar tiene afinidad con los productos polares como el agua, los pegamentos con carácter polar, los barnices etc.

##### 2.4.1.1 Humedad de la Madera

Se define como la cantidad de agua que posee una madera expresada en función de su peso totalmente seco, referida en porcentaje (Díaz *et al.*, 1986). De la humedad de la madera, dependen casi todas sus propiedades físicas y mecánicas, su mayor o menor aptitud para la elaboración, el rendimiento y su resistencia al ataque de hongos. El agua en la madera puede encontrarse en las tres siguientes formas: como agua de constitución, como agua de impregnación, imbibición o saturación de la pared celular y como agua libre. (Díaz *et al.*, 1986)

**Agua de sorción:** Es la que está retenida por fuerzas de tipo Van der Waals, consecuencia de los grupos polares activos de la pared celular. Esta agua es el que

más fuertemente queda retenido por la pared celular. La madera puede llegar a contener un 8% de peso de agua respecto del peso de la madera seca. (Vigonte, 2017)

**Agua de adsorción:** Es el agua que queda retenido en la pared celular como consecuencia de la fuerza de adhesión superficial. La madera puede llegar a contener hasta un 6 a un 8% de peso de agua respecto del peso de la madera seca. (Vigonte, 2017)

**Agua de condensación o capilar:** Es la retenida por fuerzas capilares, provocadas por los espacios entre microfibrillas. La madera puede llegar a contener entre un 14 a un 16% de peso de agua respecto del peso de la madera seca. (Vigonte, 2017)

**El agua libre** es la existente dentro del lumen de las células, procede de la que el árbol necesita para la conducción de sus elementos nutritivos o aquellos que penetran en la madera por inmersión de ésta en agua. (Álvarez *et al.*, 2013). Su fuerza de retención es muy pequeña, de forma que no puede captar agua de la atmósfera, sólo si se produce una inmersión de la madera en agua. (Vigonte, 2017). Según Hoadley, (1980) la madera en los árboles se encuentra en un ambiente acuoso, la estructura celular contiene excesiva agua (savia) y está completamente hinchada.

Desde el momento que una célula inicial del cambium vascular, se divide para formar nuevas células de xilema, comienza una íntima relación entre la madera y el agua que se mantiene durante toda su vida. Las paredes celulares se forman en un medio acuoso y, al terminar la diferenciación de las células prosenquimatosas y su muerte, gran cantidad de humedad queda dentro de las paredes celulares. Sin duda, la relación humedad-madera tiene una influencia decisiva en las propiedades físicas y mecánicas de la madera y los numerosos problemas que su uso implica. (Echenique y Robles, 1993)

#### **2.4.1.2 Humedad en la madera aserrada**

Se estima que en más del 90% de los problemas de la madera se encuentra involucrada la humedad. Por esto no se debe dejar pasar por alto la relación básica madera-humedad. (Hoadley, 1980)

Independientemente de la humedad contenida en la madera del árbol vivo, al ser expuesta al ambiente esta pierde humedad. La cantidad final perdida de humedad va a depender de las condiciones atmosféricas existentes. En orden inverso, la madera seca expuesta en un ambiente con una humedad relativa alta, o en contacto con agua líquida, absorberá humedad; por lo tanto, su contenido de humedad aumentará. La saturación tal vez aumente en valores muy altos, esto dependiendo de la densidad de la madera. (Tsoumis, 1991)

El contenido de humedad de la madera verde, es decir, la del árbol recién derribado, varía según la especie, albura, duramen, sitio, edad y época del año en que se corta el árbol. (Echenique y Robles, 1993)

El estudio tecnológico de la relación entre el agua y la madera, es seguramente, el más importante de todos los que dependen de este material, dado que afecta a la mayoría de los procesos de transformación de la madera. Así, la humedad de la madera influye de forma determinante en la concepción de procesos tales como el aserrado, el cepillado, el encolado, el barnizado, etc. y sobre todo en sus dimensiones, es decir, que la madera varía sus dimensiones con el contenido de humedad, hinchándose cuando gana humedad y mermando cuando la pierde. (Vignote y Jiménez, 1996)

#### **2.4.2 Propiedades físicas de la madera**

Según Álvarez *et al.*, (2013) y Spavento *et al.*, (2008) las propiedades físicas de la madera son aquellas que determinan su comportamiento ante los distintos factores que intervienen en el medio ambiente normal, sin producir ninguna modificación mecánica o química en su estructura. Aunque el concepto no quede completamente definido, ya que muchos producen deformaciones, tales como la hinchazón y la contracción, es lo suficientemente amplio para englobar las que corrientemente se conocen con el nombre de propiedades físicas de la madera.

#### **Factores de los que dependen las propiedades físicas de la madera:**

Según: Echenique y Robles, (1993)

- 1- La cantidad de elementos básicos que conforman las paredes celulares de la madera.
- 2- La composición y orientación de los materiales que conforman la pared celular.
- 3- La composición química del elemento básico que explica muchas diferencias cuantitativas en el comportamiento de la madera.

#### **2.4.2.1 Densidad**

El peso específico de la madera ha sido la primera de sus propiedades físicas estudiadas, la aparente sencillez de su determinación y la opinión generalmente aceptada, desde Buffon y Duhamel du Monceau, de que era en el peso específico donde mejor se podría apreciar la calidad de la madera como material de construcción, iniciaron e impulsaron indudablemente las investigaciones sobre dicha propiedad. Por razones técnicas, debe utilizarse únicamente el peso específico aparente anhidro, por ser el único valor, ya que es seguro e invariable. (Kollman, 1959)

Esta característica física influye de forma muy directa en casi la totalidad de las características físico-mecánicas. La densidad, es importante en procesos como el secado, en el que a medida que la madera es más densa, más agua contiene y más energía. (Vignote y Jiménez, 1996)

Según Goche *et al.*, (2010) la densidad básica de la madera varía ampliamente dentro de un árbol, desde la médula hacia el exterior o desde la base del tronco hacia la copa. Para Goche *et al.*, (2000) la variación es inherente a la especie, que la hace diferente a otras. Aunque puede estar influenciada por la edad, la forma del árbol, las diferencias genéticas, la velocidad de crecimiento y la historia evolutiva. (Kort y Loeffen, 1991), (Zobel y Talbert, 1994), (Valencia, 1994) y (Pittermann *et al.*, 2006). También es el resultado de factores externos como: la luz, el suelo, la humedad y temperatura, así como de la competencia con otros organismos que forman parte del medio ambiente del árbol, todos ellos afectan su crecimiento y originan variaciones en la madera entre árboles o en piezas del mismo individuo. (Jane, 1970) y (Dalla *et al.*, 2009).

La densidad es una propiedad de gran trascendencia en los estudios relacionados con la Tecnología de la Madera, al guardar una relación muy directa (coeficientes de determinación superiores en muchos casos al 80 %) con muchas propiedades físicas y mecánicas de la madera. (Álvarez *et al.*, 2013)

La densidad normalmente utilizada para la comparación entre especies es la determinada con peso y volumen obtenidos al 12 % de humedad, llamada densidad normal; que es a la que generalmente se hace referencia cuando no se especifica el grado de humedad al que se ha efectuado la determinación. (Álvarez *et al.*, 2013)

### **Clasificación de la madera en dependencia de su densidad aparente.**

Según Álvarez *et al.*, (2013) de acuerdo con la Norma UNE-56540 se puede clasificar, desde muy ligera hasta muy pesada, la densidad aparente de la madera al 12 % (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de la madera en dependencia de su densidad aparente.

| <b>Coníferas</b> | <b>Latifolias</b> | <b>Clasificación</b> |
|------------------|-------------------|----------------------|
| < 0.40           | < 0.35            | Muy ligera           |
| 0.40 – 0.49      | 0.35 – 0.50       | Ligera               |
| 0.50 – 0.59      | 0.51 – 0.74       | Semipesada           |
| 0.60 – 0.70      | 0.75 – 0.95       | Pesada               |
| > 0.70           | > 0.95            | Muy pesada           |

#### **2.4.2.2 Contracción e Hinchazón**

La contracción e hinchazón de la madera, se ven afectadas por muchos factores, tal como la humedad, densidad, estructura anatómica, extractivos, composición química y esfuerzos mecánicos. Estos factores afectan de forma diferente entre las especies de maderas. La contracción es reducción y el hinchamiento es un incremento de las dimensiones de la madera debido al cambio en su contenido de humedad. Estos

cambios dimensionales ocurren cuando la humedad de la madera fluctúa por debajo del punto de saturación de la fibra; los cambios de humedad por encima de este punto, independientemente de su magnitud, no tendrán efecto en las dimensiones. La madera es anisotrópica con respecto a la contracción e hinchamiento (la reducción o incremento de las dimensiones, por el mismo cambio de contenido de humedad, es diferente en las direcciones del crecimiento del árbol). Específicamente, los cambios dimensionales son menos en el sentido longitudinal (a lo largo de la troza del árbol), más grande en el sentido radial (de la médula a la corteza), y todavía más grande en sentido tangencial por los anillos de crecimiento (Figura 3). La diferencia de la contracción e hinchazón en las diferentes direcciones de crecimiento se debe principalmente a la estructura de la pared celular. (Tsoumis, 1991)

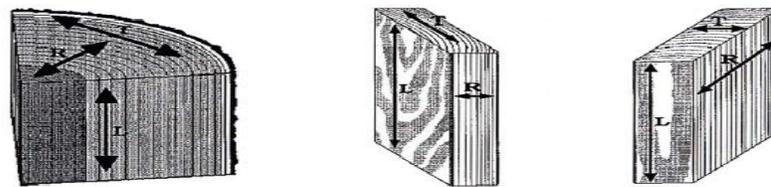


Figura 3: Direcciones: longitudinal (L), radial (R) y tangencial (T), en madera aserrada y rolliza.

Según Echenique y Robles, (1993) los fenómenos contracción y expansión se pueden definir como, la disminución y el incremento de dimensiones de la madera por unidad de longitud o de volumen que ocurren durante la desorción y absorción respectivamente.

La contracción de la madera tiene diferentes valores según la dirección que se considere. Así en dirección axial la contracción es prácticamente inapreciable, mientras que en dirección radial (r) y tangencial (t) es grande, siendo esta última de 1.5 a 2 veces más grande que la primera. Cuanto más grande sean ambas contracciones, menos tensiones se producen en la madera y más estabilidad tendrá. (Vignote y Jiménez, 1996)

Tabla 2. Clasificación de la madera según su contracción volumétrica

| Clase               | Contracción Volumétrica Total (%) |
|---------------------|-----------------------------------|
| Gran contracción    | 15 – 20                           |
| Contracción media   | 10 – 15                           |
| Contracción pequeña | 5 – 10                            |

Fuente: (Pérez, 1983).

### 2.4.3 Propiedades mecánicas de la madera

Según Sotomayor, (2002) las características mecánicas de la madera encuentran su aplicación en el diseño de estructuras. En la actualidad, el ingeniero y el arquitecto pueden considerar que la madera funciona mecánicamente como un sólido elástico y macroscópicamente homogéneo que obedece a las leyes de la resistencia de materiales y que, dentro de ciertos límites de calidad y variabilidad, puede ser un material confiable para su incorporación en el proceso constructivo.

Las propiedades mecánicas de la madera, son medidas por su resistencia a esfuerzos exteriores, las cuales tienden a deformar la masa. La resistencia de la madera a tales fuerzas depende de la magnitud y el modo de la carga (tensión, compresión, flexión, cortante etc.). En contraste con los metales y otros materiales de estructura homogénea, la madera muestra diferentes propiedades mecánicas en sus diferentes direcciones de crecimiento (axial, radial y tangencial) y, por lo tanto, esta es mecánicamente anisotrópica. Las propiedades de la madera son afectadas por varios factores principales, humedad, densidad, temperatura, duración de la carga y defectos de la madera. (Tsoumis, 1991)

#### 2.4.3.1 Resistencia a la compresión

La compresión se relaciona con la resistencia que opone un prisma de madera a una fuerza determinada  $F$  que tiende a aplastarla, acortando la longitud y aumentando la sección transversal de dicho prisma (Figura 4).

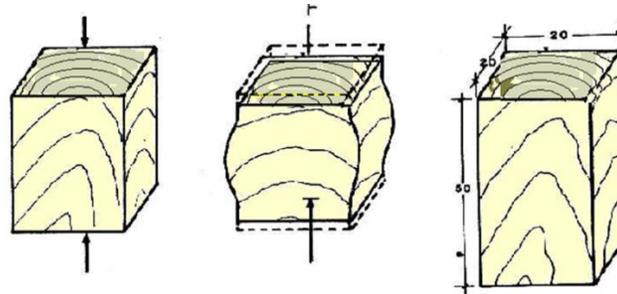


Figura 4: Probetas utilizadas en la determinación de la resistencia a la compresión.

Fuente: (Díaz *et al.*, 1986)

La madera en la dirección de las fibras, resiste menos a compresión que a tracción, siendo la relación del orden de 0.50, aunque variando de una especie a otra de 0,25 a 0.75. (Álvarez *et al.*, 2013)

Según Karsulovic, (1982) y Campos *et al.*, (1990), se distinguen dos tipos de fuerza de compresión según el sentido de aplicación de la fuerza; compresión paralela y compresión perpendicular a la fibra. La compresión paralela ocurre cuando una fuerza actúa de manera paralela a las fibras y corresponde a “la resistencia que opone una viga a una carga aplicada en el mismo sentido de la dirección de la fibra”. (Figura 5 A) La compresión perpendicular, ocurre cuando la fuerza solicitante actúa en dirección perpendicular a las fibras, y corresponde a “la resistencia que opone la madera a una carga aplicada en sentido perpendicular a la dirección de las fibras en una cara radial de la probeta (Figura 5 B).

