

**UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA  
MADERA DE *Pinus maximinoi* H. E. Moore; COBÁN, ALTA VERAPAZ  
TESIS DE GRADO

**CHRISTIAN ALBERTO CAMPOS WELLMANN**  
CARNET 21503-01

SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ, MARZO DE 2015  
CAMPUS "SAN PEDRO CLAVER, S. J." DE LA VERAPAZ

**UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA

MADERA DE *Pinus maximinoi* H. E. Moore; COBÁN, ALTA VERAPAZ

TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE  
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

POR

**CHRISTIAN ALBERTO CAMPOS WELLMANN**

PREVIO A CONFERÍRSELE

EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES EN EL  
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADO

SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ, MARZO DE 2015

CAMPUS "SAN PEDRO CLAVER, S. J." DE LA VERAPAZ

## **AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**

RECTOR:	P. EDUARDO VALDES BARRIA, S. J.
VICERRECTORA ACADÉMICA:	DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN:	DR. CARLOS RAFAEL CABARRÚS PELLECCER, S. J.
VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA:	P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.
VICERRECTOR ADMINISTRATIVO:	LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS
SECRETARIA GENERAL:	LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

## **AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS**

DECANO:	DR. ADOLFO OTTONIEL MONTERROSO RIVAS
VICEDECANA:	LIC. ANNA CRISTINA BAILEY HERNÁNDEZ
SECRETARIA:	ING. REGINA CASTAÑEDA FUENTES
DIRECTOR DE CARRERA:	MGTR. LUIS MOISÉS PEÑATE MUNGUÍA

## **NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

MGTR. EZEQUIEL ABRAHAM LÓPEZ BAUTISTA

## **TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN**

MGTR. CARLOS ERNESTO ARCHILA CARDONA

MGTR. MANUEL SABINO MOLLINEDO GARCÍA

ING. ROBERTO WALDEMAR MOYA FERNÁNDEZ

Guatemala, febrero 10 de 2015

Honorable Consejo de Facultad  
Ciencias Ambientales y Agrícolas  
Presente

Estimados miembros del Consejo

Por este medio hago constar que he asesorado el trabajo de graduación del estudiante Christian Alberto Campos Wellmann, carné 21503-01, titulado: **“DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA DE *Pinus maximinoi* H. E. Moore; COBÁN, ALTA VERAPAZ”**, el cual considero que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad, previo a su autorización de impresión.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'E. López', with a large, stylized flourish at the end.

Dr. Sc. Ezequiel Abraham López Bautista  
Colegiado No. 2209  
Asesor

**Orden de Impresión**

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado del estudiante CHRISTIAN ALBERTO CAMPOS WELLMANN, Carnet 21503-01 en la carrera LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES, del Campus de La Verapaz, que consta en el Acta No. 0613-2015 de fecha 21 de febrero de 2015, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

**DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA  
MADERA DE *Pinus maximinoi* H. E. Moore; COBÁN, ALTA VERAPAZ**

Previo a conferírsele el título de INGENIERO FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES en el grado académico de LICENCIADO.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, a los 10 días del mes de marzo del año 2015.



---

**ING. REGINA CASTAÑEDA FUENTES, SECRETARIA  
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS  
Universidad Rafael Landívar**



## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, fuente eterna de Sabiduría, porque sin Él nada somos. Por bendecirme dándome inteligencia, fuerza y coraje para concluir esta etapa de mi vida.

A la Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas de la Universidad Rafael Landívar, por recibirme en sus aulas y brindarme la formación profesional y humana.

A los catedráticos de la Carrera de Ingeniería Forestal del Campus “San Pedro Claver, S. J.” por compartir sus conocimientos y experiencias profesionales, en especial al MBA Carlos Archila, M. Sc. Estuardo Vaides, M. Sc. Manuel Mollinedo, M. Sc. Ricardo Ávila e Ing. Roberto Moya.

Al personal administrativo de la Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas de la Universidad Rafael Landívar, por el apoyo recibido durante los distintos trámites académicos requeridos.

Al MBA Ing. Robert Godö Levensen, Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle de Guatemala, por su amistad y colaboración al brindarme el acceso al Laboratorio de Resistencia de Materiales para la realización de las pruebas mecánicas.

Al Ingeniero Luis Alberto Díaz Coto, Jairo Reyes y Eugenia Barillas, por el apoyo brindado en el uso del equipo durante las pruebas mecánicas de ésta investigación.

A la Ingeniera María Gabriela Meza Guzmán, por permitirme el acceso al Laboratorio de Ciencias Básicas del Campus “San Pedro Claver, S. J.” y por su apoyo en la realización de las pruebas físicas de ésta investigación.

Al Dr. Sc. Ezequiel Abraham López Bautista, por su valiosa amistad, asesoría y apoyo en la elaboración del presente trabajo de investigación.

A mis compañeros de estudios, por su amistad, apoyo y lucha conjunta durante nuestra formación académica, fue un gusto haber conocido y compartido con personas como ustedes.

A todas las personas que he conocido durante estos años y que me brindan su amistad y me han animado a concluir con esta etapa de mi formación profesional, especialmente a mis amigos Ortíz Ortiz.

## **DEDICATORIA**

### **A DIOS Todopoderoso**

Por darme la vida y bendecirme dándome la inteligencia necesaria para concluir ésta investigación, por darme fuerzas y coraje cuando creía que no podría continuar con esta lucha y por poner en mi camino a las personas que se han convertido en mis verdaderos amigos. A Él sea el honor, el poder y la gloria.

### **A mis padres**

Jorge Campos y Julia Wellmann, por la confianza depositada en mí; por su amor y comprensión, por guiarme y ser ejemplo de lucha y superación. Gracias por todos sus esfuerzos.

### **A mi hermana y a mi cuñado**

Liliana y José Williams, por el apoyo y motivación que me brindaron durante mis estudios y en la realización de éste trabajo.

### **A mi hijo**

Jorge Rolando, por ser la principal razón de mí existir, a quien amo con todo mí ser y ha sido la principal motivación para concluir éste trabajo. Que éste esfuerzo sea un ejemplo a seguir para ti hijo mío.

### **A mis sobrinos**

Diether y Marcela, por ser parte importante en mi vida. Esfuércense todos los días.

### **A mis tíos**

Dennis Wellmann y Noemí Morales, por darme su apoyo y comprensión y ser como otros padres para mí.

### **A Guatemala**

País de la Eterna Primavera que Dios nos ha regalado.

# INDICE GENERAL

Resumen .....	i
Summary .....	ii
I. Introducción .....	1
II. Marco Teórico	
2.1 Antecedentes .....	3
2.2 Anatomía de la madera	
2.2.1 Estructura macroscópica .....	10
2.2.2 Madera de albura y duramen .....	12
2.2.3 Determinación de la proporción de albura y duramen .....	14
2.2.4 Macroestructura .....	16
2.2.5 Anillos de crecimiento .....	18
2.2.6 Nudos .....	18
2.2.7 Radios leñosos .....	19
2.2.8 Madera juvenil .....	19
2.2.9 Madera de reacción .....	21
2.2.10 Desviación de la fibra .....	22
2.3 Propiedades físicas de la madera .....	23
2.3.1 Propiedades direccionales .....	23
2.3.2 Contenido de humedad de la madera .....	24
2.3.3 Madera verde y el punto de saturación de la fibra .....	26
2.3.4 El contenido de humedad en equilibrio .....	28
2.3.5 Sorción en la madera .....	30
2.3.6 Histéresis de sorción .....	31
2.3.7 Encogimiento de la madera .....	32
2.3.8 Encogimiento transversal y volumétrico .....	32
2.3.9 El peso, densidad y gravedad específica .....	35
2.4 Propiedades mecánicas de los materiales .....	37
2.4.1 Propiedades mecánicas de la madera .....	38
2.4.2 Propiedades elásticas .....	38
2.4.2.1 Módulo de elasticidad .....	39
2.4.2.2 Módulo de corte .....	40
2.4.3 Propiedades de esfuerzo .....	40
2.4.3.1 Compresión .....	41
2.4.3.2 Flexión estática .....	42
2.4.3.3 El corte .....	44
2.4.3.4 La dureza .....	44
2.5 Las propiedades y calidades de la madera aserrada .....	46
2.6 Pino candelillo ( <i>Pinus maximinoi</i> H. E. Moore)	
2.6.1 Clasificación taxonómica .....	47
2.6.2 Descripción de la especie .....	47
III. Justificación del trabajo	
3.1 Definición del problema .....	49
3.2 Justificación de la investigación .....	50
IV. Objetivos	
4.1 Objetivo general .....	51

4.2	Objetivos específicos .....	51
V.	Hipótesis	
5.1	Hipótesis nula.....	52
5.2	Hipótesis alterna .....	52
VI.	Metodología	
6.1	Localización del área de donde se obtuvo el material experimental .....	53
6.1.2	Accesos al área .....	53
6.2	Material experimental.....	54
6.3	Factores estudiados	
6.3.1	Proporción de albura y duramen .....	55
6.3.2	Propiedades físicas	
6.3.2.1	Porcentaje de humedad .....	57
6.3.2.2	Determinación de la desviación de la fibra .....	58
6.3.2.3	Densidad .....	60
6.3.2.4	Contracción volumétrica y dimensional .....	65
6.3.3	Propiedades mecánicas .....	67
6.3.3.1	Flexión estática .....	67
6.3.3.2	Compresión paralela y perpendicular a la fibra .....	69
6.3.3.3	Dureza radial, tangencial y longitudinal .....	72
6.3.3.4	Corte paralelo a la fibra .....	73
6.3.3.5	Retiro de clavos radial, tangencial y longitudinal .....	74
6.3.4	Módulo de ruptura .....	75
6.3.5	Módulo de elasticidad .....	76
6.4	Descripción de los tratamientos .....	76
6.5	Análisis estadístico .....	78
6.6	Variables respuesta .....	80
VII.	Resultados	
7.1	Propiedades físicas evaluadas	
7.1.1	Proporción de albura y duramen en el fuste de los árboles.....	81
7.1.2	Proporción de albura – duramen en madera de raleo .....	81
7.1.3	Proporción de albura – duramen en madera de corta final.....	83
7.1.4	Inclinación de la fibra de la madera .....	84
7.1.5	Densidad .....	86
7.1.6	Contracción dimensional y volumétrica .....	88
7.2	Propiedades mecánicas	
7.2.1	Dureza .....	90
7.2.1.1	Dureza en madera de raleo y corta final en estado verde .....	91
7.2.1.2	Dureza en madera de raleo y corta final en estado seco .....	92
7.2.2	Prueba de extracción de clavos .....	98
7.2.2.1	Extracción de clavos en madera en estado verde .....	98
7.2.2.2	Extracción de clavos en madera en estado seca .....	99
7.2.3	Prueba de corte paralelo a la fibra .....	105
7.2.3.1	Prueba de esfuerzo de corte en madera verde .....	106
7.2.3.2	Prueba de esfuerzo de corte en madera seca .....	107
7.2.4	Flexión estática .....	112

7.2.4.1	Prueba de flexión estática en madera verde .....	113
7.2.4.2	Prueba de flexión estática en madera seca .....	114
7.2.5	Prueba de compresión perpendicular a la fibra .....	126
7.2.5.1	Prueba de compresión perpendicular a la fibra en madera verde .....	126
7.2.5.2	Prueba de compresión perpendicular a la fibra en madera seca .....	127
7.2.6	Prueba de compresión paralela a la fibra .....	133
7.2.6.1	Prueba de compresión paralela a la fibra en madera verde .....	133
7.2.6.2	Prueba de compresión paralela a la fibra en madera seca.....	134
7.3	Resumen de las propiedades físicas .....	140
7.4	Resumen de las propiedades mecánicas.....	141
7.5	Clasificación de la madera según sus propiedades físicas y mecánicas	
7.5.1	Clasificación de las propiedades físicas de <i>Pinus</i> <i>maximinoi</i> H. E. Moore.....	143
7.5.2	Clasificación de las propiedades mecánicas de <i>Pinus</i> <i>maximinoi</i> H. E. Moore.....	144
VIII.	Conclusiones .....	146
IX.	Recomendaciones .....	148
XI.	Referencias bibliográficas .....	149
XII.	Anexos .....	154