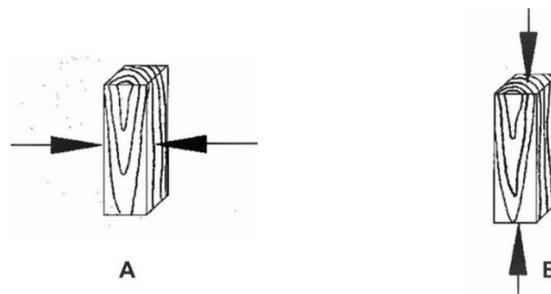


Figura 5. Fuerza aplicada para la determinación de la compresión de la fibra (A paralela, B perpendicular).

Además, según indica Gálvez, (2011) cuando se ensaya una madera a compresión su resistencia es máxima cuando se realiza en dirección paralela a la fibra siendo menor según nos alejamos de dicha dirección. Así, en dirección axial se obtienen los máximos valores a compresión, ya que los haces de fibras de la madera trabajan a modo de pequeñas columnas que se comprimen, siendo mucho mayor la resistencia frente a los valores que se obtienen en dirección perpendicular.

Winandy, (1994), indica que cuando una carga de compresión es aplicada perpendicular al grano, produce tensión que deforma las células de la madera perpendiculares a su longitud. Una vez las cavidades celulares sin sustancia colapsan, la madera es bastante fuerte porque ningún espacio nulo existe.

La resistencia a compresión perpendicular a las fibras está muy ligada a la dureza de la madera y a la resistencia al corte perpendicular a las fibras. Cuando se alcanza la resistencia máxima ocurre un aplastamiento de las células hasta desaparecer los huecos, lo que implica altas deformaciones. (Gálvez, 2011)

Rivero (2004), citado por Spavento *et al.*, (2008), propone la clasificación de la madera de acuerdo al esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra según los datos de la tabla 3

Tabla 3. Clasificación de la madera de acuerdo al esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra

| <b>Esfuerzo de compresión en kg/cm<sup>2</sup></b> | <b>Clasificación</b> |
|--|----------------------|
| < 25   | Muy bajo             |
| 26 - 50  | Bajo                 |
| 51 - 75  | Medio                |
| 76 - 100   | Alto                 |
| > 100  | Muy alto             |

De igual forma, Rivero, (2004) citado por Spavento *et al.*, (2008), propone la clasificación de la madera por el esfuerzo de compresión paralela a la fibra según la tabla 4.

Tabla 4. Clasificación de la madera de acuerdo al esfuerzo de compresión paralela a la fibra.

| <b>Esfuerzo de compresión en <math>\text{kgf} \cdot (\text{cm}^2)^{-1}</math></b> | <b>Clasificación</b> |
|---|----------------------|
| < 200   | Muy bajo             |
| 201 – 300   | Bajo                 |
| 301 – 400   | Medio                |
| 401 – 500   | Alto                 |
| > 500   | Muy Alto             |

#### 2.4.3.2 Flexión estática

La flexibilidad es la propiedad que tienen algunas maderas de poder ser dobladas o ser curvadas en su sentido longitudinal, sin romperse (Figura 6). Si son elásticas recuperan su forma primitiva cuando cesa la fuerza que las ha deformado. La madera presenta especial aptitud para sobrepasar su límite de elasticidad por flexión sin que se produzca rotura inmediata, siendo esta una propiedad que la hace útil para la curvatura. La madera verde, joven, húmeda o calentada, es más flexible que la seca o vieja y tiene mayor límite de deformación. Acuña y Casado, (2005)

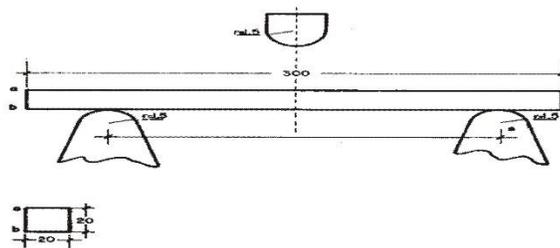


Figura 6: Representación gráfica del ensayo de flexión estática.

Acuña y Casado, (2005) indican que las Influencias que afectan la resistencia a la flexión son:

- Inclinación de la fibra.
- La disminución de resistencia a flexión y tracción se hace apreciable a partir de una inclinación de 1/25, mientras en compresión lo es a partir de 1/10, y en el corte apenas si tiene influencia.
- Peso específico, existe una relación lineal entre resistencia a la flexión y densidad. En los casos de no seguir esta relación se deben a maderas con contenido de resinas elevado.
- Contenido de humedad, la resistencia a la flexión tiene un máximo para un grado de humedad del 5 %, disminuyendo la resistencia desde dicha humedad hasta el punto de saturación de la fibra (PSF). La variación entre el 8 y el 15 % se puede considerar lineal.
- Temperatura, la resistencia a la flexión decrece al aumentar la temperatura; este crecimiento es mayor al aumentar la humedad.
- Nudos y fendas, la influencia de los nudos varía según su posición: es mayor cuanto mayor sea el momento flector; y tiene más influencia si está en la zona de tensión que en la de compresión.

Spavento *et al.*, (2008) propone una clasificación para la madera según el ensayo de flexión estática para los valores del Módulo de Ruptura. Esta clasificación es presentada en la tabla 5, sus valores son expresados en  $\text{kg} \cdot (\text{cm}^2)^{-1}$ .

Tabla 5 Clasificación de la madera según el módulo de ruptura (MOR) a partir del ensayo a flexión estática. Spavento *et al.*, (2008)

| MOR         | Clasificació |
|-------------|--------------|
| < 500       | Muy bajo     |
| 500 – 950   | Bajo         |
| 951 – 1220  | Medio        |
| 1221 – 1750 | Alto         |
| > 1750      | Muy alto     |

## 2.5 Comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de la madera del género *Pinus* en diferentes regiones:

Numerosos estudios se han realizado sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de especies forestales. El género *Pinus* ha sido de los más estudiados, se han analizado casi en su totalidad las propiedades de la madera de varias de las especies que conforman este género. Se encuentran estudios como el realizado a la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore de 12 años de edad (Paredes, 2017) donde según la densidad húmeda se clasifica en madera semipesada (0.600 a 0.649 g/cm<sup>3</sup>) y en densidad seca se clasifica como madera semiligera (0.500 a 0.599 g/cm<sup>3</sup>).

Ramírez *et al.*, (2006) en su estudio de las propiedades de la madera de *Pinus oocarpa* en Venezuela, detectaron que las propiedades físicas y mecánicas de esta especie según la clasificación de clases y categorías se ubican desde las clases (I hasta IV) y categorías (alta hasta muy baja), obteniendo valores promedio en sus propiedades de densidad seca al aire de 0,4518 g\*(cm<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> y peso específico básico de 0,3770g. Por otra parte, la estabilidad dimensional de esta especie en la relación T/R fue de baja a moderada. Además, sus propiedades mecánicas, arrojaron valores promedios, de resistencia a la flexión en módulo de ruptura de 1.172,3153 kgf\*(cm<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>, resistencia a la compresión paralela en el esfuerzo al límite proporcional de 172,4976 kgf\*(cm<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>, y resistencia a la compresión perpendicular en el esfuerzo al límite proporcional de 66,6957 kgf\*(cm<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>.

Ibrahim, (2007), en su estudio de las propiedades físico-mecánicas de la madera de cinco procedencias de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la región occidental de Cuba determinó que la densidad anhidra en esta especie varía desde 0,594040 hasta 0,626934  $\text{g} \cdot (\text{cm}^3)^{-1}$  para todas las procedencias estudiadas, sin presentar diferencias entre estas. La densidad básica de la madera estudiada, para las cinco procedencias, se encuentra en el rango de 0,52 – 0,55  $\text{g} \cdot (\text{cm}^3)^{-1}$  sin presentar diferencias significativas. Sin embargo, en este estudio, se aprecia que la procedencia influye grandemente sobre la densidad al 12% y la densidad verde de la madera pues se obtuvieron valores que varían desde 0,70 hasta 0,653775  $\text{g} \cdot (\text{cm}^3)^{-1}$  y de 0,925248 hasta 0,86020  $\text{g} \cdot (\text{cm}^3)^{-1}$  respectivamente. Por otra parte, el autor estudia además el comportamiento dimensional de esta madera obteniendo valores de contracción volumétrica total que varían desde 12,5035% a 14,0619%. El estudio arrojó además valores de compresión paralela a la fibra significativamente diferentes en cada procedencia con resultados que varían desde 52,22 a 32,40 MPa. Este autor además determinó la correlación existente entre las propiedades determinadas apreciando que el diámetro tiene correlación con la densidad normal a un 32,1 %, y con la contracción volumétrica total (CVT) a un 34,6 %. Por otro lado, pudo determinar que el diámetro de copa es la variable dasométrica que más se correlaciona con las propiedades físicas con una correlación de 35,2 % con la densidad normal y de 29,5 % con la contracción volumétrica total (CVT). Siendo inversamente proporcional a la Contracción Longitudinal (CL) y la correlación con la contracción tangencial es de 34 %.

# 1 MATERIALES Y MÉTODOS

## 3.1 Generalidades y ubicación del estudio

### 1.1.1 Ubicación del área de estudio

La investigación se desarrolló en dos fases: una de campo y otra de laboratorio. En la de campo se trabajó en áreas pertenecientes a la UEB Agroforestal de Trinidad, específicamente en el macizo montañoso Guamuhaya. Las actividades desarrolladas en esta fase consistieron en la toma de muestras para la evaluación de las diferentes propiedades físico-mecánicas y en las mediciones de las variables dasométricas de los árboles. Ambas actividades se realizaron a partir de individuos que se encontraban en el lote seis, rodal uno, ubicado en el área conocida como “Llano de las Ayúas” ( $21^{\circ}57'05''N$ ,  $80^{\circ}01'18''W$ ), por ser el área en que la UEB de Trinidad estaba realizando las cortas de aprovechamiento Figura 7. La fase de laboratorio se desarrolló en el laboratorio de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) en Sancti Spiritus.

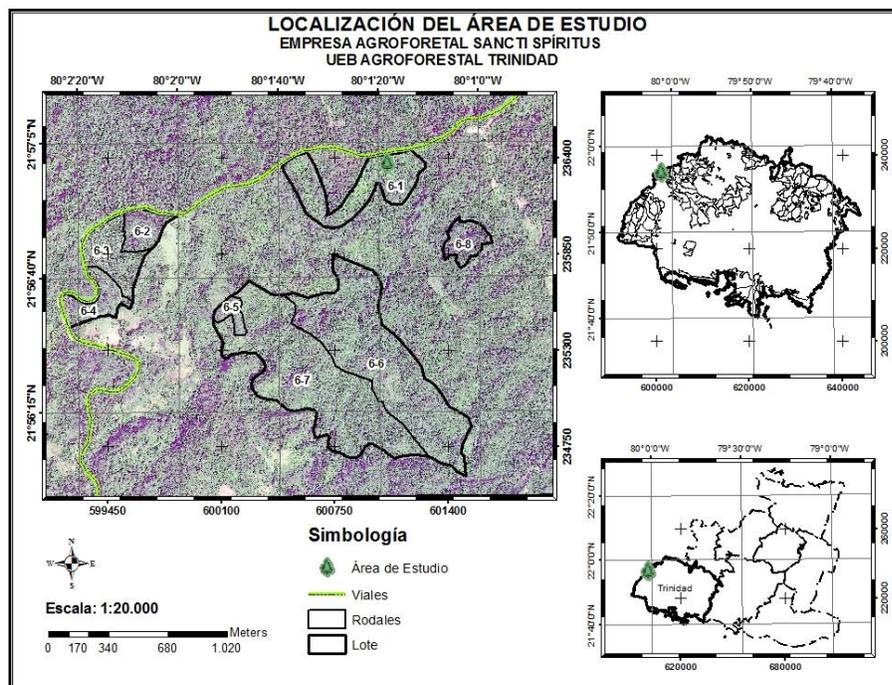


Figura: 7. Localización geográfica del área de estudio.

### 3.2 Toma de Muestras

Para la selección de árboles a muestrear, se realizaron de forma aleatoria un total de seis parcelas permanentes de 400m<sup>2</sup>, todas estas se ubicaron a una distancia superior a los 10m de los límites de la plantación con senderos trochas y caminos, evitando así el efecto borde. La medición de las variables dasométricas a cada uno de los árboles que estas contenían (diámetro, altura, altura a la primera rama, altura de copa, radio de copa), sirvió para seleccionar el árbol más representativo en cada una de estas. La utilización de las cintas métrica, diamétrica y el hipsómetro BLUME\_LEISS garantizaron la precisión de cada una de estas mediciones (Figura 8).



Cinta Métrica

Cinta diamétrica

Hipsómetro  
BLUME\_LEISS

Figura 8: Instrumentos utilizados en las mediciones de los árboles muestreados.

Se derribaron un total de seis árboles todos con 40 años de edad, a estos se les extrajo una troza de 100cm de longitud partiendo de 130cm con respecto a la base del árbol. Para realizar las operaciones de derribo y troceado de los árboles se utilizó una motosierra marca STIHL. (Figura 9).



Figura 9: Motosierra STIHL utilizada en las operaciones de derribe y troceado de los árboles.

### 3.3 Preparación de las muestras

Las muestras se tomaron conforme a las Normas Europeas UNE-56528-78 que exigen probetas de pequeñas dimensiones y libres de defectos. Para ello se le extrajo a cada troza una pieza central de 10 cm de grosor, longitud 100cm y ancho de la troza.

De cada pieza se extrajeron probetas de 5x5x100cm en sentido radial. La primera probeta contiene la médula. Estas fueron también enumeradas por un número latín indicando la posición respecto a la médula, un número romano indicando el del árbol en la parcela. Con cada una de estas probetas se confeccionaron a su vez ocho probetas de 2x2x34cm las cuales fueron marcadas según el árbol del cual se extrajeron y además se utilizó una letra latina (A o B) indicando la posición de la probeta en la troza B para las muestras ubicadas en la sección inferior y A para las de la sección superior. Luego de confeccionadas estas, se seleccionaron cuatro probetas de 2x2x34cm, dos de la sección inferior y dos de la superior utilizándolas en los ensayos de flexión estática. Las cuatro probetas restantes se les extrajeron probetas de 2x2x6cm que se utilizaron para los ensayos de compresión paralela y perpendicular a la fibra. Las muestras utilizadas en los ensayos de densidad y contracción se confeccionaron con dimensiones de 2x2x3cm, extraídas de los extremos de las probetas utilizadas en la flexión estática. Figura 10.

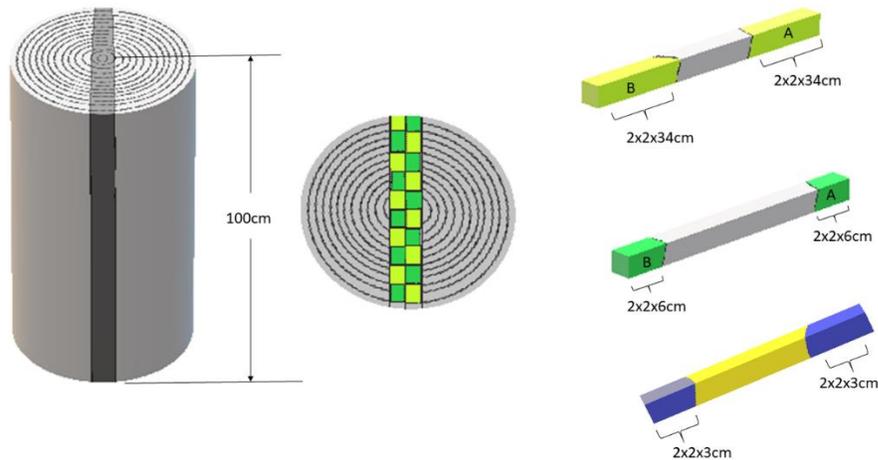


Figura 10: Esquema de preparación de las muestras.

### 3.4 Realización de ensayos

Las probetas se trasladaron hacia el laboratorio de materiales de la construcción perteneciente a la empresa nacional de investigaciones aplicadas (ENIA) en la Ciudad de Sancti Spíritus donde se guardaron en condiciones ambientales de humedad.

#### 3.4.1 Humedad de la madera

Según Spavento *et al.*, (2008) la determinación del contenido de humedad en la madera se hace solo considerando los valores de agua libre y de saturación o higroscópica. Es decir, en la práctica, la madera se considera totalmente seca cuando ha alcanzado su peso constante. Por lo que la humedad de la madera se determinó mediante el método de secado en la estufa. El peso húmedo de cada una de las probetas se determinó mediante la utilización de una balanza analítica digital de alta estabilidad, marca Ohaus EX6201/E, luego estas fueron colocadas en la estufa durante cuatro horas a una temperatura de  $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$  (Figura 11), se repitió el procedimiento de pesaje y el de secado hasta que se logró un valor constante en todas las muestras.



Balanza Analítica



Estufa

Figura 11: Balanza analítica digital de alta estabilidad, marca Ohaus EX6201/E y estufa utilizada en el pesaje y secado de las probetas.

El porcentaje de humedad de la madera se determinó con los datos arrojados de su peso húmedo y seco. Este se determinó a cada una de las probetas a través de la expresión matemática 1:

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} * 100 \quad (1)$$

### 3.4.2 Ensayos de densidad

Se elaboraron probetas de 2 x2 x 3 cm. de acuerdo con la norma UNE-56529-77. Cada una fue identificada y pesada con una balanza analítica digital de alta estabilidad, marca Ohaus EX6201/E. Luego se tomaron las dimensiones con un Pie de rey marca Stainless Hardened de 0.01 mm de precisión (Figura 12).



Figura 12: Pie de rey marca Stainless Hardened de 0.01 mm de precisión.

### 3.4.2.1 Densidad Aparente

Las probetas se sumergieron en agua durante diez días asegurando así que estas alcanzaran su punto de saturación de la fibra. Se pesaron y midieron las dimensiones de cada probeta (Ibrahim, 2007). Luego se aplicó la expresión matemática 2 planteada por Álvarez *et al.*, (2013) la cual permitió calcular la densidad aparente:

$$D_o = \frac{M_o}{V_o}; \frac{M_{sa}}{V_{sa}}; \frac{M_v}{V_v} \quad (2)$$

Donde:

$D_o$  – Densidad aparente a 0%, seca al aire (sa) y verde o saturada.

$M$  – Masa del cuerpo de prueba a 0%, seca al aire (sa) y verde o saturada.

$V$  – Volumen del cuerpo de prueba a 0%, seca al aire (sa) y verde o saturada.

### 3.4.2.2 Densidad verde o saturada

Los valores fueron determinados a partir de las mediciones realizadas a probetas, que se sumergieron en agua durante un período de tiempo de diez días. Esto garantizó la saturación completa de las fibras de estas.

### 3.4.2.3 Densidad seca al aire

Las probetas después de saturada totalmente de agua se colocaron a secar al aire hasta lograr una humedad aproximada del 12%. La expresión 2 permitió el cálculo de esta.

### 3.4.2.4 Densidad Anhidra

Las probetas se secaron en la estufa a  $103 \pm 2$  grados hasta alcanzar un peso constante. Se midieron las dimensiones y el peso de cada probeta. La densidad fue determinada a través la expresión (2).

### 3.4.2.5 Densidad Básica

Según Álvarez *et al.*, (2013), la densidad básica se determina a partir de un valor especial de masa obtenido a 0% de humedad y el volumen verde o saturado. Esta se obtuvo a partir de la siguiente expresión matemática:

$$D_B = \frac{M_o}{V_v} \quad (3)$$

Donde:

$D_B$  – Densidad Básica

$M_o$  – Masa del cuerpo de prueba a 0% de humedad.

$V_v$  – Volumen del cuerpo de prueba verde o saturado.

### 3.4.3 Ensayos de Contracción

Las probetas se elaboraron según las normas UNE-56528-78 que exige dimensiones de 2x2x5cm para este tipo de ensayo. Estas fueron sumergidas en agua durante diez días para garantizar la saturación de la fibra (Ibrahim, 2007). Las dimensiones de las probetas fueron medidas con el pie de rey marca Stainless Hardened de 0.01 mm de precisión. Fue determinada la contracción volumétrica total, radial tangencial y longitudinal, se determinó además el coeficiente de anisotropía.

La contracción radial según Álvarez *et al.*, (2013), depende de la variación dimensional de la madera en sentido radial y se determina conforme a la expresión 4.

$$\beta_r = \frac{\beta_{rv} - \beta_{ro}}{\beta_{rv}} * 100 \quad (4)$$

Donde:

$\beta_r$  = contracción radial.

$\beta_{rv}$  = longitud de la sección radial en estado verde.

$\beta_{ro}$  = longitud de la sección radial en estado anhidro

Álvarez *et al.*, (2013), propone la expresión matemática 5 para la determinación de contracción tangencial de la madera.

$$\beta_t = \frac{\beta_{tv} - \beta_{to}}{\beta_{tv}} * 100 \quad (5)$$

Donde:

$\beta_t$  = contracción tangencial.

$\beta_{tv}$  = longitud de la sección tangencial en estado verde.

$B_{to}$  = longitud de la sección tangencial en estado anhidro.

La contracción longitudinal es determinada a partir de la relación de las longitudes verde y anhidra de la sección longitudinal de la madera. Esta se determina según la siguiente expresión, así lo plantea: Álvarez *et al.*, 2013)

$$\beta_l = \frac{\beta_{lv} - \beta_{lo}}{\beta_{lv}} * 100 \quad (6)$$

Donde:

$\beta_l$  = contracción longitudinal.

$\beta_{lv}$  = longitud de la sección longitudinal en estado verde.

$B_{lo}$  = longitud de la sección longitudinal en estado anhidro.

La contracción volumétrica máxima, depende de las variaciones de los volúmenes, anhidro y verde, de los cuerpos de prueba. Esta se determina, según Álvarez *et al.*, (2013), empleando la siguiente expresión:

$$\beta_{vm\acute{a}x} = \frac{V_v - V_o}{V_v} * 100 \quad (7)$$

Donde:

$\beta_{vm\acute{a}x}$  = contracción volumétrica máxima.

$V_v$  = volumen verde.

$V_o$  = volumen anhidro.

Otra expresión planteada por Álvarez *et al.*, (2013) para el cálculo de la contracción volumétrica total es:

$$\beta_{vm\acute{a}x} = \beta_{rm\acute{a}x} + \beta_{tm\acute{a}x} + \beta_{lm\acute{a}x} \quad (8)$$

Donde:

$\beta_{vm\acute{a}x}$  = Contracción volumétrica máxima.

$\beta_{tm\acute{a}x}$  = Contracción tangencial máxima.

$\beta_{r\text{máx}}$  = Contracción radial máxima.

$\beta_{l\text{máx}}$  = Contracción longitudinal máxima.

### 3.4.3.1 Anisotropía de contracción

La anisotropía de contracción se determinó a partir de los valores obtenidos de las ecuaciones cinco y cuatro. Para ello se empleó la siguiente expresión planteada por Álvarez *et al.*, (2013):

$$\Delta C = \frac{\beta_t}{\beta_r} \quad (9)$$

Donde:

$\Delta C$  = Anisotropía de contracción.

$\beta_{t\text{máx}}$  = Contracción tangencial máxima.

$\beta_{r\text{máx}}$  = Contracción radial máxima.

### 3.4.4 Ensayos de Compresión

Se determinó tanto la compresión paralela o axial como la compresión perpendicular a la fibra. Las normas UNE-56528-78, para este tipo de ensayo, plantean que las dimensiones adecuadas son de 2x2x6cm. Las probetas fueron secadas hasta lograr peso constante para eliminar toda la humedad y luego fueron sometidas a una carga con velocidad constante de 5 mm/min hasta la rotura. Para realizar este ensayo se utilizó una prensa rusa marca 3NM con capacidad máxima de 10 mil kgf. (Figura 13). La ecuación 10 permitió el cálculo de la resistencia máxima de compresión axial y la compresión perpendicular (Álvarez *et al.*, (2013).

$$f_{ca}; f_{cp} = \frac{P_{max}}{A} \quad (10)$$

Donde:

$f_{ca}$  = resistencia máxima de compresión axial o paralela.

$f_{cp}$  = resistencia máxima de compresión perpendicular.

$P_{max}$  = carga máxima aplicada al cuerpo de prueba.

A = área sujeta al esfuerzo.



Figura 13: Prensa rusa marca 3NM utilizada en los ensayos de compresión.

### 3.4.5 Ensayo de Flexión estática

La resistencia a la flexión estática de las probetas libres de defectos se determina de acuerdo a la metodología establecida en la norma UNE-56537-79.

El ensayo de las probetas libres de defectos se realizó con la máquina universal de ensayos (prensa rusa marca 3NM con capacidad máxima de 10 mil kg), colocando para ello la probeta sobre dos apoyos de ejes paralelos con un diámetro de 3cm, separados 25cm (luz entre soportes) (Figura 14). La carga se aplica centrada entre los apoyos, mediante otro cilindro de 3cm de diámetro. Una vez colocada la probeta con su cara radial hacia arriba, se inicia el ensayo a flexión, sometiendo a la probeta a una carga con velocidad constante de 5 mm/min hasta la rotura.

La resistencia máxima a la flexión estática se determinó por la expresión 11 planteada por Álvarez *et al.*, (2013).

$$f_m = \frac{3 \cdot P_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (11)$$

Donde:

$f_m$  = resistencia máxima a la flexión estática.

$P_{max}$  = Carga aplicada en el momento de ruptura.

b, h = base y altura del cuerpo de prueba.

L = distancia entre puntos de apoyo (luz entre soportes).



Figura 14: Prensa universal rusa marca 3NM utilizada en los ensayos de flexión estática.

### 3.4.6 Influencia de las variables dasométricas en las propiedades físico-mecánicas de la madera de *P. caribaea var caribaea*.