## INDICE DE CUADROS

1.	Colores característicos producidos por los reactivos verde de bromocresol y azul de bromofenol en la madera de albura y duramen de algunas especies.....	16
2.	Clasificación de las tablas por la inclinación de la fibra.....	23
3.	Contenido de humedad promedio de madera verde de algunas especies .....	26
4.	Clasificación de la madera según su relación de estabilidad $R_{T/R}$ .....	34
5.	Clasificación de la madera según su contracción volumétrica .....	35
6.	Clasificación de la madera por su densidad .....	37
7.	Clasificación de la madera de acuerdo al esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra.....	42
8.	Clasificación de la madera de acuerdo al esfuerzo de compresión paralela a la fibra .....	42
9.	Clasificación de la madera según los valores de flexión estática.....	43
10.	Clasificación de la resistencia de la madera según el esfuerzo de corte .....	44
11.	Clasificación de la madera según su dureza.....	45
12.	Dimensiones de las probetas para la determinación de las propiedades mecánicas en muestras de madera limpia según la norma ASTM D-143-94 .....	75
13.	Valores obtenidos para las propiedades físicas de la madera de <i>Pinus</i> <i>maximinoi</i> H. E. Moore.....	140

14.	Resumen de las propiedades mecánicas de la madera de corta final de <i>Pinus maximinoi</i> H. E. Moore, según el contenido de humedad y la zona de fuste .....	141
15.	Resumen de las propiedades mecánicas de la madera de raleo de <i>Pinus maximinoi</i> H. E. Moore, según el contenido de humedad y la zona de fuste .....	142
16.	Resumen de las propiedades mecánicas de la madera de corta final y de raleo de <i>Pinus maximinoi</i> H. E. Moore, según el contenido de humedad .....	142
17.	Resumen de las clasificaciones de las propiedades físicas de la madera de corta final y de raleo de <i>Pinus maximinoi</i> H. E. Moore.....	143
18.	Resumen de las clasificaciones de las propiedades mecánicas de la madera de corta final y de raleo de <i>Pinus maximinoi</i> H. E. Moore según el contenido de humedad.....	144
19.	Contenido de humedad en equilibrio en madera a una temperatura determinada y humedad relativa .....	154
20.	Valores de encogimiento expresados en porcentaje de la dimensión verde para maderas nacionales dentro de los Estados Unidos .....	155
21.	Encogimiento para algunas maderas importadas dentro de los Estados Unidos.....	156
22.	Propiedades mecánicas de algunas maderas importadas dentro de los Estados Unidos y Canadá.....	157
23.	Proporción de albura-duramen en madera de raleo a 0.20 m de altura.....	158
24.	Proporción de albura - duramen en madera de raleo a 2.00 m de altura.....	158
25.	Proporción de albura - duramen en madera de corta final a 0.20 m de altura .....	159
26.	Proporción de albura - duramen en madera de corta final a 2.00 m de altura .....	159
27.	Inclinación de la fibra en % de la madera de raleo .....	160
28.	Inclinación de la fibra en % de la madera de corta final .....	160
29.	Medidas resumen del porcentaje de inclinación de la fibra .....	160
30.	Densidad de la madera de raleo .....	161
31.	Densidad de la madera de corta final.....	161
32.	Medidas resumen de la densidad de la madera.....	161
33.	Contracción dimensional en madera de raleo, en la zona central del tronco .....	162
34.	Contracción dimensional en madera de raleo, en la zona de la periferia del tronco .....	162
35.	Contracción dimensional en madera de corta final, zona del duramen.....	163
36.	Contracción dimensional en madera de corta final, zona de la albura .....	163
37.	Contracción volumétrica en madera de raleo .....	164
38.	Contracción volumétrica en madera de corta final .....	164
39.	Dureza Janka en madera de raleo en estado verde .....	165
40.	Dureza Janka en madera de corta final en estado verde .....	165
41.	Dureza Janka en madera de raleo en estado seco .....	166
42.	Dureza Janka en madera de corta final en estado seco .....	166
43.	Resumen de la prueba de extracción de clavos en madera de raleo en estado verde .....	167
44.	Resumen de la prueba de extracción de clavos en madera de corta final en estado verde .....	168

45.	Resumen de la prueba de extracción de clavos en madera de raleo en estado seco.....	169
46.	Resumen de la prueba de extracción de clavos en madera de corta final en estado seco.....	170
47.	Prueba de esfuerzo de corte en madera de raleo en estado verde .....	171
48.	Prueba de esfuerzo de corte en madera de corta final en estado verde .....	171
49.	Prueba de esfuerzo de corte en madera de raleo en estado seco .....	172
50.	Prueba de esfuerzo de corte en madera de corta final en estado seco .....	172
51.	Prueba de flexión estática en madera en estado verde .....	173
52.	Prueba de flexión estática en madera en estado seco .....	173
53.	Prueba de compresión perpendicular a la fibra en madera en estado verde .....	174
54.	Prueba de compresión perpendicular a la fibra en madera en estado seco .....	174
55.	Prueba de compresión paralela a la fibra en madera en estado verde .....	175
56.	Prueba de compresión paralela a la fibra en madera en estado seco .....	175
57.	Arreglo de datos utilizados para el análisis estadístico con el programa InfoStat. Madera de corta final .....	176
58.	Arreglo de datos utilizados para el análisis estadístico con el programa InfoStat. Madera de raleo.....	177
59.	Análisis de la varianza para la prueba de dureza Janka en madera de corta final .....	178
60.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado de la madera de corta final en la prueba de dureza Janka .....	178
61.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de corta final en la prueba de dureza Janka .....	179
62.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final en la prueba de dureza Janka .....	179
63.	Análisis de la varianza para la prueba de extracción de clavos en madera de corta final .....	180
64.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de corta final para la prueba de extracción de clavos.....	180
65.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de corta final para la prueba de extracción de clavos .....	181
66.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para la prueba de extracción de clavos.....	181
67.	Análisis de la Varianza para la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra en madera de corta final .....	182
68.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de corta final en la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra.....	182
69.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de corta final en la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra .....	183

70.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final en la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra .....	183
71.	Análisis de la varianza del módulo de elasticidad para la prueba de flexión estática en madera de corta final .....	184
72.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco del módulo de elasticidad de la madera de corta final para la prueba de flexión estática .....	184
73.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de corta final para el módulo de elasticidad en la prueba de flexión estática .....	185
74.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para el módulo de elasticidad en la prueba de flexión estática .....	185
75.	Análisis de la varianza del módulo de ruptura para la prueba de flexión estática en madera de corta final .....	186
76.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco del módulo de ruptura de la madera de corta final para la prueba de flexión estática .....	186
77.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de corta final para el módulo de ruptura en la prueba de flexión estática .....	187
78.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para el módulo de ruptura en la prueba de flexión estática .....	187
79.	Análisis de la Varianza para la prueba compresión perpendicular a la fibra en madera de corta final .....	188
80.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de corta final para la prueba de compresión perpendicular a la fibra .....	188
81.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de corta final para la prueba de compresión perpendicular a la fibra .....	189
82.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para la prueba de compresión perpendicular a la fibra .....	189
83.	Análisis de la varianza para la prueba de compresión paralela a la fibra en madera de corta final .....	190
84.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de corta final para la prueba de compresión paralela a la fibra .....	190
85.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de corta final para la prueba de compresión paralela a la fibra .....	191
86.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para la prueba de compresión paralela a la fibra .....	191

87.	Análisis de la varianza para la prueba de dureza Janka en madera de raleo .....	192
88.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de raleo en la prueba de dureza Janka .....	192
89.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de raleo en la prueba de dureza Janka .....	193
90.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en la prueba de dureza Janka .....	193
91.	Análisis de la varianza para la prueba de extracción de clavos en madera de raleo .....	194
92.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de raleo en la prueba de extracción de clavos .....	194
93.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de raleo en la prueba de extracción de clavos .....	195
94.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en la prueba de extracción de clavos .....	195
95.	Análisis de la varianza para la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra en madera de raleo .....	196
96.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco para la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra en madera de raleo .....	196
97.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de raleo en la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra .....	197
98.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra .....	197
99.	Análisis de la varianza del módulo de elasticidad para la prueba de flexión estática en madera de raleo.....	198
100.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de raleo en el módulo de elasticidad para la prueba de flexión estática .....	198
101.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de raleo en el módulo de elasticidad para la prueba de flexión estática .....	199
102.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en el módulo de elasticidad para la prueba de flexión estática .....	199
103.	Análisis de la varianza del módulo de ruptura para la prueba de flexión estática en madera de raleo .....	200
104.	Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de raleo en el módulo de ruptura para la prueba de flexión estática .....	200

105. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de raleo en el módulo de ruptura para la prueba de flexión estática .....	201
106. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en el módulo de elasticidad para la prueba de flexión estática .....	201
107. Análisis de la Varianza para la prueba de compresión perpendicular a la fibra en madera de raleo .....	202
108. Resumen de la prueba de comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de raleo en la prueba de compresión perpendicular a la fibra .....	202
109. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de raleo en la prueba de compresión perpendicular a la fibra.....	203
110. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en la prueba de compresión perpendicular a la fibra .....	203
111. Análisis de la varianza para la prueba de compresión paralela a la fibra en madera de raleo .....	204
112. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco para la prueba de compresión paralela a la fibra en madera de raleo .....	204
113. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de raleo en la prueba de compresión paralela a la fibra .....	205
114. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en la prueba de compresión paralela a la fibra .....	205

## **INDICE DE FIGURAS**

1. Secciones o planos de la estructura de la madera .....	11
2. Elementos de la macroestructura de la madera normalmente visibles sin aumento .....	12
3. Comportamiento de las propiedades de la madera juvenil .....	20
4. Medición de la desviación de la fibra de la madera: $y/x$ .....	22
5. Ejes principales de la madera con respecto a la dirección de la fibra y a los anillos de crecimiento .....	24
6. Relación contenido de humedad – humedad relativa, para maderas bajo varias condiciones de adsorción y desorción .....	31
7. Encogimiento característico y distorsión del corte paralelo, cuadrado y piezas redondas afectados por la dirección de los anillos de crecimiento .....	33
8. Relación entre la gravedad específica y el contenido de humedad en la madera .....	37
9. Acceso y ubicación geográfica de la finca Choval, Cobán, Alta Verapaz .....	54
10. Pieza de madera previa a ser demarcada para diferenciar la albura y el duramen .....	56