Se determinó la correspondencia entre los parámetros dasométricos (diámetro a 1.30m (d1.30), altura total (ht), altura hasta la primera rama viva o altura comercial del fuste (hf), altura de copa (hc), diámetro de copa (dc) y distancia desde la médula hasta la corteza (dmc)) y las propiedades físico-mecánicas determinadas. Mediante análisis de correlación cuyos detalles se describen en el siguiente epígrafe.

### 3.5 Análisis estadístico

Se llevó a cabo un minucioso análisis mediante la utilización del software IBM SPSS Statistics versión 22.0.0.0 para Windows. Donde se aplicaron análisis de normalidad. Se realizaron comparaciones entre las diferentes posiciones de las que se extrajo madera, según la distribución que siguieron los datos se utilizaron pruebas paramétricas (Análisis de varianza) y pruebas no paramétricas (Kruskal Wallis para K muestras independientes), para determinar la existencia de diferencias significativas. Se realizó además un análisis de correlación de Pearson con el que se determinó la relación que existe entre las variables dasométricas y las propiedades físico-mecánicas de la madera de la especie estudiada. La probabilidad de confianza fue fijada al 95%.

## **4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 Comportamiento de las propiedades físicas de la madera de *P. caribaea* var *caribaea* en relación a su ubicación respecto al radio del fuste.**

El análisis y determinación de las propiedades físicas de la madera de esta especie, permitió que se pudiese realizar a profundidad, el estudio del comportamiento de estas, en los ejemplares seleccionados. Los ensayos realizados facilitaron la evaluación del comportamiento de las propiedades estudiadas.

#### **4.1.1 Resultados de los ensayos de densidad de la madera.**

Se debe recordar que la densidad constituye una variable fundamental del comportamiento de la madera, partiendo del criterio generalizado de que existe una relación lineal entre densidad y propiedades de la madera. (Ibrahim, (2007).

Los estudios realizados a la madera permitieron analizar el comportamiento de la densidad según la posición radial de las probetas (en la dirección desde la médula hasta la corteza). Mediante el análisis estadístico se pudo evaluar las variaciones en la densidad de la madera de *P. caribaea* var *caribaea* en la población objeto de estudio.

##### **4.1.1.1 Comparación de los valores de densidad de la madera de *P. caribaea* var *caribaea* en las diferentes posiciones respecto al radio del fuste.**

Analizando el supuesto teórico de normalidad, se observa, mediante el test de Shapiro-Wilk que solo siguen una distribución normal las muestras de densidad aparente de la madera saturada de la posición uno y cuatro, con valores de significación de 0.58 y 0.628 respectivamente. Los datos de la densidad aparente de la madera seca al aire solo se distribuyen normalmente en la posición cuatro. Con respecto a la densidad aparente anhidra no se cumple el supuesto de normalidad para ninguna de las cuatro posiciones estudiadas. En cuanto a la densidad básica solo las posiciones uno y dos cumplen el supuesto de normalidad (Anexo 1).

Se realizaron pruebas no paramétricas a los datos con la finalidad de comparar los valores de la densidad de la madera en sus diferentes posiciones. Este análisis estadístico se realizó mediante la prueba de Kruskal Wallis. El cual permitió identificar si existen diferencias estadísticas entre las posiciones y para cada una de las densidades determinadas. Los resultados arrojaron que existen diferencias significativas entre las posiciones, para una probabilidad de confianza del 95%. En la tabla 6 se evidencia lo antes planteado pues los valores de significación son menores que 0.05 para cada ensayo de densidad realizado.

Tabla 6. Prueba de Kruskal Wallis para K muestras independientes.

|                 | Densidad Aparente saturada | Densidad Aparente seca al aire | Densidad Aparente anhidra | Densidad básica |
|-----------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------|
| Chi-cuadrado    | 29,244                     | 23,398                         | 26,039                    | 24,339          |
| gl              | 3                          | 3                              | 3                         | 3               |
| Sig. asintótica | ,000                       | ,000                           | ,000                      | ,000            |

a. Prueba de Kruskal Wallis.

b. Variable de agrupación: Posición en la dirección respecto al radio del fuste.

Los análisis realizados mostraron, en el caso de la densidad aparente con las fibras de la madera saturadas, una tendencia a aumentar a medida que esta se separa de la médula. Siendo mayor en la madera más próxima a la corteza (posición 4) con  $1.057\text{g}*(\text{cm}^3)^{-1}$  que en la ubicada en posiciones más cercanas a la médula en las cuales se obtienen valores medios de:  $0.949\text{g}*(\text{cm}^3)^{-1}$  para la posición uno,  $0.974\text{g}*(\text{cm}^3)^{-1}$  para la dos y  $1.007\text{g}*(\text{cm}^3)^{-1}$  para la posición 3 (Figura 15). Estos resultados implican el hecho de que la madera juvenil es menos densa que la adulta, lo que sin duda alguna está dado por los tamaños de las células, espacios intercelulares y sustancias que conforman la madera en los diferentes estados de maduración de la misma.

Estos valores de densidad de la madera con las fibras saturadas son semejantes a los encontrados por Ibrahim, (2007), quien, en su estudio sobre las propiedades físico-mecánicas de *Pinus tropicalis* para cinco procedencias en la provincia de Pinar del Río, determinó que la densidad de la madera saturada o verde de esta especie en esa región se encuentra entre los valores de  $0,925248 \text{ g} \cdot (\text{cm}^3)^{-1}$  y  $0,86020 \text{ g} \cdot (\text{cm}^3)^{-1}$ . Se asemejan además en cuanto a su comportamiento, pues la densidad verde de la madera estudiada por este autor, aumenta a medida que se aleja de la médula. Otro estudio como el realizado por Campos, (2015) a las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus maximinoi*, obtienen comportamientos similares de los valores medios de la densidad de la madera de esta especie, pues este experimenta un aumento a medida que se aleja de la sección medular del árbol. Coincidiendo este comportamiento con el obtenido en este trabajo.

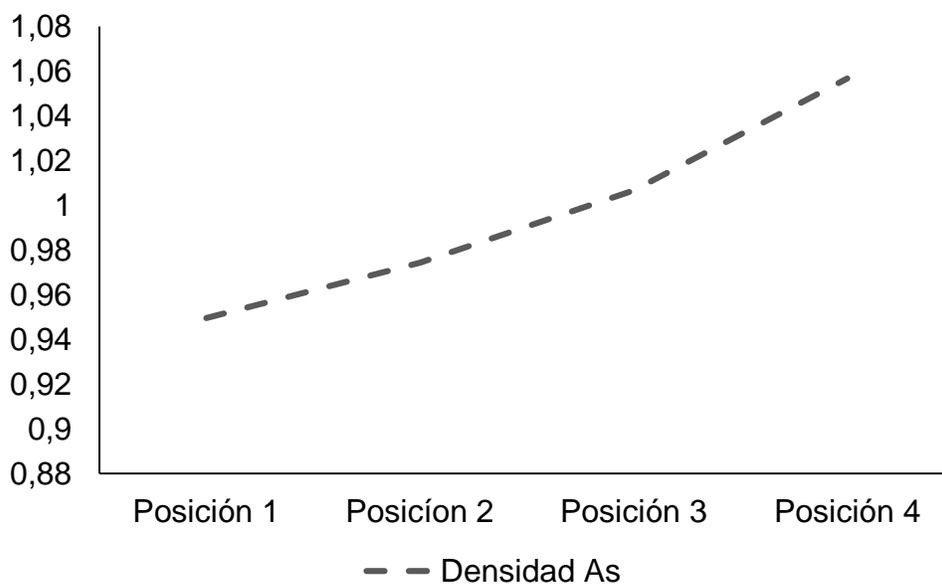


Figura 15. Comportamiento de la densidad aparente (fibra saturada) de la madera de *P. caribaea var caribaea*, con respecto a la posición que ocupa la madera en la sección radial del fuste.

Por otra parte, en el caso de la densidad aparente de la madera seca al aire, anhidra y la densidad básica específica, el comportamiento de los valores medios de estas no coinciden con los valores antes explicados. En este caso, la densidad de la madera

disminuye a medida que se aleja de la sección medular del árbol y aumenta en las zonas cercanas a la corteza.

En las posiciones desde la uno hasta la tres con valores de densidad aparente de la madera seca al aire de  $0.681 \text{ g}^*(\text{cm}^3)^{-1}$ ;  $0.623 \text{ g}^*(\text{cm}^3)^{-1}$  , $0.596 \text{ g}^*(\text{cm}^3)^{-1}$  respectivamente. La densidad anhidra mostró valores medios los cuales se comportaron de manera similar, disminuyendo desde las posiciones uno hasta la tres con  $0.671 \text{ g}^*(\text{cm}^3)^{-1}$  para la posición uno,  $0.614 \text{ g}^*(\text{cm}^3)^{-1}$  para la dos y  $0.584 \text{ g}^*(\text{cm}^3)^{-1}$  para la tres. La densidad básica específica sigue este mismo patrón pues sus valores disminuyen en sentido médula corteza, desde la posición uno hasta la tres con  $0.606 \text{ g}^*(\text{cm}^3)^{-1}$ ;  $0.547 \text{ g}^*(\text{cm}^3)^{-1}$ ;  $0.500 \text{ g}^*(\text{cm}^3)^{-1}$  respectivamente.

En el caso de la posición cuatro, los valores medios de estas densidades aumentan considerablemente, para las densidades aparente con la madera seca al aire, anhidra y básica, los valores medios alcanzados fueron de  $0.680 \text{ g}^*(\text{cm}^3)^{-1}$ ,  $0.679 \text{ g}^*(\text{cm}^3)^{-1}$  y  $0.571 \text{ g}^*(\text{cm}^3)^{-1}$  respectivamente (Figura 16).

Un comportamiento similar encuentra Ibrahim, (2007) pues la densidad de la madera de *Pinus tropicales* en las cinco procedencias estudiadas por el autor para la región de Pinar del Río siguen el mismo comportamiento que el obtenido en este estudio.

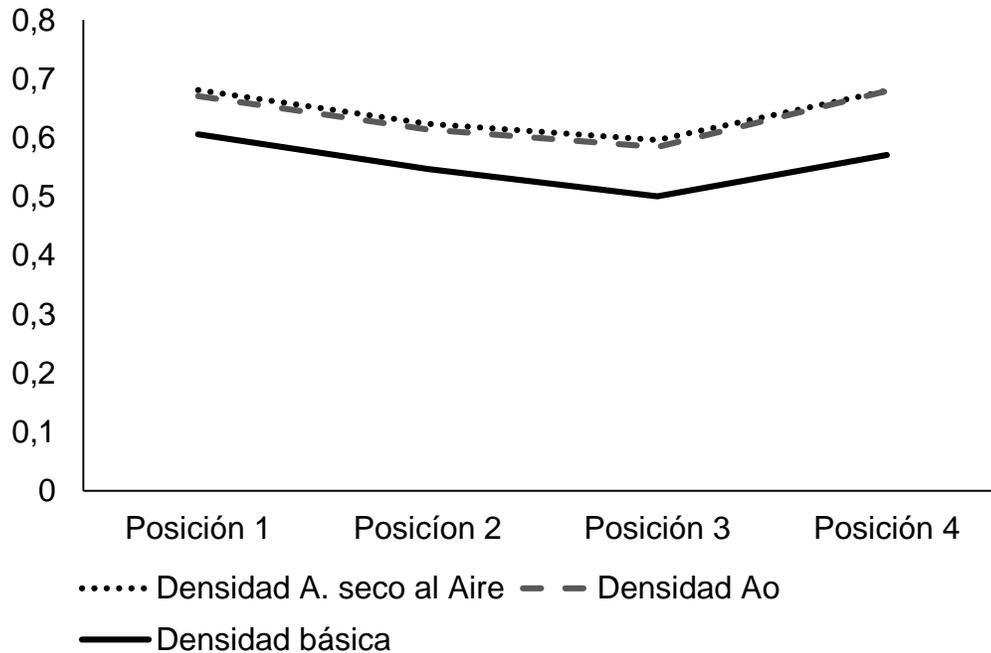


Figura 16. Comportamiento de la densidad aparente de la madera seca al aire, anhidra y la densidad básica de la madera de *P. caribaea var caribaea*, con respecto a la posición que ocupa la madera en la sección radial del fuste.

El aumento de la densidad de la madera más próxima a la médula es justificable, ya que al ser secada se liberó toda el agua que estas contenían, pero no la resina, y esto justifica la disminución de la densidad desde la posición uno hasta la tres. En el caso de la posición cuatro, el aumento experimentado en la densidad de la madera de esta sección está dado por la estrecha relación que existe entre el ancho de los anillos de crecimiento y esta. Además, esta es una sección del fuste en la que se encuentra la madera adulta, la cual ha pasado por un proceso de maduración que permite que en esta área se presenten menos espacios intercelulares por lo que esta madera es más compacta.

Davel y Mohr, (2005) en su estudio de la densidad básica de Pino oregón, plantean que el ancho de los anillos de crecimiento posee una relación lineal inversa con la densidad básica, es decir, que a medida que aumente el ancho de los anillos de crecimiento menor será la densidad básica y viceversa. En el caso de *P. caribaea var caribaea* la densidad aparente de la madera seca al aire, anhidra y por supuesto, al ser la densidad

básica una relación entre la anterior y el volumen verde. Los resultados obtenidos coinciden con lo antes expuesto, pues los valores medios más altos de densidad se obtuvieron en la posición uno y cuatro, la primera por ser la sección medular en la que se encuentran grandes contenidos de resina que no se elimina cuando la madera es secada y la última por ser la sección en que el ancho de los anillos de crecimiento era menor (Figura 17).

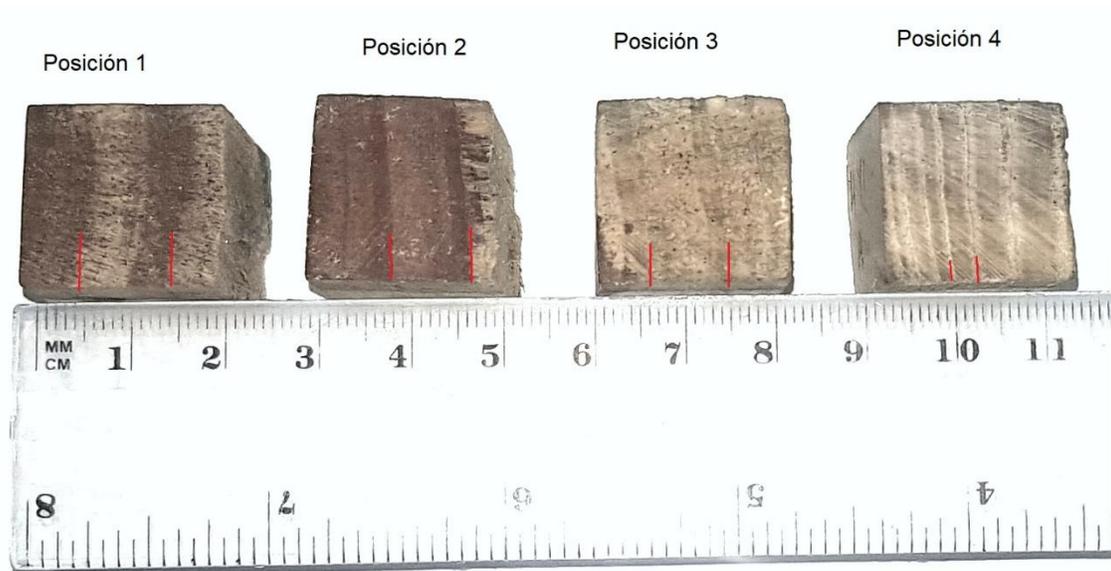


Figura 17. Variación desde la médula hasta la corteza, del ancho de los anillos de crecimiento de la madera de *Pinus caribaea*.

#### 4.1.1.2 Clasificación de la madera *P. caribaea* var *caribaea* según su densidad

Los ensayos realizados para determinar la densidad de la madera de *P. caribaea* var *caribaea* arrojaron valores que varían, desde  $0.924\text{g}*(\text{cm}^3)^{-1}$  hasta  $1.138\text{g}*(\text{cm}^3)^{-1}$ , para los datos de la densidad aparente seca al aire. Los resultados obtenidos posibilitan que la clasificación de la madera de esta especie sea desde pesada hasta muy pesada según la clasificación de las normas UNE-56531-77 (Tabla 7). Ibrahim, (2007) obtiene valores similares de densidad aparente de la madera de esta especie, clasificándola desde pesada hasta muy pesada. Ibañes *et al.*, (2002) obtienen, en un estudio de las propiedades de la madera de *Pinus tropicalis* densidades muy similares. Los valores de

densidad aparente obtenidos por estos autores, permitieron clasificar la madera como pesada y muy pesada en ambos casos, similarmente a este trabajo.

Tabla 7 Clasificación de la madera de *P. caribaea* var *caribaea* según su densidad.

| PMC      | Densidad<br>As | Densidad A<br>seca al aire | Clasificación<br>Densidad A | Densidad<br>Ao. | Densidad<br>básica. |
|----------|----------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|
| 1        | 0.949          | 0.924                      | Pesada                      | 0.671           | 0.606               |
| 2        | 0.974          | 0.967                      | Muy Pesada                  | 0.614           | 0.547               |
| <b>3</b> | 1.007          | <b>1.009</b>               | <b>Muy Pesada</b>           | 0.584           | 0.500               |
| 4        | 1.057          | 1.138                      | Muy Pesada                  | 0.679           | 0.571               |

#### 4.1.2 Comportamiento dimensional de la madera de *P. caribaea* var *caribaea*.

Según lo planteado por Días *et al.*, (1986), las contracciones volumétrica, tangencial, radial y longitudinal son los principales parámetros de deformación de la madera, por lo cual es de suma importancia el análisis del comportamiento de la madera atendiendo a las variaciones en sus dimensiones.

##### 4.1.2.1 Comparación de la contracción radial, tangencial, longitudinal y Anisotropía de la madera de *P. caribaea* var *caribaea* de acuerdo con las diferentes posiciones respecto al radio del fuste.

Según el análisis estadístico realizado de las muestras se pudo determinar, mediante el test de Shapiro-Wilk, que solo siguen una distribución normal, para un 95% de probabilidad de confianza, los valores de contracción volumétrica y tangencial. Esto no se cumple en el caso de las contracciones radial y longitudinal, ni en el coeficiente de anisotropía. En este caso se determinó que de las cuatro posiciones al menos una no sigue distribución normal. Con respecto a la contracción radial solo se distribuyeron normalmente las muestras de las posiciones uno y tres. Solo la muestra cuatro alcanzó una distribución normal cuando se analizó su contracción longitudinal. En coeficiente de

anisotropía no se cumple el supuesto teórico analizado, en ninguna de las posiciones de la madera, respecto a la médula (Anexo 2).

Del estudio de normalidad realizado a las muestras utilizadas para determinar el comportamiento dimensional de la madera, se derivan pruebas no paramétricas y paramétricas en dependencia de cómo se distribuyeron las muestras. En el caso de la contracción radial el análisis del comportamiento de este respecto al radio del fuste se realizó mediante la aplicación de la prueba estadística de Kruskal Wallis, esta permite el análisis de varias muestras independientes que no siguen una distribución normal. De acuerdo con los resultados arrojados existen diferencias significativas entre los grupos de las diferentes posiciones en las que se realizaron las pruebas de contracción radial. Los valores de significación en el caso de contracción longitudinal y la Anisotropía dimensional indican que no existen diferencias entre los grupos que conforman cada una de estas pruebas (Tabla 9).

Tabla 9. Prueba de Kruskal Wallis para K muestras independientes.

|                 | Estadístico de prueba <sup>a,b</sup> |                          |                         |
|-----------------|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------|
|                 | Contracción Radial                   | Contracción Longitudinal | Anisotropía dimensional |
| Chi-cuadrado    | 12,333                               | 4,572                    | 5,835                   |
| gl              | 3                                    | 3                        | 3                       |
| Sig. asintótica | ,006                                 | ,206                     | ,120                    |

a. Prueba de Kruskal Wallis

b. Variable de agrupación: Posición en la dirección respecto al radio del fuste.

Los valores de contracción tangencial y volumétrica de la madera de *P. caribaea* var *caribaea* estudiada, siguieron una distribución normal para un 95% de probabilidad de confianza, de acuerdo con lo analizado en el supuesto teórico de Shapiro-Wilk. El análisis de varianza (ANOVA) de las muestras que permitió identificar que no existen

diferencias estadísticamente significativas entre las muestras de cada una de las posiciones en el caso de la contracción tangencial (Tabla 10).

Tabla 10. Análisis de varianza la Contracción tangencial de la madera de *P. caribaea var caribaea*. Prueba de HSD Tukey.

| HSD Tukey <sup>a</sup>                               | Contracción Tangencial |                              |
|--|------------------------|------------------------------|
| Posición en la dirección respecto al radio del fuste | N                      | Subconjunto para alfa = 0.05 |
|  |                        | 1                            |
| 1  | 48                     | 5,340                        |
| 3  | 48                     | 5,907                        |
| 2  | 48                     | 5,968                        |
| 4  | 48                     | 6,499                        |
| Sig.   |                        | ,140                         |

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 48,000.

En el caso de la contracción volumétrica total se encontraron diferencias entre los grupos analizados. El ANOVA de un factor, mediante la aplicación de las comparaciones múltiples, facilitó la identificación de dos grupos dentro de las muestras de Cv. El primer grupo se encuentra formado por las muestras de las posiciones uno hasta la tres, los valores medios de este grupo se encuentran desde 11.115 hasta 12.502% de contracción. Los valores del segundo grupo formado se encuentran entre 12.502 y 13.881%. Mediante este análisis se determinó que existen diferencias ente las medias de las posiciones uno y dos con respecto a la media de la posición cuatro, además se identificó que no existen diferencias entre la posición tres y el resto. Tabla 11.

Tabla 11. Análisis de varianza para la Contracción volumétrica de la madera de *Pinus caribaea*. Prueba de HSD Tukey a.

| HSD Tukey <sup>a</sup> | Contracción Volumétrica                              |        |                              |        |
|------------------------|--|--------|------------------------------|--------|
|                        | Posición en la dirección respecto al radio del fuste | N      | Subconjunto para alfa = 0.05 |        |
|                        |  |        | 1                            | 2      |
| 1                      | 48   | 11,115 |                              |        |
| 2                      | 48   | 11,672 |                              |        |
| 3                      | 48   | 12,502 |                              | 12,502 |
| 4                      | 48   |        |                              | 13,881 |
| Sig.                   |  |        | ,210                         | ,214   |

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 48,000.

La madera *Pinus caribaea var caribaea* posee un aumento en la variación de sus dimensiones a medida que nos alejamos de la médula del fuste. Se pudo identificar que la madera de la médula sufre varios cambios dimensionales que la más próxima a la corteza, donde ocurren los mayores cambios.

Los valores medios determinados de contracción longitudinal separa las posiciones desde la uno hasta la cuatro fueron de 2.034%, 1.876%, 1.980% y 2.415%. en este caso la madera experimentó la mayor variación en las posiciones uno y cuatro. Los valores medios de contracción radial determinados fueron de 4.164% 4.275% 5.110% y 5.621% para las posiciones uno, dos, tres, y cuatro respectivamente. En el caso de la contracción tangencial los valores medios determinados fueron de 5.340% para la posición uno, 5.968% para la posición dos 6.002% para la posición tres y 6.499% para la posición cuatro. Es de gran importancia mencionar de las secciones de la madera

estudiadas las más que experimentaron variación en cuanto a sus dimensiones fueron la radial y la tangencial. En el caso de la longitudinal los valores bastante inferiores.

Figura 18

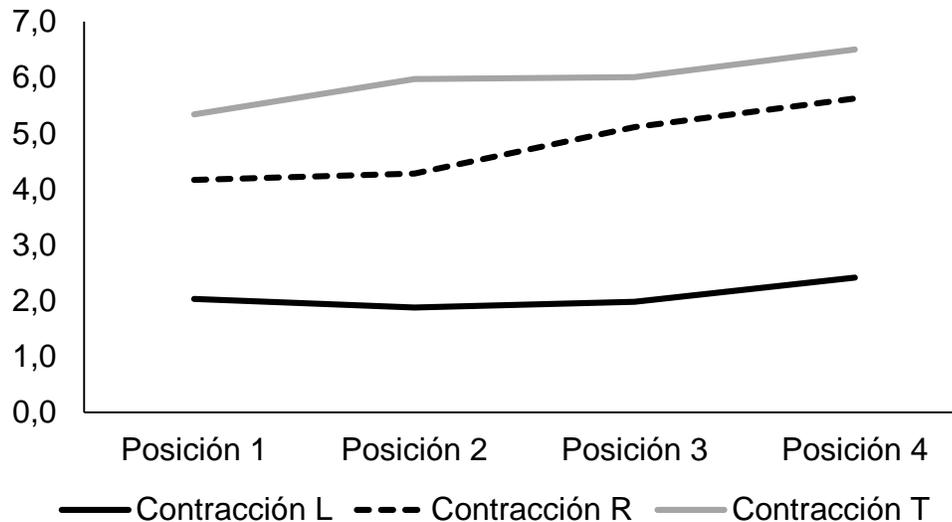


Figura 18. Comportamiento de las contracciones longitudinal radial y tangencial de la madera de *Pinus caribaea var caribaea*, con respecto a la posición que ocupa la madera en la sección radial del fuste.

Los resultados obtenidos se asemejan a los determinados por Ibrahim, (2007) respecto a los valores para cada uno de los cambios dimensionales, coincidiendo, además, los valores medios en cuanto a su comportamiento pues en este caso también fueron mayores los valores de la contracción radial y tangencial que los de la longitudinal. Martínez, (2014) plantea que los valores medios de contracción radial y tangencial de la madera de *Pinus caribaea* son de 4.5797 y 5.0087 respectivamente valores que, aunque no son exactamente iguales a los encontrados en este trabajo, se asemejan.

Los análisis de contracción volumétrica total arrojaron que a medida que la madera se aleja de la médula del árbol sufre mayores variaciones en su dimensión. Los valores medios de Contracción volumétrica fueron de 11.115%, 11.672%, 12.502%, 13.881% para las posiciones desde la uno hasta la cuatro respectivamente (Figura 19). Estos valores de cambios dimensionales no coinciden con los encontrados por Ibrahim, (2007), aunque si son muy similares. Los resultados de este trabajo en cuanto al

comportamiento de la contracción se asemejan bastante a los obtenidos por Ibrahim, (2007) y Woxblom, (1999) pues se establece que a medida que aumenta la distancia de la médula la contracción volumétrica aumenta como consecuencia de un aumento sistemático de la densidad de la madera, así como la presencia de mayores niveles de celulosa y de las dimensiones de los elementos anatómicos de la madera.