11. Preparación del Azul de Bromofenol para realizar la determinación de la albura y el duramen en las piezas de madera .....	56
12. Pieza de madera donde se observa la diferencia entre la albura y el duramen .....	57
13. Corte realizado en cada una de las rodajas para obtener las tablillas que se utilizaron para determinar la inclinación de la fibra.....	58
14. Tablillas obtenidas para la medición de la inclinación de la fibra .....	59
15. Medición de la inclinación de la fibra en las tablillas, utilizando la regla elaborada .....	60
16. Piezas para determinar la densidad .....	61
17. Determinación del volumen de las piezas de madera a través del método de desplazamiento.....	62
18. Determinación del peso de cada pieza utilizada para obtener la densidad de la madera .....	63
19. Piezas empleadas para la determinación de la densidad puestas al horno para secarlas.....	64
20. Preparación de la parafina empleada para recubrir las piezas de madera secas al horno para determinar el volumen por inmersión.....	65
21. Indicación de los puntos donde se tomaron los valores dimensionales de cada una de las superficies.....	66
22. Tipos de falla en flexión estática .....	68
23. Probeta sometida a la prueba de flexión estática .....	69
24. Tipos de fallas ocurridas en la prueba de compresión paralela a la fibra.....	70
25. Probeta sometida a carga en compresión paralela a la fibra .....	71
26. Probeta sometida a carga en compresión perpendicular a la fibra .....	72
27. Probeta empleada para la determinación de la dureza.....	73
28. Probeta empleada para la determinación del esfuerzo de corte .....	73
29. Probeta sometida a la prueba de retiro de clavos .....	75
30. Ubicación de las barras a extraer de cada troza a ser evaluada.....	77
31. Sección transversal de madera obtenida de cada árbol, que representa un bloque, utilizada para las pruebas realizadas en el laboratorio.....	79
32. Proporción de albura, duramen, médula y corteza, en el fuste de madera de raleo, a la altura de 0.20 m (altura del tocón) y a 2.00 m .....	82
33. Proporción de albura, duramen, médula y corteza, en el fuste de madera de corta final, a la altura de 0.20 m (altura del tocón) y a 2.00 m.....	83
34. Comportamiento del porcentaje de inclinación de la fibra, de la médula hacia la periferia del tronco, para los dos tipos de madera evaluados.....	85
35. Comportamiento de la densidad de la madera seca al aire, de la médula hacia la periferia del tronco, para los dos tipos de madera evaluados.....	87
36. Contracción dimensional en las superficies tangencial, radial, longitudinal y contracción volumétrica en madera de raleo y corta final .....	89
37. Dureza de la madera en estado verde, en sus superficies radial, tangencial y longitudinal, en madera de raleo y de corta final.....	92
38. Dureza de la madera en estado seco, en sus superficies radial, tangencial y longitudinal, en madera de raleo y de corta final .....	93
39. Comparación múltiple de medias de los estados de la madera de corta final en el análisis de la prueba de dureza .....	94

40.	Comparación múltiple de medias de las zonas de la madera de corta final del análisis de la prueba de dureza.....	95
41.	Comparación múltiple de medias en la interacción entre el estado y la zona del fuste de la madera de corta final para la prueba de dureza Janka .....	95
42.	Comparación múltiple de medias del estado de la madera de raleo para la prueba de dureza Janka .....	96
43.	Comparación múltiple de medias de la parte de la madera de raleo para la prueba de dureza .....	97
44.	Comparación múltiple de medias de la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo para la prueba de dureza .....	98
45.	Cargas máximas para la extracción de clavos en madera de raleo y corta final en estado verde, en sus superficies radial, tangencial y longitudinal .....	99
46.	Cargas máximas para la extracción de clavos en madera de raleo y corta final en estado seco .....	100
47.	Comparación múltiple de medias de los estados de la madera de corta final en el análisis de extracción de clavos .....	101
48.	Comparación múltiple de medias de la parte de la madera de corta final en el análisis de extracción de clavos .....	102
49.	Interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final en la prueba de extracción de clavos.....	103
50.	Comparación múltiple de medias de los estados de la madera de raleo en la prueba de extracción de clavos.....	104
51.	Comparación múltiple de medias de la parte de la madera de raleo en la prueba de extracción de clavos.....	104
52.	Interacción entre las medias del estado por la parte de la madera de raleo en la prueba de extracción de clavos.....	105
53.	Esfuerzo de corte en madera raleo y corta final en estado verde .....	106
54.	Esfuerzo de corte en madera raleo y corta final en estado seco .....	107
55.	Comparación múltiple de medias del estado de la madera de corta final para la prueba de esfuerzo de corte paralelo a la fibra .....	108
56.	Comparación múltiple de las medias de las partes de la madera de corta final para la prueba del esfuerzo de corte .....	109
57.	Interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final en la prueba de corte paralelo a la fibra.....	110
58.	Comparación múltiple de medias de los estados de la madera de raleo para la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra .....	110
59.	Comparación múltiple de medias de la parte de la madera de raleo para la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra .....	111
60.	Interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo para la prueba de corte paralelo a la fibra.....	112
61.	Módulo de ruptura de la prueba de flexión estática en madera raleo y corta final en estado verde .....	113
62.	Módulo de elasticidad de la prueba de flexión estática en madera raleo y corta final en estado verde .....	114
63.	Módulo de ruptura de la prueba de flexión estática en madera raleo y corta final en estado seca .....	115

64.	Módulo de elasticidad de la prueba de flexión estática en madera de raleo y corta final en estado seca.....	116
65.	Análisis del Módulo de Elasticidad MOE de la madera de corta final para la prueba de flexión estática según su estado .....	117
66.	Análisis de la parte de la madera de corta final para el Módulo de Elasticidad en la prueba de flexión estática .....	118
67.	Análisis de la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para el módulo de elasticidad en la prueba de flexión estática.....	119
68.	Análisis del Módulo de Elasticidad MOE según el estado de la madera de raleo para la prueba de flexión estática .....	120
69.	Análisis de la parte de la madera de raleo en el Módulo de Elasticidad para la prueba de flexión estática .....	120
70.	Análisis de la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en el Módulo de Elasticidad para la prueba de flexión estática.....	121
71.	Análisis del Módulo de Ruptura MOR según el estado de la madera de corta final para la prueba de flexión estática.....	122
72.	Análisis del Módulo de Ruptura MOR según la parte de la madera de corta final para la prueba de flexión estática.....	123
73.	Análisis del Módulo de Ruptura MOR según la interacción del estado por la parte de la madera de corta final para la prueba de flexión .....	123
74.	Análisis del Módulo de Ruptura MOR según el estado de la madera de raleo para la prueba de flexión estática .....	124
75.	Análisis del Módulo de Ruptura MOR según la parte de la madera de raleo para la prueba de flexión estática .....	125
76.	Análisis de la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en el Módulo de Ruptura para la prueba de flexión estática .....	125
77.	Esfuerzo de compresión de la prueba de compresión perpendicular a la fibra en madera de raleo y de corta final en estado verde .....	126
78.	Esfuerzo de compresión de la prueba de compresión perpendicular a la fibra en madera de raleo y de corta final en estado seco.....	128
79.	Comparación múltiple de medias del estado de la madera de corta final para la prueba de compresión perpendicular a la fibra .....	129
80.	Análisis de la parte de la madera de corta final para la prueba de compresión perpendicular a la fibra .....	130
81.	Interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para la prueba de compresión perpendicular a la fibra .....	130
82.	Análisis del estado de la madera de raleo para la prueba de compresión perpendicular a la fibra.....	131
83.	Análisis de la parte de la madera de raleo para la prueba de compresión perpendicular a la fibra.....	132
84.	Interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo para la prueba de compresión perpendicular a la fibra .....	132
85.	Esfuerzo de compresión de la prueba de compresión paralela a la fibra en madera de raleo y de corta final en estado verde .....	134
86.	Esfuerzo de compresión de la prueba de compresión paralela a la fibra en madera de raleo y de corta final en estado seco.....	135

87.	Análisis del estado de la madera de corta final para la prueba de compresión paralela a la fibra .....	136
88.	Análisis de la parte de la madera de corta final para la prueba de compresión paralela a la fibra .....	137
89.	Análisis de la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para la prueba de compresión paralela a la fibra.....	137
90.	Análisis del estado de la madera de raleo para la prueba de compresión paralela a la fibra.....	138
91.	Análisis de la parte de la madera de raleo para la prueba de compresión paralela a la fibra.....	139
92.	Interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo para la prueba de compresión paralela a la fibra .....	139

## LISTADO DE ACRONIMOS

ALSC	American Lumber Standard Committee
ASTM	American Society Test of Materials
CH	Contenido de Humedad
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
DAP	Diámetro a la Altura del Pecho
EL	Módulo de Elasticidad a lo largo del Eje Longitudinal
EMC	Equilibrium Moisture Content
ER	Módulo de Elasticidad a lo largo del Eje Radial
ET	Módulo de Elasticidad a lo largo del Eje Tangencial
GLR	Módulo de Corte para la deformación en el plano Longitudinal - Radial
GLT	Módulo de Corte para la deformación en el plano Longitudinal - Tangencial
GRT	Módulo de Corte para la deformación en el plano Radial - Tangencial
IARNA	Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente
INAB	Instituto Nacional de Bosques
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación
MOE	Módulo de Elasticidad
MOR	Módulo de Ruptura
PINFOR	Programa de Incentivos Forestales
PSF	Punto de Saturación de la Fibra
UNE	Una Norma Española
USDA	United States Department of Agriculture

# DETERMINACION DE PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DE LA MADERA DE *Pinus maximinoi* H. E. MOORE; COBAN, ALTA VERAPAZ

## RESUMEN

El objetivo del estudio fue determinar las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, empleando la norma ASTM D-143-94. La madera utilizada provino de la Finca Choval, municipio de Cobán, Alta Verapaz, de dos tratamientos silviculturales: segundo raleo y corta final, de 11y 30 años respectivamente. Las pruebas físicas se realizaron en el laboratorio del Campus “San Pedro Claver S. J.” y las pruebas mecánicas en el Laboratorio de Resistencia de Materiales del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle de Guatemala. El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar con parcelas divididas, con dos factores y cinco repeticiones. Las variables de respuesta fueron: proporción albura – duramen, porcentaje de inclinación de la fibra, densidad, contracción dimensional y volumétrica, esfuerzo de compresión paralela y perpendicular a la fibra, flexión estática, dureza, esfuerzo de corte y resistencia a la extracción de clavos. Según los resultados obtenidos en este estudio, se clasificó la madera de raleo y de corta final por sus propiedades físicas y mecánicas, proponiendo posibles usos para la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore. Se concluye que la madera proveniente del duramen y la albura no presentan el mismo comportamiento en sus propiedades en estado verde y en estado seco. Para obtener madera estructural se recomienda el desrame de los árboles, ya que de esta forma, se garantiza la ausencia de nudos en la madera aserrada, pues éstos disminuyen la resistencia de la madera a los esfuerzos aplicados.

# **DETERMINATION OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF *Pinus maximinoi* H. E. MOORE WOOD; COBAN, ALTA VERAPAZ**

## **SUMMARY**

The objective of this study was to determine the physical and mechanical properties of *Pinus maximinoi* H. E. Moore wood, using the ASTM D-143-94 standard. The wood was obtained from the Choval farm, municipality of Cobán, Alta Verapaz, from two silvicultural treatments: second thinning and final cutting, of 11 and 30 years, respectively. The physical tests were carried out in the lab of the “San Pedro Claver S. J.” campus and the mechanical tests in the Material’s Resistance Laboratory of the Civil Engineering Department of Universidad del Valle de Guatemala. A complete randomized block design with split plots, two factors and five replicates was used. The response variables were: sapwood proportion – heartwood, fiber inclination percentage, density, dimensional and volumetric contraction, parallel and perpendicular compression to the fiber, static flexion, hardness, cutting effort, and resistance to nail extraction. According to the results, the thinning and final cut wood was classified according to their physical and mechanical properties, proposing possible uses for *Pinus maximinoi* H. E. Moore wood. It is concluded that the wood derived from the heartwood and sapwood does not show the same behavior when it is green and dry. To obtain structural wood, it is recommended to remove the tree branches, so that knots will not be found in the sawn wood, because these reduce the wood’s resistance toward the efforts being carried out.

## I. INTRODUCCION

El *Pinus maximinoi* H. E. Moore, conocido también como pino candelillo, es una de las especies de coníferas prioritarias para el Instituto Nacional de Bosques (INAB) y desde que se lanzó el Programa de Incentivos Forestales (PINFOR) en 1997, hasta el año 2011 se habían establecido 18900 hectáreas de plantaciones forestales con fines comerciales con ésta especie (INAB, 2012), y además se continua con el manejo forestal de los bosques naturales.

Estas plantaciones y los bosques naturales proveen una gran cantidad de madera al mercado. Según el informe del Perfil Ambiental de Guatemala 2006 (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, IARNA, 2007), durante el período de 1999 a 2004, se tuvo un volumen de 3.4 millones de metros cúbicos (m<sup>3</sup>) de madera, de los cuales el 63% fue aprovechado por la industria forestal nacional, el 35% se utilizó como material para combustión (leña) y el resto fue para producir trocilla, carbón y otros productos. Según el informe, el 70% de la madera procesada provino de bosques naturales de coníferas, seguido por especies latifoliadas.

Una parte de la madera proveniente de plantaciones (madera joven) es comercializada para la elaboración de tarimas, cajas para tomate y camastrones, mientras que el resto de la madera es convertida en leña. La madera de bosque natural (madera madura) se utiliza para la fabricación de muebles, ebanistería y como material para construcción.

A pesar de la abundancia de la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore en el país, aún no se han determinado las propiedades físicas y mecánicas de ella. La falta de información es una limitante para el desarrollo de la madera como material estructural en el mercado local o nacional.

Los valores de las propiedades físicas y mecánicas de la madera es información importante para el diseño estructural en madera, ya que la madera tiene características propias que la diferencian de otros materiales de construcción como lo son el acero y el hormigón, en consecuencia el diseño, cálculo y construcción con madera, debe tener en cuenta sus particularidades.

Las propiedades generales, físicas y mecánicas, aún para una misma especie, tienen un amplio margen de variabilidad debido a las condiciones de crecimiento del árbol, relacionados con la latitud, calidad del suelo y características de clima. (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 1997).

Sobre *Pinus maximinoi* H. E. Moore se han realizado investigaciones dirigidas a la caracterización de su composición química, pero aún no se ha trabajado sobre sus propiedades físicas y mecánicas. Esta investigación está enfocada a la generación de información sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore empleando madera extraída de una plantación de 11 años y de una de 30 años, en estado verde y en estado seco, haciendo una diferenciación entre la madera de la albura y del duramen.

Se realizó una clasificación para la madera de raleo y de corta final en base a los resultados obtenidos en las pruebas, de acuerdo a clasificaciones propuestas por distintos investigadores. La información obtenida puede ser utilizada para que productores de madera de plantaciones y bosques naturales sean más competitivos en el sector forestal, al conocer el tipo de madera que comercializan.

La determinación de las propiedades físicas y mecánicas se realizó empleando la norma de la American Society Test of Materials (ASTM), específicamente con la norma ASTM D-143-94. Se realizó un análisis estadístico para determinar si existía alguna diferencia significativa entre la madera proveniente de la zona de la albura y del duramen, a dos clases de contenido de humedad (C. H.) en la madera, siendo madera verde (C. H. > 30 %) y madera seca al aire (C. H. aproximadamente a 12%).

El análisis de los resultados obtenidos se realizó a través de un análisis de varianza (Montgomery, D., 2004), empleando el programa estadístico InfoStat (Di Rienzo, Casanoves, Balzarini, González, Tablada & Robledo, 2010), demostrando diferencias significativas para la madera de raleo y de corta final entre los estados verde y seco y para la parte o sección del fuste (zona central y zona de la periferia).

## II. MARCO TEORICO

### 2.1 ANTECEDENTES

En lo referente a investigaciones realizadas sobre las propiedades de la madera, en el país han sido realizado varias de tipo preliminar, debido principalmente a los altos costos de las pruebas de laboratorio. A continuación se mencionan algunas de estas investigaciones.

Ramírez (2003), realizó una evaluación de las propiedades mecánicas de tres especies de madera latifoliada: Santa María, (*Callophylum brasilense*), San Juan (*Vochysia guatemalensis*) y Cola de Pava (*Cupania glabra*) enfocándose a la madera como material estructural. En sus resultados, obtuvo que la madera que presenta propiedades más adecuadas para un diseño estructural es la de Santa María (*Callophylum brasilense*), debido a que ésta madera tiene excelentes propiedades mecánicas, entre las cuales se destaca su dureza.

Además, Ramírez (2003), concluye que el hecho de tener una madera dura, no necesariamente quiere decir que tendrá un mercado amplio, y hace referencia en que las maderas más codiciadas tienen la peculiaridad de ser unas maderas sumamente estables y trabajables y no precisamente duras. El cedro y la caoba (200 kg. y 265 kg. de dureza respectivamente), por ejemplo, son maderas sumamente codiciadas, aunque su dureza y características estructurales no son precisamente buenas, tienen ventaja con su estabilidad y trabajabilidad.

En el caso de la madera del San Juan (*Vochysia guatemalensis*), la madera es más recomendable para el tallado de las vigas por su manejabilidad, estabilidad y leve dureza. Aunque no se considera una madera de propiedades estructurales aceptables, la recomienda para aplicaciones en el campo de la decoración y mueblería por su facilidad al trabajar. En el caso de la madera de Cola de Pava (*Cupania glabra*) fue clasificada como intermedia debido a que no es tan dura como la de Santa María (*Callophylum brasilense*), ni tan manejable como el San Juan (*Vochysia guatemalensis*), pero combina muy bien las ventajas de las dos (Ramírez, 2003).

Por su parte, Escobar (2005) realizó la caracterización química de la madera del primer raleo de pino caribe (*Pinus caribaea* Morelet var. *Hondurensis*) a nivel de laboratorio, proveniente de la finca Semuc 6, en El Estor, Izabal. Esta plantación tenía una edad de 6 años cuando se realizó el estudio. Las muestras fueron tomadas a tres tipos de alturas, siendo estas a la altura del pecho (1.20 m), altura comercial y la altura apical (altura total del árbol). De acuerdo con los resultados de la investigación, el autor demostró que no existe variación significativa de sus componentes químicos en función de la altura muestreada.

De igual forma, Escobar (2005), determinó que la celulosa es el componente químico más abundante de la madera del pino caribe en cualquier altura, ya que su concentración se encuentra entre 46% y 56 % en peso y no presentó variación significativa en función de la altura del árbol. La lignina es el segundo componente químico en abundancia y su concentración se encuentra entre 25 % y 30 %, sin haber presentado variación significativa en función de la altura.

González (2005), realizó la determinación de la composición química del pino ocote (*Pinus oocarpa* Schiede) procedente de una plantación en la finca Cucanjá, Tukurú, Alta Verapaz, donde determino la concentración de celulosa, lignina, sustancias extraíbles, taninos, cenizas y contenido de humedad, a distintas alturas del árbol, siendo estas: altura del pecho, altura comercial y altura apical.

Así mismo, el autor determinó que la celulosa no presentaba diferencia significativa en los porcentajes de rendimiento a diferentes alturas al igual que no existió diferencia significativa en los porcentajes de rendimiento de lignina a diferentes alturas. En lo referente a los componentes extraíbles si existió diferencia significativa entre los porcentajes de rendimiento a diferentes alturas, siendo el promedio de 10.89% que se encuentra por encima del rango establecido, infiriendo en que dicha variación se deba a que el pino ocote es una especie forestal rica en resinas.

Rodríguez (2005), realizó una determinación de los componentes químicos de la madera de pino blanco (*Pinus pseudostrobus* Lindl) proveniente de la finca Las Victorias, Patzún, Chimaltenango en una plantación forestal de 6 años de edad. En esta investigación, se determinaron cinco componentes químicos de la madera de Pino Blanco (*Pinus pseudostrobus* Lindl) siendo éstos: Celulosa, Lignina, Sustancias Extraíbles (ceras, resinas, gomas, aceites, alcaloides, grasas, azúcares entre otros), Taninos Puros y Sustancias Inorgánicas o Cenizas.

Las muestras analizadas fueron tomadas a tres distintas alturas: a la altura del pecho (1.20 m), altura comercial y altura total. Entre los resultados más importantes obtenidos por Rodríguez, (2005), se determinó que la celulosa no presentó variación significativa en función de la altura del árbol, siendo el componente químico que se encuentra en mayor cantidad ya que figura entre 50% y 55%, lo que indica que es posible encontrarla en forma abundante en cualquier altura.

La lignina presentó una relación inversamente proporcional a la altura y es el segundo componente químico más abundante que se encuentra en la madera de pino. Está presente en un rango de 28% a 30%. La lignina por ser componente estructural de la madera y dar resistencia a la misma, se encuentra en mayor cantidad en la parte más baja del árbol o troza (1.20 m) ya que en promedio se registró un 30.33% para la misma, mientras que a la altura de punta presenta un 28%. (Rodríguez, 2005).

Domínguez (2006), realizó un análisis comparativo de la influencia del método de secado en las propiedades físicas y mecánicas del pino colorado (*Pinus oocarpa* Schiede), enfocando su investigación a la madera estructural. En esta investigación determinó que la selección del método de secado depende no sólo de las características y propiedades de la madera, sino, también, de la aplicación destinada que se desee dar a la madera.

Se comprobó de acuerdo con Domínguez (2006), que la disminución del contenido de humedad de la madera mejora sus características físicas y propiedades mecánicas, si

el procedimiento se desarrolla inadecuadamente se producen defectos que afectan estas propiedades. Los resultados experimentales señalaron que el proceso de secado en horno es más efectivo que el efectuado al aire libre, mejorando las características físicas y propiedades mecánicas del material. Sin embargo, el proceso de secado al aire libre es el más difundido en el medio.

Rivas y Joachin (2006), realizaron una investigación de tipo preliminar para determinar las características físicas y propiedades mecánicas de cuatro especies de madera latifoliada provenientes del departamento del Petén, dentro de una concesión forestal que le fue otorgada a la Sociedad Civil Árbol Verde en la unidad de Manejo “Las Ventanas”. En esta investigación se realizaron pruebas de características físicas y propiedades mecánicas en las especies latifoliadas Santa María (*Calophyllum brasiliense camb*), Manchiche (*Lonchocarpus castilloi*), Danto (*Vatairea lundellii*) y Malerio Colorado (*Aspidosperma megalocarpon*), donde los resultados obtenidos reflejaban ciertos usos para cada especie en particular.

Las pruebas realizadas por Rivas y Joachin (2006) a las especies muestreadas fueron: flexión estática; compresión paralela y perpendicular a la fibra; dureza radial, tangencial y longitudinal; corte paralelo a la fibra; clivaje; tensión paralela y perpendicular a la fibra; peso específico; contracción volumétrica y porcentaje de contenido de humedad. En base a su densidad, clasificaron la madera de Santa María (*Calophyllum brasiliense camb*) como madera pesada; la del Manchiche (*Lonchocarpus castilloi*) como extremadamente pesada, la de Danto (*Vatairea lundellii*) como pesada y la de Malerio Colorado (*Aspidosperma megalocarpon*) como extremadamente pesada.

Otro estudio importante, fue realizado por Fonseca (2006), que investigó la composición química del pino candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore) en la finca Río Frío, Tactic, Alta Verapaz, donde determino la concentración de celulosa, lignina, sustancias extraíbles, taninos, cenizas y contenido de humedad, a distintas alturas, siendo estas la altura del pecho (1.20 m), altura comercial y altura total, donde determino que las sustancias estudiadas no varían significativamente en función de la altura en que se

extrae la muestra, y que la celulosa es el componente químico más abundante de la madera a cualquier altura, ya que su concentración se encontró entre 46% y 59 % en peso.

Ortiz (2010), realizó una caracterización y evaluación de la madera de diámetros menores de *Pinus maximinoi* H. E. Moore para la fabricación de secciones compuestas como elemento de construcción. En su trabajo, determinó que es posible insertar un núcleo de una altura equivalente a 1/3 del peralte total de la viga sin que el uso de madera juvenil dentro de un compuesto de madera juvenil-madera madura afecte la resistencia global a la flexión. Esta relación de 1 a 3 con respecto al peralte induce una relación de 1 a 3 también con respecto a los esfuerzos.

A nivel internacional, desde el año 2000, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés) empezó a realizar investigaciones técnicas en los bosques en los Estados Unidos, debido a que éstos contienen una cantidad significativa de árboles de diámetros pequeños el cual se ha convertido en material subutilizado.