Figura 19. Comportamiento de la contracción volumétrica de la madera de *P. caribaea var caribaea*, con respecto a la posición que ocupa la madera en la sección radial del fuste.

De acuerdo con el análisis de normalidad realizado a los datos de Anisotropía dimensional de la madera de esta especie se desarrolló, con el objetivo de determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las muestras de las diferentes posiciones respecto a la médula. Para ello se llevó a cabo el análisis mediante el estadístico de Kruskal Wallis, se pudo determinar que no existen diferencias significativas para  $p < 0.05$ , entre los grupos evaluados (Tabla 12).

Tabla 12. Prueba de Kruskal Wallis para K muestras independientes. Coeficiente de anisotropía.

| <b>Estadísticos de prueba <sup>a,b</sup></b> |       |
|--|-------|
| Coeficiente de Anisotropía                   |       |
| Chi-cuadrado                                 | 5,179 |
| gl   | 3     |
| Sig. asintótica                              | ,159  |

a. Prueba de Kruskal Wallis.

b. Variable de agrupación: Posición en la dirección respecto al radio del fuste.

Los resultados de los ensayos de anisotropía de la madera de la especie estudiada, arrojaron que esta posee valores que se encuentran desde 1.5 hasta 2.5. En el caso de los valores de anisotropía las muestras que mejores resultados tuvieron fueron las de la posición uno, que contiene la médula y la posición cuatro que contiene la madera más próxima a la corteza del árbol. Es significativo que los resultados arrojados indiquen que la madera que contiene médula del árbol posee un coeficiente de anisotropía menor que la que contiene duramen y albura (posiciones dos y tres). Sin embargo, esto sucede ya que la madera de esta sección del fuste está más cargada de resina y otros compuestos. Esa cantidad de resina no se evapora al ser secada y cristaliza la fibra de la madera lo que provoca que no varíen las dimensiones de las probetas estudiadas después de secadas (Figura 20).

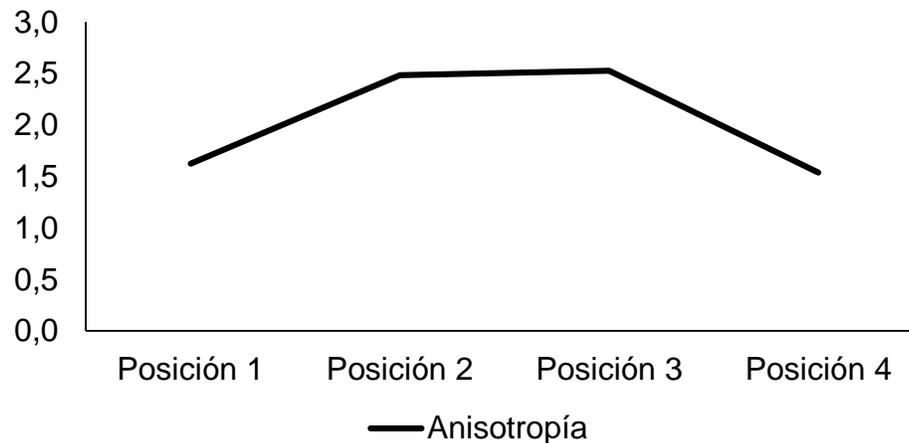


Figura 20. Comportamiento de la anisotropía dimensional de la madera de *P. caribaea var caribaea*, con respecto a la posición que ocupa la madera en la sección radial del fuste.

#### 4.1.2.2 Clasificación de la madera de *P. caribaea var caribaea* en cuanto a su variación dimensional.

De acuerdo con los resultados de contracción volumétrica obtenidos, la madera de esta especie para las cuatro posiciones respecto a la médula se encuentra entre 11% y 14% por lo que se puede clasificar como contracción mediana (tabla 13) de acuerdo con la clasificación propuesta por Pérez, (1983).

Tabla 13 Clasificación de la madera de *P. caribaea var caribaea* según la contracción volumétrica.

| PMC               | Contracción V | Clasificación              |
|-------------------|---------------|----------------------------|
| Posición 1        | 11,115        | Contracción mediana        |
| Posición 2        | 11,672        | Contracción mediana        |
| <b>Posición 3</b> | <b>12,502</b> | <b>Contracción mediana</b> |
| Posición 4        | 13,881        | Contracción mediana        |

Según lo indicado por Vignote y Martínez, (2006), maderas con relación entre coeficientes T/R > 2 presentan elevada tendencia a deformación. Atendiendo a lo antes

planteado y los resultados obtenidos de coeficiente de anisotropía, la madera de *P. caribaea var caribaea* posee una elevada tendencia a la deformación en las áreas que comprenden al duramen y las zonas de las alburas más alejadas de la corteza. Sin embargo, en área más cercana a la médula y la corteza el coeficiente de anisotropía es inferior a dos ( $T/R < 2$ ), por lo que la madera de estas zonas es más estable (Tabla 14).

Tabla 14. Clasificación de la madera de *Pinus caribaea var caribaea* según el coeficiente de anisotropía. Gutiérrez y Silva, (1999).

| PMC               | Anisotropía | Clasificación                          |
|-------------------|-------------|--|
| Posición 1        | 1,6         | Baja o estable                         |
| Posición 2        | 2,5         | Mediana o moderadamente estable        |
| <b>Posición 3</b> | <b>2,5</b>  | <b>Mediana o moderadamente estable</b> |
| Posición 4        | 1,5         | Baja o estable                         |

#### 4.2 Comportamiento de las propiedades mecánicas de la madera de *Pinus caribaea var caribaea* en relación a su ubicación respecto al radio del fuste.

##### 4.2.1 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra de la madera.

La compresión perpendicular a la fibra es la aplicación de una fuerza de compresión a una pieza de madera que actúa en dirección perpendicular a la fibra. La resistencia de la madera a la compresión perpendicular es mínima pues las fibras, que son huecas, se aplastan bajo la carga. Por otra parte, la resistencia a la compresión paralela a la fibra se puede catalogar como la aplicación de una fuerza que actúa en dirección paralela a la fibra de la madera.

Al someter las probetas al ensayo, se observa que las fibras se compactan, luego se produce una gran deformación que continúa aún sin que aumente la carga aplicada. Generalmente, la resistencia de la madera a la compresión perpendicular a la fibra

representa aproximadamente la cuarta parte de la resistencia en la dirección paralela a la fibra. Campos, (2015)

#### 4.2.1.1 Comparación de los esfuerzos de compresión paralela y perpendicular a la fibra de la madera de *Pinus caribaea var caribaea* de las diferentes posiciones respecto al radio del fuste.

Los análisis realizados a los resultados de los ensayos de compresión indican que los datos obtenidos tanto para la compresión paralela como para la perpendicular, no siguen una distribución normal, pues no cumplen el supuesto teórico (Shapiro-Wilk) analizado. Se observa como los resultados de la prueba obtienen una significación menor que 0.05 en todos los casos. (Anexo 3).

Para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de los ensayos de compresión paralela y perpendicular a la fibra entre los diferentes grupos que conforman las posiciones se utilizaron pruebas no paramétricas. De acuerdo con el estadístico de prueba analizado (Kruskal Wallis), existen diferencias significativas para  $p < 0.05$  entre las cuatro posiciones, respecto a la médula de la madera, para ambos esfuerzos de compresión (Tabla 15).

Tabla 15. Prueba de Kruskal Wallis para K muestras independientes. (Compresión paralela y perpendicular de la madera de *Pinus caribaea*).

| <b>Estadísticos de prueba<sup>a,b</sup></b> |  |   |
|---|--|---|
|   | Módulo de ruptura compresión<br>paralela (kg*cm-1) | Módulo de ruptura compresión<br>perpendicular (kg*cm-1) |
| Chi-cuadrado                                | 13,949   | 34,182  |
| gl  | 3  | 3   |
| Sig. asintótica                             | ,003   | ,000  |

a. Prueba de Kruskal Wallis

b. Variable de agrupación: Posición en la dirección respecto al radio del fuste.

Los análisis de compresión paralela de la madera de la especie estudiada alcanzaron valores promedios de  $565,104 \text{ kg} \cdot (\text{cm}^2)^{-1}$ ;  $650,729 \text{ kg} \cdot (\text{cm}^2)^{-1}$ ;  $684,167 \text{ kg} \cdot (\text{cm}^2)^{-1}$  y  $703,125 \text{ kg} \cdot (\text{cm}^2)^{-1}$  para las posiciones uno, dos, tres, y cuatro respectivamente. En este caso los valores promedios más altos de compresión fueron los alcanzados por las posiciones tres y cuatro, siendo esta última la de mayor valor promedio. Los valores medios obtenidos de los ensayos para determinar el módulo de ruptura a compresión paralela siguieron un comportamiento similar al de la compresión perpendicular pues en este caso los valores más altos alcanzados fueron los de la madera más próxima a la corteza. Siendo estos de  $206,597 \text{ kg} \cdot (\text{cm}^2)^{-1}$ ;  $284,722 \text{ kg} \cdot (\text{cm}^2)^{-1}$ ;  $336,806 \text{ kg} \cdot (\text{cm}^2)^{-1}$  y  $387,153 \text{ kg} \cdot (\text{cm}^2)^{-1}$ . Es importante destacar que los valores del esfuerzo de compresión paralela a la fibra fueron muy superiores a los de compresión perpendicular, pues alcanzo valores que superan en más del doble (Figura 21).

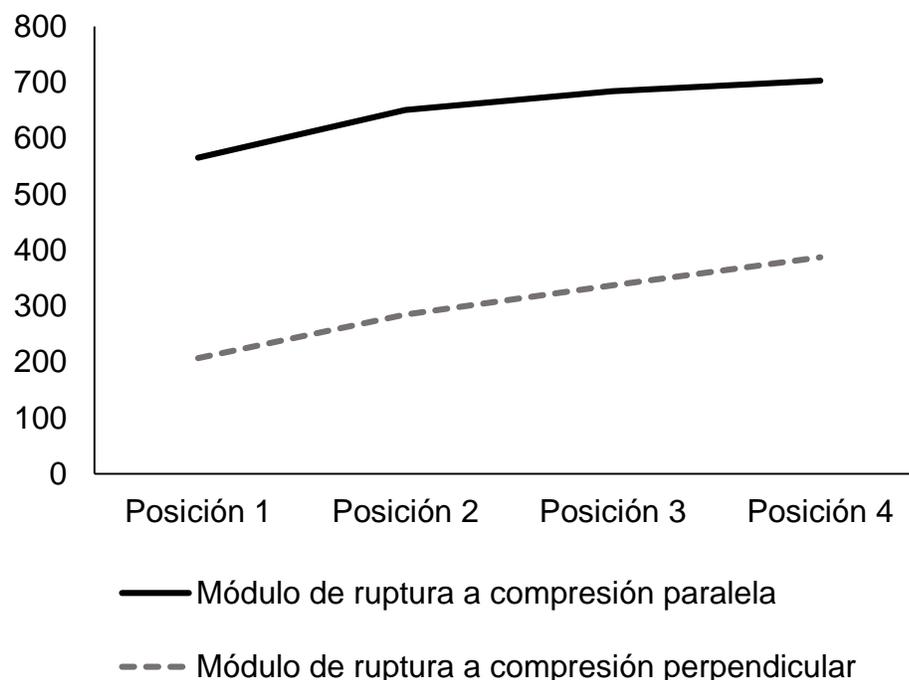


Figura 21. Comportamiento del esfuerzo de compresión paralela a la fibra de la madera de *P. caribaea var caribaea*, respecto a la posición en la sección radial del fuste.

Los resultados obtenidos en este trabajo alcanzaron valores inferiores a los encontrados por Ibrahim, (2007), pues el autor plantea que la especie posee valores de

compresión en sentido radial (perpendicular) de  $282.791 \text{ kg} \cdot (\text{cm}^2)^{-1}$ ;  $344.336 \text{ kg} \cdot (\text{cm}^2)^{-1}$ ;  $433.069 \text{ kg} \cdot (\text{cm}^2)^{-1}$  y  $514.131$ . No obstante, como ha ocurrido en las demás propiedades esta también coincide con el comportamiento respecto a la dirección respecto al radio del fuste, los resultados obtenidos al igual que los del autor, aumentan a medida que se acerca la madera a la corteza del árbol.

#### 4.2.1.2 Clasificación de la madera de *P. caribaea* var *caribaea* en cuanto a los esfuerzos de compresión paralela y perpendicular de la fibra.

De acuerdo con la clasificación propuesta por Pérez, (1983), los valores tanto de compresión paralela como de compresión perpendicular de la madera de esta especie se encuentran en la clasificación muy alto para las cuatro posiciones y en cada uno de los ensayos de compresión realizados (Tabla 16).

Tabla 16 Clasificación de la madera de *P. caribaea* var *caribaea* según el módulo de ruptura a compresión paralela y perpendicular.

| PMC      | MOR a compresión<br>Paralela. | Clasificación   | MOR a compresión<br>Perpendicular. | Clasificación   |
|----------|-------------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
| 1        | 565,104                       | Muy alto        | 206,597                            | Muy alto        |
| 2        | 650,729                       | Muy alto        | 284,722                            | Muy alto        |
| <b>3</b> | <b>684,167</b>                | <b>Muy alto</b> | <b>336,806</b>                     | <b>Muy alto</b> |
| 4        | 703,125                       | Muy alto        | 387,153                            | Muy alto        |

#### 4.2.2 Resultados de los ensayos sobre resistencia de la madera de *P. caribaea* var *caribaea* a la flexión estática.