Este sobreabastecimiento además de aumentar el riesgo de ataques de insectos, de enfermedades, riesgo al ataque por fuego, y daños causados por sequía en las cuencas, conlleva también una costosa remoción de esta masa. Los usos alternativos y comerciables encontrados para diámetros pequeños y material del subutilizados aliviarían estos problemas mientras se mejora el estado y calidad de las cuencas hidrológicas.

Un programa de investigación extenso en el Laboratorio de Productos de Bosque del USDA, (2000), se enfoca en buscar los usos alternativos y comerciables para el material proveniente de diámetros pequeños.

Dentro de estos proyectos en diámetros menores se pueden mencionar los siguientes: aserrado de la madera empleando la tecnología de conservación a través de la mejor

apertura de cara BOF (Best opening face technology), estudios sobre la calidad de pulpa de madera, estudios de uso estructural, propiedades mecánicas de trozas empleadas para la elaboración de cabañas, estudios financieros de negocios en vías de desarrollo por usar el material de diámetros pequeños, entre otros. (United States Department of Agriculture, 2000).

Reyes, Valero y Garayse (2003), realizaron un estudio preliminar de las propiedades físicas de la especie *Azadirachta indica* (Neem), proveniente de plantaciones del estado Falcón (Venezuela) con el fin de conocer las cualidades tecnológicas de la misma. Esta especie fue introducida en Venezuela aproximadamente en el año de 1997, con fines ornamentales.

Las propiedades físicas evaluadas por Reyes, et al (2003) fueron: Densidad verde (D.V.), densidad seca al aire (D.S.A.), densidad seca al horno (D.S.H.), peso específico básico (P.E.B.), contenido de humedad (C.H.), contracción radial (C.R.), contracción tangencial (C.T.), contracción longitudinal (C.L.), y contracción volumétrica (C.V.).

En base a los resultados de la densidad seca al aire ( $0,8056 \text{ g/cm}^3$ ), la madera de la especie *Azadirachta indica* (Neem) se consideró como una madera de densidad media e infirieron que debe ser adecuada para la elaboración de mangos de herramientas, estructuras livianas, cajas, postes, gabinetes, tallados, ebanistería, muebles, entrepaños, tabaquería, entre otras. A pesar de los resultados de las propiedades físicas obtenidos, Reyes, et al.(2003), recomendaban, para ratificar y confirmar sus usos, la determinación de las propiedades mecánicas para conocer los niveles de resistencia a los cuales pueden ser sometida dicha especie y tener una mayor precisión en la asignación de usos.

Por otra parte, Hernández (2005) realizó una investigación en *Pinus ponderosa* en árboles de diámetros menores, donde determinó que las propiedades de la madera están en función del diámetro y de la edad del árbol. Así mismo, que el alto contenido

de madera juvenil es el factor que más influye en las deformaciones de la madera. La edad aproximada del bosque era de 35 años.

El estudio elaborado por Hernández (2005) se centró en la evaluación de vigas de madera encolada laminada (glulam) hechas completamente de madera de pino ponderosa aprovechada de una fuente de pequeños diámetros. El objetivo primario era desarrollar una eficiente combinación de láminas encoladas utilizando el pino ponderosa para todas las laminaciones. Las propiedades aceptables fueron calculadas de los resultados de la prueba para el módulo de elasticidad (MOE), la fuerza de flexión aceptable, la fuerza de tensión aceptable paralela a la fibra, y la fuerza de corte aceptable.

La madera de pino ponderosa fue cortada de árboles de diámetros pequeños aprovechados del Bosque Nacional Apache Sitgreaves en Arizona oriental. La madera se clasificó inicialmente como madera estándar y madera muy buena, fue secada al horno, y pulida en cuatro lados. Inicialmente, las 7,972 piezas de madera se procesaron a través de una prueba continua de madera y clasificada en cuatro clases de calidad. La madera también fue graduada visualmente para determinar si satisfacía los criterios para laminaciones (contracción y torcimiento) y entonces se ordenó dentro de una clasificación borde - nudo de 1/4 - o 1/2. (Hernández, 2005).

Hernández, (2005) determinó que el factor primario determinante de la calidad para esta madera, más que los nudos, es la reducción del secado, causado por las deformaciones. Una causa mayor de torcimiento en el pino ponderosa es la madera juvenil, la cual puede constituirse aproximadamente en los primeros 20 a 25 años de crecimiento del árbol. El pino ponderosa es moderadamente tolerante a la sombra; crece rápidamente hasta que cierran los doseles superiores. Debido a esta característica de crecimiento, una considerable porción de una troza de pino de ponderosa consiste en madera juvenil. La presencia de madera juvenil crea un desafío en su utilización.

La investigación de Hernández (2005) demostró que las propiedades que decrecen mientras menos madera joven exista son el ángulo de inclinación de la fibra, el contenido de humedad y la contracción longitudinal, mientras que las propiedades que aumentan con menor contenido de madera joven son la gravedad específica, la longitud de la fibra, la dureza, el contenido de madera madura, la densidad de las paredes celulares y la contracción transversal. Determinó que la madera es factible para el desarrollo de madera valuada de grado E, teniendo valores promedio del Módulo de Elasticidad (MOE) de  $1.0$  y  $1.4 \times 10^6$  lb/in<sup>2</sup>.

Como se aprecia, las investigaciones realizadas a nivel nacional no han sido suficientes en el área técnica de la madera. La determinación de propiedades físicas y mecánicas de madera proveniente de plantaciones y de raleos no ha sido desarrollada, pudiendo probablemente, desaprovecharse esta madera en aplicaciones industriales donde puede ser utilizada. La información técnica sobre propiedades físicas y mecánicas de la madera ha sido desarrollada a nivel internacional, en diferentes condiciones, tanto climáticas, edáficas como de crecimiento, por lo que no puede adaptarse para nuestra región.

## **2.2 ANATOMIA DE LA MADERA**

### **2.2.1 Estructura macroscópica**

Acuña y Casado (2005), consideran como madera a los troncos, raíces y ramas de los árboles y arbustos desprovistos de su corteza, incluyéndose entre ellos a las coníferas, latifoliadas, así como a las palmeras y herbáceas arborescentes (especies monocotiledóneas).

La madera no es, en sí, un material homogéneo, de estructura uniforme, sino un conjunto de células muy dispares que en el vegetal vivo deben cumplir tres funciones: la conducción de savia, la transformación de productos así como el almacenamiento de sustancias de reserva, y el sostenimiento del vegetal.

Kollmann (1959), indica que para cada una de estas funciones vitales existen determinados tipos de células con propiedades específicas. No obstante, hay profundas diferencias entre las distintas clases de madera, que se hacen perceptibles al observarlas con un aumento adecuado, y que, incluso dentro de ciertos límites, destacan a simple vista.

Para tener una idea exacta de la estructura de la madera debe considerarse la forma del tronco del árbol, que aproximadamente es inscriptible en un cono o en un paraboloides. Acuña y Casado (2005), sugieren que un trozo cualquiera de fuste se asemeja bastante a un tronco de cono, al cual se supone cortado por tres planos ortogonales entre sí, mostrados en la figura 1, de la forma siguiente: el transversal, o sea normal al eje del tronco; radial, determinado por el eje del tronco y un diámetro, y tangencial, paralelo al eje del tronco y que pase por una de las cuerdas de la circunferencia del fuste.



Figura 1. Secciones o planos de la estructura de la madera. (Adaptado de: Acuña y Casado, 2005).

Acuña y Casado (2005), indican que al examinar la sección producida por un plano transversal en el tronco de una conífera o de una latifoliada, se observan en la figura 2, de afuera hacia adentro, las siguientes capas:

- Corteza externa o corteza propiamente dicha.
- Corteza interna o líber.

- Cambium, capa delgada de células vivas generadora del crecimiento en espesor del árbol.
- Estructura leñosa que rellena la mayor parte del tronco; y
- Cordón medular que discurre por su interior.

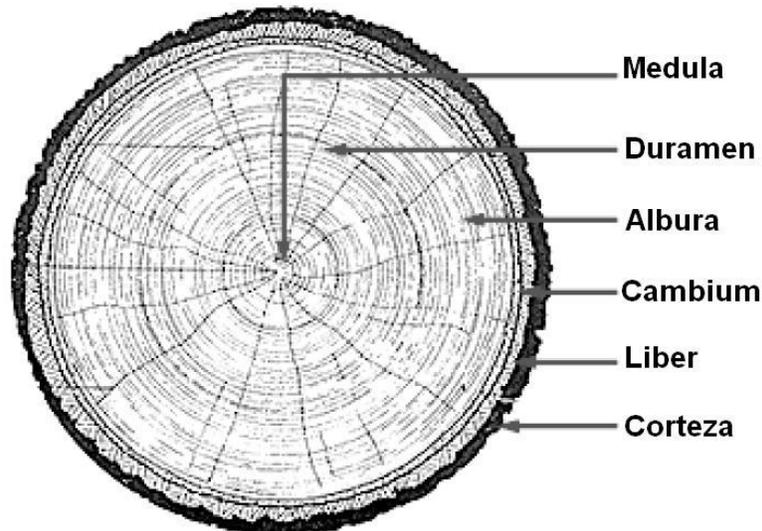


Figura 2. Elementos de la macroestructura de la madera normalmente visibles sin aumento. (Acuña y Casado, 2005).

### 2.2.2 Madera de albura y madera de duramen

La albura y el duramen son dos zonas fisiológicamente diferentes en la madera del árbol vivo. Durante la duraminización ocurren numerosos cambios en la madera. Giménez, Ríos y Moglia (2000) indican que en determinadas industrias se descarta la porción de albura debido a su menor durabilidad, por lo que es sumamente importante cuantificar la albura en el volumen total de madera producida.

Kollmann (1959) indica que la albura se localiza entre el cambium y el duramen. La albura contiene células vivas y células muertas y su función primaria es el almacenamiento de alimentos; en las capas exteriores cercanas al cambium, la albura se ocupa del transporte del agua o savia. La albura puede variar en el espesor y número de anillos de crecimiento. La albura normalmente va de 4 a 6 centímetros en el espesor radial.

En ciertas especies, la albura contiene pocos anillos de crecimiento y normalmente no excede de 1 centímetro en el espesor. Los arces, nogales americanos, algunos tipos de pinos del sur y los pinos ponderosa de América del Norte y especies como *Prioria copafeira*, *Guibourtia ehie*, y *Hymenaea courbarilde* de origen tropical pueden tener albura de 8 a 15 centímetros o más en el espesor, sobre todo en los árboles de segundo crecimiento. Como una regla, los árboles con crecimiento más vigoroso tienen la albura más ancha. Muchos árboles de segundo crecimiento de tamaño comerciable consisten principalmente de albura. (Forest Products Laboratory, 1999).

La albura conduce gran cantidad de agua y de sales en solución, de la raíz a las hojas; provee rigidez al tallo y sirve de reservorio de sustancias de almacenaje. Giménez, et al., (2000) señalan que en determinados usos industriales se descarta esta porción del fuste, por ser menos resistente que el duramen.

El duramen es leño biológicamente inactivo, con funciones de sostén, que ocupa la porción del tronco entre la médula y la albura, generalmente es de estructura más compacta y de coloración más oscura que la albura. IAWA (1964), citado por Giménez, et al., (2000), lo define como las capas internas de la madera, sin células vivas y en el cuál el material de reserva (almidón), ha sido removido o transformado en sustancias del duramen.

El Forest Products Laboratory (1999), indica que el duramen consiste en células inactivas que no funcionan en conducción de agua o almacenamiento de alimentos. La transición de la albura al duramen se acompaña por un aumento en contenidos extractivos. Frecuentemente, estos extractivos oscurecen el duramen y dan a especies como el nogal negro y cerezo su color característico. El coloreado suave del duramen ocurre en las especies norteamericanas como los abetos (excepto Sitka spruce), abetos, los verdaderos abetos, tilos americanos, chopos, y en las especies tropicales como la ceiba (*Ceiba pentandra*), *Triplochiton scleroxylon*, y *Gonystylus bancanus*.

En algunas especies, como la secoya (*Sequoia sempervirens* D. Don Endl), los extractivos del duramen hacen a la madera resistente a hongos o al ataque de insectos. Todo el duramen oscuro no es resistente a deteriorarse, y algunas partes cercanas al duramen descoloridas son resistentes al deterioro. Sin embargo, ninguna de las alburas de cualquier especie es resistente a deteriorarse.

Los extractivos de duramen también pueden afectar a la madera reduciendo su permeabilidad, haciendo el duramen más lento de secar y más difícil para impregnar con preservantes químicos, produce un incremento en la estabilidad en los cambios en las condiciones del contenido de humedad, y existe un incremento en el peso (ligeramente). Sin embargo, en los cambios de la albura al duramen, ninguna célula se agrega o se quita, ni cualquier célula cambia su forma. La solidez básica de la madera no es afectada esencialmente por la transición de las células de la albura a las células del duramen. (Forest Products Laboratory, 1999).

En algunas especies, como nogales americanos, y ciertos robles, los poros (los vasos) se tapan a una magnitud mayor o menor, efecto conocido como tílosis. El duramen en que los poros se tapan herméticamente por la tílosis, como en el roble blanco, es conveniente para la tonelería firme, porque las tílides previenen el pasaje de líquido a través de los poros. Las tílides también hacen la impregnación de la madera con los preservantes líquidos más difícil. (Forest Products Laboratory, 1999).

### **2.2.3 Determinación de la proporción de albura y duramen**

Inicialmente, el tronco de los árboles jóvenes de cualquier especie se compone totalmente de albura. Sin embargo, a medida que su diámetro aumenta, la madera de la parte central se distancia de la corteza y sufre modificaciones fisiológicas, transformándose finalmente en duramen. Este proceso va acompañado por cambios en la naturaleza de las sustancias químicas que pueden ser extraídas de la madera.

En algunos casos, esas transformaciones oscurecen el color de las capas centrales del tronco, formando lo que se llama duramen diferenciado. Kollman (1959), indica que en

muchas maderas el duramen contiene sustancias solubles en agua, entre ellas hidratos de carbono y polisacáridos, alcaloides y taninos, que, al oxidarse, le dan su característico color oscuro. Ello ocurre, por ejemplo, en el cedro y en el roble.

Giordano (1981), indica que en otras especies la diferencia de color entre albura y duramen es menos acusada, como por ejemplo, en los pinos, pero sigue siendo visible. Finalmente existen especies, como en los chopos, en las que no hay diferencia aparente.

Desde el punto de vista tecnológico hay diferencias importantes entre albura y duramen, principalmente en lo que se refiere a su resistencia natural a las pudriciones y a su permeabilidad. En general, el duramen es más resistente a la pudrición, debido a que las sustancias extractivas que lo impregnan son más tóxicas para los hongos. (Giordano, 1981).

En cambio, la permeabilidad suele ser mayor en la albura, lo que permite impregnarla con antisépticos, alcanzando retenciones más altas. Por todo ello es conveniente poder distinguir albura y duramen, e incluso las zonas que están en fase de duraminización y que alternan con las de albura. (Infomadera, s. f. a)

Para estudios de crecimiento y propiedades de la madera de una determinada especie, el conocer la proporción de albura y duramen es de mucha utilidad; es por ello que se desarrolló un método práctico y sencillo, denominado colorimétrico, el cual ha sido utilizado con éxito para demarcar dichos tejidos en melina (*Gmelina arborea* Roxb), cuya diferencia entre albura y duramen no es visible a simple vista. (Zeledón, 2005).

En el caso de la madera en rollo no seca, el procedimiento para distinguir albura y duramen puede basarse en la diferencia de permeabilidad, aplicando el método desarrollado para la madera de chopo, el cual consiste en pasar por la sección transversal del tronco la llama de un mechero Bunsen. La madera del duramen se seca superficialmente, mientras que la de la albura se mantiene húmeda. Esto se produce

probablemente porque el duramen, cuya permeabilidad es menor no puede conducir el agua con suficiente rapidez hasta la superficie para compensar la desecación producida por la llama (Giordano, 1981).

Para madera seca es preciso utilizar reactivos que colorean de distinto modo la albura y el duramen. Su acción se basa en el distinto pH del contenido celular en ambas zonas de la madera. En el Cuadro 1 se indican los distintos colores producidos por dos reactivos empleados con esta finalidad.

Cuadro1. Colores característicos producidos por los reactivos verde de bromocresol y azul de bromofenol en la madera de albura y duramen de algunas especies.

CONIFERAS	Verde de bromocresol		Azul de bromofenol	
	Albura	Duramen	Albura	Duramen
Pinabete	Verde	Azul	Marrón	Azul
Alerce	Verde	Amarillo/Marrón	-	-
Pino silvestre	-	-	Rojo	Amarillo
Pino piñonero	Verde	Amarillo	Amarillo	Azul
Pino pinaster	-	-	Verde	Amarillo
Pino carrasco	-	-	Verde	Amarillo
Pino de Oregón	-	-	Verde	Naranja
Tsuga	-	-	Verde	Amarillo
FRONDOSAS				
Chopo	Verde	Azul	Verde	Azul
Castaño	-	-	Verde	Amarillo
Roble	-	-	Azul	Amarillo/naranja
Eucalipto	Verde	Amarillo	Violeta	Amarillo

(Infomadera, s. f. a)

Con verde de bromocresol en disolución alcohólica se ha podido diferenciar fácilmente la albura y el duramen en madera de roble (*Quercus robar*), cuya identificación visual no resulta sencilla. El reactivo debe aplicarse sobre una superficie seca y lisa. (Infomadera, s. f. a).

#### 2.2.4 Macroestructura

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).

Madera o xilema, es el componente de las secciones internas del tronco. Las funciones primarias de la madera son las de soporte y conducción y almacenamiento de nutrientes. La madera puede ser dividida en dos clases generales: La albura y el duramen. La albura se localiza cercana al cambium (Kollman, 1959).

Acuña y Casado (2005), indican que la albura funciona principalmente en el almacenamiento de nutrientes y el transporte mecánico de savia. El espesor radial de la albura es normalmente de 35 a 50 mm pero puede ser de 75 a 150 mm para algunas especies. El duramen consiste en un núcleo interno de células de madera que han cambiado, químicamente y físicamente, de las células de la albura exterior.

Las cavidades celulares del duramen también pueden contener depósitos de varios materiales que frecuentemente le dan un color más oscuro al duramen. Depósitos extractivos formados a menudo durante la conversión de la albura viviente al duramen inerte, hacen que el duramen de algunas especies sea más durable en condiciones que pueden inducir a la pudrición. (Acuña y Casado, 2005).

El cambium es un anillo continuo de tejido reproductor localizado entre la albura y la capa interna de la corteza. Normalmente es de un ancho de 1 a 10 células dependiendo de la estación. Todas las células de la madera y la corteza se alinean o apilan radialmente porque cada célula en una línea radial ha sido originada de la misma célula cambial (Winandy, 1994).

### **2.2.5 Anillos de crecimiento**

Según indica Kollmann (1959), los anillos anuales que presentan en una sección transversal del fuste las capas de madera engendradas por el crecimiento de cada año, son originados por el tejido celular que proviene del cambium, situado entre la parte exterior del tronco y produce, año tras año, el engrosamiento del árbol.

Acuña y Casado (2005), indican que los anillos de crecimiento pueden clasificarse en: anuales, característicos de las plantas que crecen en la zona boreal y estacionales, característicos de las plantas que crecen en la zona tropical con estaciones climáticas marcadas.

Dentro de cada anillo de crecimiento se distingue, más o menos fácilmente: la madera formada en primavera (llamada madera de primavera en el caso de los anillos anuales, y de primer crecimiento en los anillos estacionales), la madera formada en verano (madera de verano en los anillos anuales, y tardía en los estacionales). (Acuña y Casado, 2005)

De acuerdo con Winandy (1994), los anillos formados durante las estaciones cortas o secas son más delgados que aquéllos formados cuando las condiciones de crecimiento son más favorables. También, los anillos formados en las condiciones sombrías son normalmente más delgados que aquéllos formados por las mismas especies en las condiciones soleadas.

Según el Forest Products Laboratory (1999), se cree que la edad de un árbol puede determinarse contando estos anillos. Sin embargo, esto puede llevar a errores porque las condiciones medioambientales anormales pueden causar que un árbol produzca múltiples anillos de incremento o impedir el crecimiento completamente para un periodo.

### **2.2.6 Nudos**

Record (2004), indica que los nudos son porciones de ramas incluidas en la madera del tallo o ramas más grandes. Las ramas los originan en principio, del eje central de un

tallo, y con el aumento viviente en el tamaño por la suma de capas leñosas anuales que son una continuación del tallo. La porción incluida es irregularmente cónica.

Durante el desarrollo de un árbol la mayoría de las ramas, sobre todo las más bajas, se mueren, pero persisten a menudo durante un tiempo más. Las capas subsecuentes de crecimiento del tallo no están ligadas íntimamente con la rama muerta, pero cubren alrededor de ella. Luego las ramas muertas producen nudos que son nada más que tarugos en un agujero, y probablemente caerán fuera después de que el árbol se ha aserrado. En la clasificación de la madera estructural, los nudos son clasificados según su forma, tamaño, entereza, y la firmeza con que ellos están colocados en un punto (Vignote y Martínez, 2006).

Kollmann (1959), indica que los nudos son defectos de la madera que se presentan normalmente, de los que resultan serios inconvenientes para su empleo. Estos defectos debilitan la madera y hacen que pierda su valor para propósitos estructurales donde la fuerza es una consideración importante. El efecto de debilitación es mucho más serio donde la madera está sujeta a flexión y tensión que donde está a compresión. Hasta qué punto los nudos afectan que la fuerza de una viga depende de su posición, el tamaño, el número y la dirección de la fibra. Un nudo en el lado superior está comprimido, mientras que uno en el lado inferior está sujeto a tensión (Record, 2004).

### **2.2.7 Radios leñosos**

Acuña y Casado (2005), indican que los radios leñosos están constituidos por células dispuestas en dirección radial, perpendicular al eje del árbol, y realizan una función de trabazón de las fibras longitudinales. Tienen importancia en las propiedades de la madera, como elemento de identificación y como responsables, en parte, de las propiedades de contracción de la madera.

### **2.2.8 Madera juvenil**

De acuerdo con el Forest Products Laboratory,(1999), la madera juvenil es la madera producida cerca de la médula del árbol; para maderas blandas, se define normalmente

como el material de los 5 a 20 anillos desde la médula dependiendo de las especies. Esta madera juvenil tiene propiedades físicas y anatómicas considerablemente diferentes a las de la madera madura (Figura 3).

Vignote y Martínez (2006), indican que en la madera limpia, las características que se han encontrado que influyen en las propiedades mecánicas, incluyen el ángulo de inclinación de la fibra, la longitud de la celda, y la gravedad específica, la última es una composición del porcentaje de madera madura, espesor de la pared celular, y diámetro del lumen.

La madera juvenil tiene un alto ángulo de inclinación de la fibra (el ángulo entre el eje longitudinal de celda de la madera y la fibrilla celulosa) el cual causa encogimiento longitudinal que puede ser más de 10 veces el de la madera madura. La madera de compresión y la fibra espiral también son más prevalentes en la madera juvenil que en la madera madura y contribuye al encogimiento longitudinal. (Acuña y Casado, 2005).

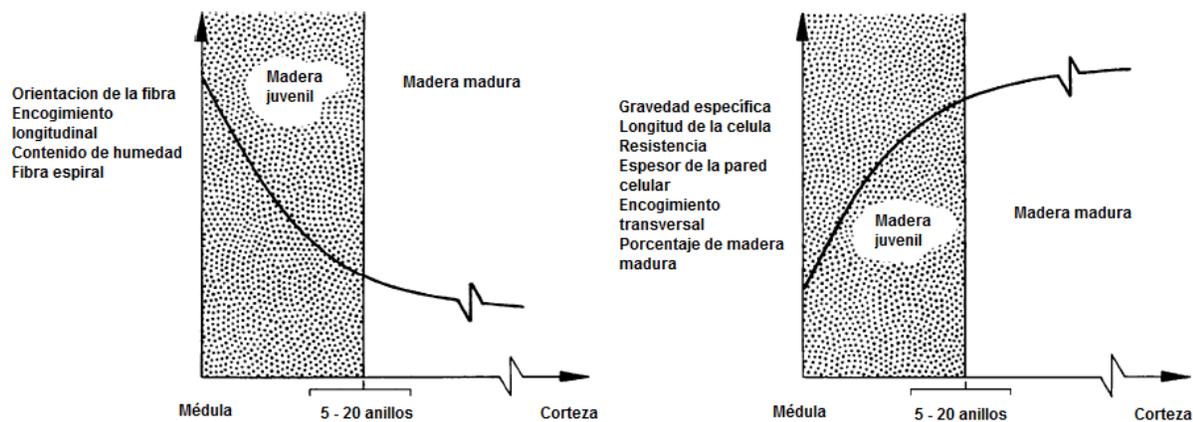


Figura 3. Comportamiento de las propiedades de la madera juvenil.(Forest Products Laboratory. 1999).

En la madera estructural, la relación del módulo de ruptura, última fuerza de tensión, y del módulo de elasticidad para rangos de madera juvenil a madura van de 0.5 a 0.9, 0.5 a 0.95, y 0.45 a 0.75, respectivamente. Los cambios en la fuerza de corte resultantes de los aumentos en el contenido de madera juvenil pueden ser adecuadamente predecidos

por el control en los cambios en la densidad exclusiva para todas las orientaciones de los anillos anuales. Lo mismo, es cierto para la fuerza de compresión perpendicular a la fibra cuando la carga es aplicada en la dirección tangencial. (Forest Products Laboratory, 1999).

El Forest Products Laboratory (1999), indica que la fuerza de compresión perpendicular a la fibra para cargas aplicadas en la dirección radial, sin embargo, es más sensible a los cambios en la madera juvenil contenida y puede ser arriba de ocho veces menos de lo pensado por los cambios en la densidad exclusivamente.

Vignote y Martínez (2006), indican que la relación de madera juvenil y madera madura es inferior para más altos grados de madera que para grados inferiores, lo cual indica que la madera juvenil tiene mayor influencia en la reducción de las propiedades mecánicas de la madera estructural de grado elevado. Sólo una cantidad limitada de investigaciones se han hecho en madera juvenil en las especies de madera dura.

### **2.2.9 Madera de reacción**

Cuando el árbol se encuentra sometido a exigencias que predominan en una dirección (debidos por ejemplo a la pendiente del terreno o a un viento dominante), responde formando lo que se denomina madera de reacción. En las coníferas se produce madera de compresión, mientras que las frondosas desarrollan madera de tracción en las zonas más traccionadas. La madera de tracción no tiene gran importancia desde el punto de vista de su utilización estructural, pero la madera de compresión si presenta ciertos problemas. (Acuña y Casado, 2005).

Winandy (1994), indica que la madera de reacción es la respuesta de un árbol a tensiones medioambientales o físicas anormales asociadas con los árboles inclinados y ramas torcidas. Generalmente se cree que es debida al esfuerzo del árbol para regresar al tronco o ramas a una posición más natural. La madera de reacción se llama madera de compresión y resulta de la producción de células de madera rica en lignina fenólica y pobres en hidratos de carbono.

Esta madera de reacción, según Winandy (1994), se encuentra en el lado más bajo de la rama o tronco inclinado y efectivamente los resultados son una pared celular más alta en densidad sometida a una fuerza de compresión alta. Muchas de las propiedades anatómicas, químicas, físicas, y mecánicas de la madera de reacción difieren distintamente de aquéllas de madera normal. La gravedad específica de la madera de compresión frecuentemente es de 30 a 40% mayor que la de la madera normal, pero la fuerza tensora es muchas veces baja. Esto es por qué todas las reglas de clasificación restringen a la madera de compresión en cualquier forma de madera blanda y vigas.

### 2.2.10 Desviación de la fibra

La norma española UNE 56544(2006), define como desviación de la fibra a su desviación media respecto del eje horizontal de la pieza. Esta desviación se medirá sobre 1 m de longitud en la zona más desfavorable. En caso de duda, la desviación de la fibra se puede determinar mediante el empleo de un trazador. La desviación de la fibra se expresa como el cociente entre la desviación de la fibra y la longitud (en dirección del eje de la pieza) sobre la que se ha efectuado la medida. (Figura 4)

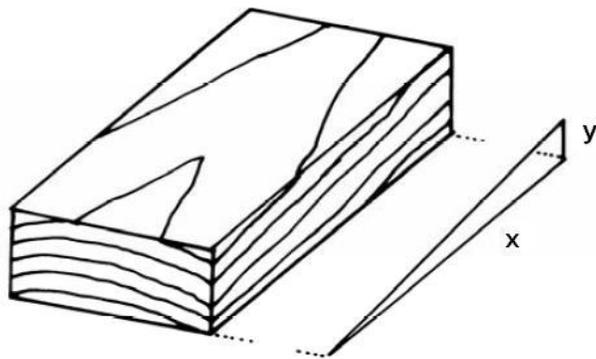


Figura 4. Medición de la desviación la fibra de la madera:  $y/x$ . (UNE 56544, 2006).

Vignote y Martínez (2006), proponen una clasificación para la madera según el valor de la desviación de la fibra según el Cuadro 2.

Cuadro 2. Clasificación de las tablas por la inclinación de la fibra

Clasificación	Sección radial	Sección tangencial
Poco inclinadas	< 6.25 %	<10%
Inclinadas	De 6.25 a 12.5%	De 10 a 12.5%
Muy inclinadas	> 12.5%	> 12.5%

(Vignote y Martínez, 2006)

## 2.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA

Winandy (1994), señala que las propiedades físicas son las características cuantitativas de la madera y su comportamiento a las influencias externas con fuerzas aplicadas. Se incluyen las propiedades direccionales; el contenido de humedad; estabilidad dimensional; propiedades térmicas, eléctricas y químicas; la densidad y la resistencia a la pudrición.

La familiaridad con las propiedades físicas es importante porque ellas pueden influir significativamente en el desempeño y solidez de la madera usada en aplicaciones estructurales. (Winandy, 1994)

### 2.3.1 Propiedades direccionales

La madera es un material anisotrópico, Winandy (1994), indica que debido a la orientación de las fibras de la madera y la manera en la cual un árbol aumenta en diámetro según su crecimiento, las propiedades varían a lo largo de tres ejes respectivamente perpendiculares: longitudinal, radial y tangencial. Obsérvense estos ejes en la figura 5.

Según indican Acuña y Casado (2005), el eje longitudinal es paralelo a la dirección de la fibra (el grano), el eje radial es perpendicular a la dirección de grano y normal a los anillos de crecimiento y el eje tangencial es perpendicular a la dirección de grano y tangente a los anillos de crecimiento.

Aun cuando muchas de las propiedades de la madera difieren en cada una de estas tres direcciones del eje, Winandy (1994), indica que las diferencias entre los ejes

radiales y tangenciales son relativamente menores cuando se comparan las diferencias entre el eje radial o tangencial y el eje longitudinal.

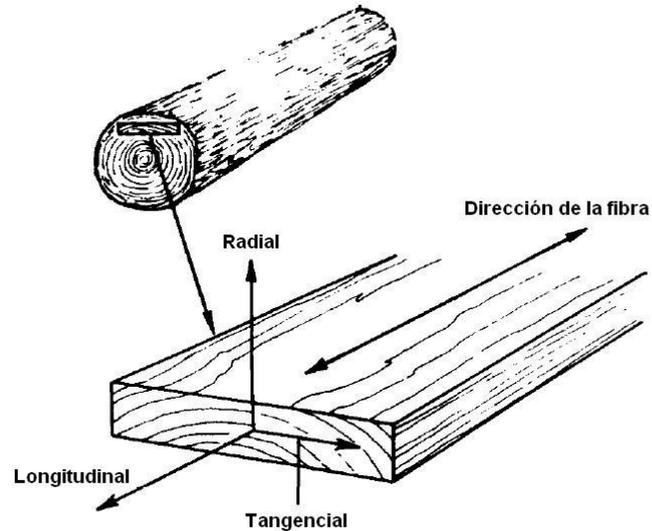


Figura 5. Ejes principales de la madera con respecto a la dirección de la fibra y a los anillos de crecimiento. (Winandy, 1994).

### 2.3.2 Contenido de humedad de la madera

De acuerdo con Acuña y Casado (2005), la madera es un material higroscópico, entendiendo por tal aquel que tiene la capacidad de absorber agua de la atmósfera. Según indican, esta capacidad la presenta debido a dos razones fundamentales:

- a. La atracción que ejercen los grupos polares existentes en la pared celular de la madera sobre aquellas moléculas, de naturaleza polar o polarizables, que entran en su órbita de acción, en particular el agua.
- b. Debido al efecto de los fenómenos físicos de capilaridad.

Kollman (1959) indica que el agua es el vehículo de transporte que utilizan las plantas para su desarrollo fisiológico, esto unido a la higroscopicidad de la madera, hace que ésta tenga normalmente en su interior cierta cantidad de agua, que, tradicionalmente, se establece que puede presentarse de tres formas diferentes, las cuales son:

Agua de constitución o agua combinada: Es aquella que entra a formar parte de los compuestos químicos que constituyen la madera. Forma parte integrante de la materia leñosa (de su propia estructura), y no se puede eliminar si no es destruyendo al propio material (por ejemplo, quemándola) (Gálvez, 2011).

Agua de impregnación o de saturación: Es la que impregna la pared de las células rellenando los espacios submicroscópicos y microscópicos de la misma. Se introduce dentro de la pared celular, siendo la causa de la contracción de la madera cuando la pierde (desorción) y de su hinchazón cuando la recupera (sorción: retención de agua). Se puede eliminar por calentamiento hasta 100 - 110° C (Forest Products Laboratory, 1999).

Agua libre: Calderón (s. f.) indica que es el agua que se encuentra llenando las cavidades, es la que llena el lumen de las células o tubos (vasos, traqueídas, etc.) Es absorbida por los fenómenos de capilaridad. El agua libre, una vez eliminada durante los procesos de secado, ya no puede ser recuperada a partir de la humedad atmosférica, para hacerlo deberá conseguirse por inmersión directa en agua.

El agua libre no tiene más repercusión que la ocupación física de los huecos, y por consiguiente no influye en la hinchazón o merma de la madera ni en las propiedades mecánicas; siendo el agua de impregnación, que corresponde a los rangos de humedad menores o iguales al punto de saturación de la pared celular, la responsable de dichos fenómenos. (Acuña y Casado, 2005).

El contenido de humedad de la madera se define como el peso del agua en la madera expresada como una fracción, normalmente un porcentaje, del peso de madera secada al horno. El peso, encogimiento, fuerza, y otras propiedades dependen del contenido de humedad de la madera. En los árboles, el volumen de humedad puede ir de aproximadamente 30% a más de 200% del peso de sustancia de madera. (Forest Products Laboratory. 1999).

En maderas blandas, el contenido de humedad de la albura es normalmente mayor que el del duramen. En maderas duras, la diferencia en el contenido de humedad entre el duramen y la albura depende de las especies. El promedio del contenido de humedad de duramen y albura de algunas especies en Estados Unidos colectados por el Forest Products Laboratory, (1999), se muestra en el Cuadro 3.

Estos valores son considerados típicos, pero hay variación considerable dentro y entre los árboles. La variabilidad del contenido de humedad incluso existe dentro de tablas individuales cortadas del mismo árbol. (Forest Products Laboratory, 1999).

Cuadro3. Contenido de humedad promedio de madera verde de algunas especies en los Estados Unidos.