##### 4.2.2.1 Comparación de los esfuerzos de compresión paralela y perpendicular de la fibra de la madera en las diferentes posiciones.

Según el análisis de normalidad realizado a los resultados de los ensayos de flexión estática, estos siguen una distribución normal para  $p < 0.05$ , pues cumplen con el

supuesto teórico de Shapiro-Wilk ya que la significación es mayor que 0.05 para todas las posiciones (Tabla 17).

Tabla 17. Prueba de normalidad de los resultados de flexión estática de la madera de *P. caribaea var caribaea*.

| <b>Pruebas de normalidad</b>                         |  |                 |              |      |
|--|--|-----------------|--------------|------|
|  | Posición en la<br>dirección respecto<br>al radio del fuste | Estadístic<br>o | Shapiro-Wilk |      |
|  |  |                 | gl           | Sig. |
|  | 1  | ,970            | 24           | ,678 |
| Módulo de ruptura<br>a flexión estática<br>(kg*cm-1) | 2  | ,928            | 24           | ,090 |
|  | 3  | ,973            | 24           | ,735 |
|  | 4  | ,931            | 24           | ,101 |

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Para evaluar si existen diferencias entre los valores medios del módulo de ruptura de la madera de la especie en cuanto a la flexión estática se utilizó un análisis de varianza en el cual se seleccionó la prueba de Tukey<sup>a</sup> para las comparaciones entre grupos. Los resultados arrojaron que existen diferencias entre los grupos que conforman las cuatro posiciones. Se evidencia claramente como la madera que se encuentra en la médula del árbol (posición uno) posee diferencias con respecto a las tres posiciones restantes. En el caso de los resultados de los ensayos de flexión estática de la posición dos no presentan diferencias estadísticamente significativas con los de la posición tres, sí con los de la uno y la cuatro. Los valores de la posición tres por su parte son significativamente diferentes de los de la posición uno, no siendo así con las posiciones

dos y cuatro. A su vez la madera de la posición cuatro no presenta diferencias solo con la posición tres, y si con las demás (Tabla 18).

Tabla 18. Análisis de varianza de los resultados de flexión estática de la madera de *P. caribaea* var *caribaea*. Prueba de HSD Tukey.

| <b>Módulo de ruptura a flexión estática (kg*cm<sup>-1</sup>)</b> |    |                              |          |          |
|--|----|------------------------------|----------|----------|
| Posición respecto al<br>radio del fuste                          | N  | HSD Tukey <sup>a</sup>       |          |          |
|  |    | Subconjunto para alfa = 0.05 |          |          |
|  |    | 1                            | 2        | 3        |
| 1  | 24 | 682,813                      |          |          |
| 2  | 24 |                              | 876,953  |          |
| 3  | 24 |                              | 1009,375 | 1009,375 |
| 4  | 24 |                              |          | 1116,211 |
| Sig.   |    | 1,000                        | ,187     | ,365     |

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 24,000.

Es importante destacar que los valores medios del módulo de ruptura a flexión estática de la madera de *P. caribaea* var *caribaea* se encuentran entre los 682,813 kp\*(cm<sup>2</sup>)<sup>-1</sup> y los 1116.211 kp\*(cm<sup>2</sup>)<sup>-1</sup> siendo mayores estos resultados a medida que se aleja la madera de la médula, por lo que podemos decir que la madera adulta del árbol posee mayor módulo de ruptura a flexión estática que la madera joven. Este resultado es de esperarse ya que la madera adulta está compuesta por fibras que se encuentran más compactas lo que le confiere mayor flexibilidad y resistencia a la madera, esto sin mencionar que la madera de las posiciones uno y dos, que conforman la médula y el duramen del árbol, se ven afectadas por el proceso de secado en la estufa que

cristaliza la gran cantidad de resina que esta posee y por tanto limita su flexibilidad (Figura 22).

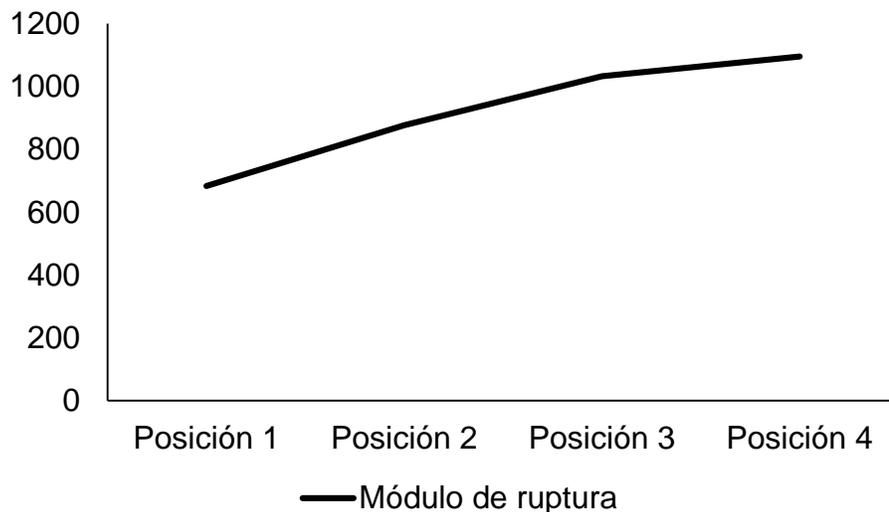


Figura 22. Comportamiento del módulo de ruptura a flexión estática de la madera de *P. caribaea var caribaea*, respecto a la posición que ocupa la madera en la sección radial del fuste.

Los resultados obtenidos son similares a los determinados por Martínez, (2014), pues a pesar de que el autor no tiene en cuenta la posición de la madera respecto a la médula el valor promedio, de  $860 \text{ kg}^*(\text{cm}^2)^{-1}$  que determina se asemeja al valor promedio de las cuatro posiciones estudiadas  $921,338 \text{ kg}^*(\text{cm}^2)^{-1}$ . Los valores obtenidos en este estudio son ligeramente superiores al obtenido por el autor, solo la posición uno posee un módulo de ruptura a flexión estática menor.

Otra de las especies del género *Pinus* a la que se le ha estudiado el comportamiento físico-mecánico es a *Pinus maximinoi*, este posee valores de  $352,652 \text{ kg}^*(\text{cm}^2)^{-1}$  y  $490,648 \text{ kg}^*(\text{cm}^2)^{-1}$  para la madera del duramen y la albura respectivamente (Campos, 2015). Se puede apreciar además como la madera de esta especie aumenta su módulo de ruptura a medida que se aleja de la médula del árbol.

#### 4.2.2.2 Clasificación de la madera de *P. caribaea* var *caribaea* en cuanto al módulo de ruptura a flexión estática.

Según la clasificación planteada por Spavento *et al.*, (2008), la madera de esta especie en cuanto al módulo de ruptura a flexión estática se puede clasificar como de bajo a medio, siendo las posiciones tres y cuatro las que se pueden clasificar como medio (Tabla 18).

Tabla 19. Clasificación de la madera según el módulo de ruptura (MOR) a partir del ensayo a flexión estática (Spavento *et al.*, 2008).

| PMC               | Módulo de ruptura a flexión estática | Clasificación |
|-------------------|--------------------------------------|---------------|
| Posición 1        | 682,813                              | Bajo          |
| Posición 2        | 876,953                              | Bajo          |
| <b>Posición 3</b> | <b>1032,750</b>                      | <b>Medio</b>  |
| Posición 4        | 1088,194                             | Medio         |

#### 4.3 Análisis de la relación entre las propiedades físicas, mecánicas y las variables dasométricas, en la madera de *P. caribaea* var *caribaea*.

El análisis de correlación de Pearson indica que existe poca relación entre las variables estudiadas. Se determinó la relación existente entre las propiedades físicas y mecánicas estudiadas con las variables dasométricas: diámetro a 1.30 (D1.30), altura total (Ht), altura de Fuste (Hf), altura de copa (Hc), radio de compa (Rc) y distancia médula corteza (Dmc).

El análisis realizado indica que en el caso de la densidad aparente con las fibras saturadas (D. As) no existe una relación fuerte entre esta y las variables dasométricas, alcanzando valores por debajo del 30% en todos los casos. A pesar de esto podemos ver que la variable dasométricas que más influye en el comportamiento de la densidad

aparente de la madera saturada es el diámetro medio y la altura total con valores de 26.5% y 28.5% respectivamente, siendo estas inversamente proporcionales.

Por otra parte, se observa que la distancia médula corteza tiene una correlación positiva con las densidades aparente seca al aire, la densidad aparente anhidra y la densidad básica alcanzando valores de 35.6%, 45.9% y 49.6% respectivamente, siendo a su vez las propiedades que más dependen de las variables dasométricas, según el análisis de correlación. Se comprobó además que las propiedades contracción volumétrica y anisotropía no dependen en gran medida de variables dasométricas.

En el caso de las propiedades mecánicas se identificaron para la compresión paralela dos variables dasométricas fundamentales que inciden sobre esta, el diámetro a 1.30m y la distancia médula corteza, los cuales alcanzaron valores de correlación de un 40.2% y 41.2% respectivamente. Por su parte la compresión perpendicular no se ve muy afectada por las variables dasométricas alcanzando valores de correlación inferiores al 20 % en la mayoría de las variables, exceptuando la altura del fuste, con la que se encuentra relacionada en un 21.5%. La flexión estática no alcanzó valores de correlación significativos con las variables dasométricas, el valor más alto lo alcanzó con la distancia médula corteza (29.2%) siendo además inversamente proporcionales (Tabla 20). Resultados como este encuentra (Ibrahim, 2007) en su estudio de las propiedades físico-mecánicas de cinco procedencias de *Pinus tropicalis*, el autor no encuentra altos valores de correlación entre las variables dasométricas y las propiedades estudiadas de la especie. En este caso las correlaciones más significativas fueron las obtenidas con el diámetro y los valores todos fueron inferiores a 35%.

Tabla 20. Correlación de Pearson entre las variables dasométricas y las propiedades físico-mecánicas de la madera de *Pinus caribaea var caribaea*.

|              | <b>D. As</b> | <b>D Asa</b>  | <b>D. Ao</b>  | <b>D b</b>    | <b>Cv</b> | <b>Anis.</b> | <b>C. Pa</b>  | <b>C. Pe</b> | <b>Flex.<br/>Est.</b> |
|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-----------|--------------|---------------|--------------|-----------------------|
| <b>D1,30</b> | -,265**      | ,238*         | ,298**        | ,275**        | ,008      | ,099         | <b>,402**</b> | ,090         | ,120                  |
| <b>Dmc</b>   | ,127         | <b>,356**</b> | <b>,459**</b> | <b>,496**</b> | -,117     | -,020        | -,030         | ,047         | -,292**               |
| <b>Ht</b>    | -,282**      | ,215*         | ,258*         | ,259*         | -,063     | ,120         | <b>,412**</b> | ,174         | ,097                  |
| <b>Hf</b>    | -,187        | ,065          | ,067          | ,099          | -,126     | ,139         | ,288**        | ,215*        | -,002                 |
| <b>Hc</b>    | -,210*       | ,229*         | ,285**        | ,257*         | ,028      | ,037         | ,292**        | ,040         | ,131                  |
| <b>Rc</b>    | ,090         | -,066         | -,082         | -,038         | -,107     | ,054         | -,071         | ,094         | -,165                 |

Es importante destacar que las variables dasométricas que más influyeron sobre las propiedades físico-mecánicas de la madera de esta especie son las que están más directamente relacionadas con el crecimiento del árbol (diámetro a 1.30m, distancia de la médula a la corteza y altura total). Esto indica que puede existir una estrecha relación entre el crecimiento, específicamente la velocidad de crecimiento, del árbol y las propiedades físico-mecánicas de la madera de este. En el caso de la propiedad física densidad aparente y básica se observó como la distancia médula corteza incide directamente sobre estas exceptuando, por supuesto la densidad aparente con la madera saturada que depende en gran medida del contenido de humedad capaz de retener la madera.

## CONCLUSIONES

1. Existe variación en el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de la madera de *Pinus caribaea* M. var. *caribaea* B & G en relación a su ubicación respecto al radio del fuste a una edad de 40 años y en las condiciones edafo-climáticas del macizo Guamuhaya.
2. La madera de *P. caribaea* var. *caribaea* se clasifica desde pesada hasta muy pesada atendiendo a su densidad, esta posee una contracción mediana y atendiendo a su anisotropía puede ser desde baja o estable hasta mediana o moderadamente estable.
3. Según las propiedades mecánicas de la madera de *P. caribaea* var. *caribaea*, esta presenta un módulo de ruptura a compresión paralela y perpendicular muy alto y un módulo de ruptura a flexión estática desde bajo hasta medio.
4. Las variables dasométricas no tienen fuerte influencia sobre las propiedades físico-mecánicas de la madera de *P. caribaea* var. *caribaea* que fueron estudiadas, solo el diámetro a 1.30m, la distancia médula corteza y la altura total poseen una relación medianamente alta.