Especies	Contenido de humedad (%)		Especies	Contenido de humedad (%)	
	Duramen	Albura		Duramen	Albura
Maderas duras			Maderas blandas		
Aliso rojo	-	97	Pino ponderosa	40	148
Haya americano	55	72	Abeto negro	52	113
Roble negro	76	75	Abeto Douglas	37	115
Nogal	69	52	Cedro amarillo	32	166
Olmo americano	95	92	Alerce americano	49	-

(Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, 1999)

### 2.3.3 Madera verde y el punto de saturación de la fibra

La madera verde se define a menudo como madera recién cortada en la que las paredes celulares están completamente saturadas con agua; sin embargo, la madera verde normalmente contiene agua adicional en los lúmenes. El contenido de humedad al que los lúmenes celulares y las paredes celulares están completamente saturados con agua, es el contenido máximo de humedad posible. (Forest Products Laboratory, 1999).

La gravedad específica es el más grande determinante del contenido máximo de humedad. El volumen del lumen disminuye así como la gravedad específica aumenta, el máximo contenido de humedad también disminuye como la gravedad específica aumente, porque hay menos espacio disponible para el agua libre. Según Simpson

(1998), el contenido máximo de humedad  $M$  para cualquier gravedad específica es dado por la siguiente expresión:

$$M_{\max} = 100(1.54 - G_b) / 1.54G_b$$

donde  $G_b$  es la gravedad específica básica (basada en el peso seco al horno y el volumen verde) y 1.54 es la gravedad específica de las paredes celulares de la madera. El contenido máximo posible del contenido de humedad varía desde 267% a una gravedad específica de 0.30 a 44% a una gravedad específica de 0.90 (Forest Products Laboratory, 1999)

El Forest Products Laboratory (1999), indica que el máximo contenido de humedad posible, es raramente obtenido en los árboles. Sin embargo, el contenido de humedad verde puede ser realmente elevado en algunas especies naturalmente o a través de sumergirlas. El contenido de humedad al cual la madera se hundirá en el agua está dado por la siguiente expresión:

$$M_{\text{sink}} = 100(1 - G_b) / G_b$$

Calderón (s. f.), indica que el punto de saturación de la fibra, es el porcentaje de agua en el cual se ha desalojado toda el agua libre y comienza a evaporarse el agua que satura las paredes celulares. Según la especie forestal considerada, este valor oscila entre el 25 y el 40%. Su determinación presenta gran interés, pues a partir de ese instante comienzan las contracciones de la madera, e indica condiciones especiales de la madera en lo relativo a la resistencia mecánica.

En concepto, distingue entre las dos maneras en que el agua es retenida en la madera. De hecho, es posible para todos los lúmenes celulares estar vacíos y tener parcialmente secas las paredes celulares en una parte de una pieza de madera, mientras en otra parte de la misma la pieza, las paredes celulares pueden estar saturadas y los lúmenes parcial o completamente llenos con agua. Incluso es probable

que una pared celular empiece a secar antes de toda el agua haya abandonado el lumen de esa misma célula (Forest Products Laboratory. 1999)

Díaz (2005), indica que el punto de saturación de la fibra promedio de la madera es aproximadamente 30% contenido de humedad, pero en especies particulares y piezas individuales de madera puede variar por varios puntos del porcentaje de ese valor, así mismo, que el punto de saturación de fibra también es considerado a menudo como el contenido de humedad debajo del cual las propiedades físicas y mecánicas de la madera empiezan cambiar como una función del contenido de humedad.

Durante el secado, las partes exteriores de una tabla pueden tener menos de la saturación de fibra, mientras que las partes internas todavía son mayores que la saturación de fibra (Acuña y Casado, 2005).

#### **2.3.4 El contenido de humedad en equilibrio**

El contenido de humedad de madera debajo del punto de saturación de la fibra es una función de la humedad relativa y la temperatura del aire circundante. (Acuña y Casado, 2005).

Simpson (1998), define el contenido de humedad de equilibrio EMC (Equilibrium Moisture Content), como ese contenido de humedad al cual la madera no gana y tampoco pierde humedad; una condición de equilibrio se ha alcanzado. La relación entre EMC, la humedad relativa, y temperatura se muestra en el Cuadro19 en la sección de Anexos.

Para la mayoría de los propósitos prácticos, pueden aplicarse los valores en el Cuadro 19 para madera de cualquier especie. Los datos en el Cuadro19 pueden ser aproximados por la expresión propuesta por Simpson (1998):

$$EMC = \frac{1,800}{W} \left[ \frac{Kh}{1 - Kh} + \frac{K_1Kh + 2K_1K_2K^2h^2}{1 + K_1Kh + K_1K_2K^2h^2} \right]$$

donde  $T$  es la temperatura,  $h$  es la humedad relativa (%/100),  $EMC$  es el contenido de humedad (%) y  $W$ ,  $K$ ,  $K_1$  y  $K_2$  son coeficientes de un modelo de adsorción desarrollado por Hailwood y Horrobin (1946), citados por Simpson (1998).

Simpson (1998), indica que para la temperatura  $T$  en grados Celsius, puede ser aproximada por la expresión:

$$\begin{aligned}W &= 349 + 1.29T + 0.0135T^2 \\K &= 0.805 + 0.000736T - 0.00000373T^2 \\K_1 &= 6.27 - 0.00938T - 0.000303T^2 \\K_2 &= 1.91 + 0.0407T - 0.000293T^2\end{aligned}$$

Así mismo, para temperatura en grados Fahrenheit, Simpson (1998), indica que puede ser aproximada por la expresión:

$$\begin{aligned}W &= 330 + 0.452T + 0.00415T^2 \\K &= 0.791 + 0.000463T - 0.000000844T^2 \\K_1 &= 6.34 + 0.000775T - 0.0000935T^2 \\K_2 &= 1.09 + 0.0284T - 0.0000904T^2\end{aligned}$$

La madera en servicio se expone a ambos cambios, a largo plazo (estacional) y a corto plazo (diariamente) en la humedad relativa y temperatura del aire circundante. De este modo, la madera siempre está sometida por lo menos a los cambios ligeros en el contenido de humedad. (Forest Products Laboratory, 1999).

Estos cambios normalmente son graduales, y a corto plazo las fluctuaciones tienden a influir sólo en la superficie de la madera. Los cambios en el contenido de humedad pueden ser retardados, pero no impedidos, por revestimientos protectores, como el barniz, laca, o pintura. El objetivo del secado de la madera es llevar la madera cerca

del contenido de humedad de un producto acabado que tendrá en servicio (Simpson, 1998).

### **2.3.5 Sorción en la madera**

La madera completamente seca, puesta en contacto con vapor de agua, la admitirá hasta que se produzca entre ambos un estado de equilibrio. Este fenómeno, generalmente extendido a todos los cuerpos porosos, se denomina sorción. La cantidad de vapor admitido (en especial vapor de agua) esta, para los diferentes cuerpos, en íntima relación con sus propiedades físicas y químicas. (Forest Products Laboratory, 1999).

Kollmann (1959), indica que existe toda una serie de circunstancias que pueden actuar sobre la sorción. En primer lugar, puede desarrollarse una reacción química entre las moléculas del gas (vapor de agua) y el cuerpo sólido, que puede limitarse a las capas exteriores del cuerpo o extenderse, por el contrario, a toda su masa; esta sorción química viene determinada por las fuerzas de atracción molecular.

De acuerdo con Vignote y Martínez (2006), también puede considerarse el gas o vapor solamente en las proximidades de la superficie exterior del sólido, sin que al hacerlo se origine ninguna acción química recíproca; este es el caso denominado adsorción.

La absorción, es decir la retención del gas o vapor en el interior del cuerpo (por tanto dentro de su masa, y no en su superficie, como en la adsorción) no tiene importancia, generalmente en los sólidos, y puede prescindirse de ella en las consideraciones aplicadas a la madera; por último, si se trata de vapor de agua, puede producirse una condensación en las estrechas cavidades del cuerpo poroso, y el líquido sigue entonces las leyes de la física capilar, denominándose a este fenómeno condensación capilar. (Kollmann, 1959).

### 2.3.6 Histéresis de sorción

Según el Forest Products Laboratory (1999), la cantidad de agua adsorbida de una condición seca al equilibrio con cualquier humedad relativa siempre es menor que la cantidad retenida en el proceso de secado de una condición más húmeda al equilibrio con esa misma humedad relativa. La relación de adsorción EMC (Contenido de humedad en equilibrio, por sus siglas en inglés Equilibrium Moisture Content) a desorción EMC es constante en aproximadamente 0.85. Además, la EMC en la desorción inicial (es decir, de la condición verde original del árbol) siempre es mayor que en cualquier desorción subsiguiente.

Se derivaron datos del Cuadro 19 de la sección de Anexos, por el Forest Products Laboratory, (1999), principalmente bajo condiciones descritas como oscilación de desorción, el cual se cree que representa una condición media entre la adsorción y desorción y un arreglo conveniente y práctico para el uso cuando la dirección de sorción no siempre es conocida. La curva de histéresis se muestra en la figura 6.

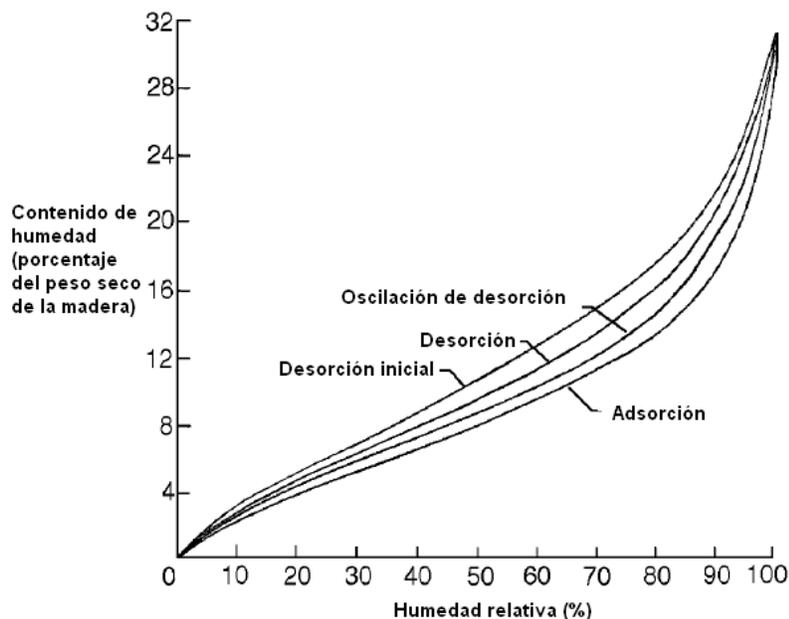


Figura 6. Relación contenido de humedad – humedad relativa, para madera bajo varias condiciones de adsorción y desorción. (Forest Products Laboratory, 1999).

### **2.3.7 Encogimiento de la madera**

La madera es dimensionalmente estable cuando el contenido de humedad es mayor que el punto de saturación de la fibra. La madera cambia de dimensión así como gana o pierde humedad debajo de ese punto. Se encoge cuando pierde humedad de las paredes celulares y se hincha al ganar humedad en las paredes celulares. (Winandy, 1994)

El Forest Products Laboratory (1999), indica que este encogimiento e hinchazón pueden causar torcimientos, agrietamientos, hendiduras, y aflojamiento de asas de herramienta, huecos en tiras de piso, o problemas de función que disminuyen de la utilidad del producto de madera.

Por consiguiente, es importante que estos fenómenos se entiendan y sean considerados cuando ellos pueden afectar un producto proveniente de la madera. Con respecto a las características de encogimiento, Winandy (1994), indica que la madera es un material anisotrópico, el cual se encoge la mayoría de las veces en la dirección de los anillos anuales de crecimiento (tangencialmente), sobre medio tanto a través de los anillos (radialmente), y sólo ligeramente a lo largo del grano (longitudinalmente).