## RECOMENDACIONES

En términos científicos:

Realizar estudios sobre las propiedades físico-mecánicas de *Pinus caribaea* var. *Caribaea* Barret y Golfari en las diferentes edades en que esta se aprovecha, así como en las diferentes condiciones edáficas en que se encuentran las plantaciones.

En términos académicos:

Utilizar los resultados de esta investigación para la elaboración de ejercicios, clases prácticas y cualquier otro tipo de actividad docente, en las asignaturas de la carrera que así lo requieran.

En términos productivos:

Tener en cuenta los resultados de este estudio para darle un mejor uso a la madera de *Pinus caribaea* var. *caribaea* Barret y Golfari que aprovecha.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Acuña, L., y Casado, M. (2005). Material de apoyo del curso Tecnología de la madera. Universidad de Valladolid, España. Recuperado el 25 de febrero de 2019, de [http://www.uva.es/consultas/guia.php?menu=ficheros&ano\\_academico=0506&codigo\\_plan=279&codigo\\_asignatura=22265&grupo=1](http://www.uva.es/consultas/guia.php?menu=ficheros&ano_academico=0506&codigo_plan=279&codigo_asignatura=22265&grupo=1)

Álvarez Lazo, D., Benigno Paes, J., Santos Momoli, R., Baracho Junior, E., Tomazello Filho, M., Cooper, M., Caraciolo Ferreira, R. L. (2013). Tecnología de la Madera. Brazil. 247pp.

Brazier, J. D. y Howell, R. S. (1979). The use of a breast height core for.

Campos Wellmann, C. A. (2015). Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore; COBÁN, ALTA VERAPAZ. Tesis de grado, Universidad Rafael Landívar, Ciencias Ambientales y Agrícolas, Guatemala.

Campos, A., Cubillos, J., Morales, F., & Pastene, A. (1990). Propiedades y usos de especies madereras de corta rotación. Santiago, Chile: Corporacion de Fomento de la Producción (CORFO).

Coronel E, O. (1994). Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. Aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones. Santiago de Estero, Argentina: El Liberal.

Crespo Martínez, Y. (2017). Modelación de hábitats en *Pinus caribaea* var. *caribaea* Barrett y Golfari y *Pinus tropicalis* Morelet. *Revista Científico estudiantil Ciencias Forestales y Ambientales*, 3(1), 89-113.

Dalla, G., Martínez, A., Cochard, H., & Rozenberg, P. (2009). Variation of wood density and hydraulic properties of Douglas-fir (*Pseudotsugamenziesii* (Mirb.) Franco) clones related to a heat and drought wave in France. *Forest Ecology and Management* 257, 182–189.

Davel, M. M., Jovanovski, A., & Mohr Bell, D. (2005). Densidad básica de la madera de Pino oregón y su relación con las condiciones de crecimiento en la Patagonia Andina Argentina. *Bosque*, 3(26), 55-62.

Díaz, A., Carreras, R., Álvarez, D., Hernández del Vallín, C., Ibáñez, A., Caraballo, L., . . . Corrona, M. (1986). *Ciencia de la madera*. ENPES, 196.

Díaz, P. (2005). Evaluación de Propiedades Físicas y Mecánicas de madera de *Nothofagus glauca* (Hualo) proveniente de la zona de Cauquenes. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales, Chile.

Echenique Manrique, R., & Robles Fernández, F. (1993). *Ciencia y Tecnología de la Madera I*. Universidad Veracruzana.

Fernández, C. I. (2001). *LA MADERA: Composición, Alteraciones y Restauración*. Asociación de Estudios Pasiegos, Santander.

Gálvez, B. (2011). *Madera estructural. Tipología y Cálculo de Uniones*. Proyecto Final de Carrera, Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, España.

Goche, J., Fuentes, M., Borja de la Rosa, A., & Ramírez, H. (2000). Variación de las propiedades físicas de la madera en un árbol de *Abies religiosa* y de *Pinus ayacahuite* var. *veitchii*. *Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 6(1), 83-92.

Goche, J., Velázquez, A., & Borja de la Rosa, A. (s.f.). Variación radial de la densidad básica en *Pinus Patula* de tres localidades en Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(7).

Gutiérrez, V. y Silva, J. 1999. Información Técnica para el Procesamiento Industrial de 134 Especies Maderables de Bolivia. Serie Técnica XII. Proyecto de Apoyo a la Coordinación e Implementación del Plan de Acción Forestal Para Bolivia FAO – PAFBOL. La Paz, Bolivia.

Hoadley, R. B. (1980). *Understanding Wood A craftsman's guide to wood technology*. The taunton Press.

Ibañes y col, A. (2002). Propiedades y uso de 50 especies maderables. Propuesto premio académico.

Ibrahim, M. Z. (2007). Caracterización Físico- mecánica de cinco procedencias de *Pinus tropicalis* en la Provincia de Pinar del Río. Tesis de Grado, Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saiz Montes de Oca", Forestal, Pinar del Río. 76 pp

Jane, F. W. (1970). The structure of wood. 2ª Ed. Adam & Charles Black, 195–233 pp.

Karsulovic, J. (1982). Propiedades mecánicas de la madera. Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales, Tecnología de la madera. Santiago, Chile: Universidad de Chile.

Kollman, F. (1959). Tecnología de la Madera y sus Aplicaciones. Instituto Forestal de Investigaciones, Experiencias y Servicios de la Madera. Madrid: Springer Verlag.

Kollmann, F., & Cote, W. (1963). Principles of Wood science and. New York.

Kort, V., & Loeffen, P. (1991). Ring width, density and wood anatomy of Douglas Fir with different crown vitality. IAWA. Bulletin.s, 12(4), 453-465.

Leckoundzou, A. (2011). Influencia de diferentes variables dendrométricas y calidad de árboles en pie sobre los rendimientos de madera aserrada de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari. Tesis Doctoral, Universidad de pinar del Río "Hermanos Saiz Montes de Oca", Forestal, Pinar del Río.

Lessing Hoyos, I. (2016). Propiedades físicas y mecánicas de la madera.

Martínez Fernández, J. (2014). Caracterización fisicomecánica de Pino caribea en la región central de Cuba. Tesis de grado, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Ingeniería Civil, Santa Clara.

Panshin, A. J., y De Zeeuw, C. (1980). Structure, identification, properties, and uses of the United States and Canada. New York, EEUU.

Paredes Ramírez, S. H. (2017). Propiedades físicas y mecánicas de *Pinus maximinoi* como material de construcción. Tesis de grado, Universidad Rafael Landívar, Ciencias Ambientales y Agrícolas, Guatemala de la Asunción.

Pérez, V. (1983). Manual de propiedades físicas y mecánicas de maderas chilenas. Santiago, Chile.

Pittermann, S., Sperry, J., Wheeler, K., Hacke, U., & Sikkema, H. (2006). Mechanical reinforcement of tracheids compromises the hydraulic efficiency of conifer xylem. *Plant, Cell & Environment* 29, 1618–1628.

Ramírez, M. C., Garay, D. A., Reyes, E. C., & Valero, S. (2006). Estudio de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus oocarpa* proveniente de aclareos en la plantación "Emilio Menotti Sposito", de 35 años de edad con fines protectores. *Revista Forestal Latinoamericana* (35), 21-36.

Schniewind, A. P. (1989). Concise encyclopedia of wood and wood based.

Serrano, J. R., Córdoba, R., Canessa, E., & Sáenz, M. (2001). Evaluación de características y propiedades tecnológicas para madera de Teca (*Tectona grandis*) de plantación. CATIE, Costa Rica.

Sotomayor, J. (2002). Características mecánicas de la madera y su aplicación en la industria de la construcción. *Revista Ciencia Nicolaita*, Vol. 4(2), 127-138.

Spavento, E., Keil, G. D., & Moeteoliva, S. (2008). Propiedades Físicas de la madera. Universidad Nacional de la Plata, Ingeniería Agrícola y Forestal.

Tsoumis, G. (1991). Science and Technology of Wood. Van Nostrand Reinhold.

Valencia, S. (1994). Variación genética de la densidad de la madera en *Pinus patula* Schl et Cham. y su relación con la velocidad de crecimiento. México: Edo. de México.

UNE-56531-77 Características físico-mecánicas de la madera: Determinación del peso específico.

UNE-56533-77 Características físico-mecánicas de la madera: Determinación de las contracciones lineales y volumétrica.

UNE-56535-77 Características físico-mecánicas de la madera: Determinación de la resistencia a la compresión.

UNE-56537-79 Características físico-mecánicas de la madera: Determinación de la resistencia a la flexión estática.

Vignote, I., & Martínez, I. (2006). Tecnología de la madera (3ra ed.). Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

Vignote Peña, S., & Jimenez Peris, F. J. (1996). Tecnología de la Madera. Madrid: Mundi Prensa Libros S.A.

Vigonte Peña, S. (2017). Madera aserrada i: características y propiedades. México.

Winandy, J. (October de 1994). Wood Properties. Academic Press, 4(549-561).

Woxblom, L. (1999). Warp of Saw Timber of Norway Spruce in Relation to End- user requirements. Doctoral thesis, University of Agricultural sciences Utgivningsort.

Zobel, B., & Talbert, J. (1994). Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. D.F: LIMUSA. México.

**ANEXOS.**

Anexo1. Prueba de normalidad de los resultados obtenidos en los análisis de densidad de la madera de *P. caribaea var caribaea*

| Propiedad física                  | Posición en la dirección<br>respecto al radio del<br>fuste | Shapiro-Wilk |    |      |
|-----------------------------------|--|--------------|----|------|
|                                   |  | Estadístico  | gl | Sig. |
| Densidad Aparente saturada        | 1  | ,954         | 48 | ,058 |
|                                   | 2  | ,913         | 48 | ,002 |
|                                   | 3  | ,810         | 48 | ,000 |
|                                   | 4  | ,981         | 48 | ,628 |
| Densidad Aparente seca al<br>aire | 1  | ,948         | 48 | ,033 |
|                                   | 2  | ,875         | 48 | ,000 |
|                                   | 3  | ,902         | 48 | ,001 |
|                                   | 4  | ,953         | 48 | ,054 |
| Densidad Aparente Anhidra         | 1  | ,941         | 48 | ,017 |
|                                   | 2  | ,832         | 48 | ,000 |
|                                   | 3  | ,914         | 48 | ,002 |
|                                   | 4  | ,745         | 48 | ,000 |
| Densidad básica                   | 1  | ,944         | 48 | ,023 |
|                                   | 2  | ,778         | 48 | ,000 |
|                                   | 3  | ,963         | 48 | ,133 |
|                                   | 4  | ,965         | 48 | ,160 |

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors.

Anexo 2. Prueba de normalidad de los resultados obtenidos en el análisis dimensional de la madera de *P. caribaea var caribaea*.

| <b>Pruebas de normalidad</b>  |   |              |    |      |
|-------------------------------|---|--------------|----|------|
|                               | Posición en la dirección<br>respecto al radio del fuste | Shapiro-Wilk |    |      |
|                               |   | Estadístico  | Gl | Sig. |
| Contracción<br>Radial         | 1   | ,966         | 48 | ,168 |
|                               | 2   | ,952         | 48 | ,048 |
|                               | 3   | ,984         | 48 | ,747 |
|                               | 4   | ,947         | 48 | ,032 |
| Contracción<br>Longitudinal   | 1   | ,918         | 48 | ,002 |
|                               | 2   | ,948         | 48 | ,032 |
|                               | 3   | ,903         | 48 | ,001 |
|                               | 4   | ,971         | 48 | ,280 |
| Contracción<br>Tangencial     | 1   | ,963         | 48 | ,165 |
|                               | 2   | ,966         | 48 | ,602 |
|                               | 3   | ,902         | 48 | ,271 |
|                               | 4   | ,958         | 48 | ,085 |
| Contracción<br>Volumétrica    | 1   | ,987         | 48 | ,852 |
|                               | 2   | ,976         | 48 | ,429 |
|                               | 3   | ,983         | 48 | ,712 |
|                               | 4   | ,988         | 48 | ,898 |
| Coeficiente de<br>Anisotropía | 1   | ,657         | 48 | ,000 |
|                               | 2   | ,538         | 48 | ,000 |

|   |      |    |      |
|---|------|----|------|
| 3 | ,356 | 48 | ,000 |
| 4 | ,593 | 48 | ,000 |

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors.

Anexo 3. Prueba de normalidad de los resultados obtenidos las pruebas de resistencia a la compresión de la madera de *Pinus caribaea*.

| <b>Pruebas de normalidad</b>                                  |  |              |    |      |
|---|--|--------------|----|------|
|   | Posición en la dirección<br>respecto al radio del<br>fuste | Shapiro-Wilk |    |      |
|   |  | Estadístico  | gl | Sig. |
|   | 1  | ,667         | 24 | ,000 |
| Módulo de ruptura<br>compresión paralela<br>(kg*cm-1)         | 2  | ,842         | 24 | ,002 |
|   | 3  | ,868         | 24 | ,005 |
|   | 4  | ,874         | 24 | ,006 |
|   | 1  | ,802         | 24 | ,000 |
| Módulo de ruptura<br>compresión<br>perpendicular<br>(kg*cm-1) | 2  | ,840         | 24 | ,001 |
|   | 3  | ,884         | 24 | ,010 |
|   | 4  | ,897         | 24 | ,018 |

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors.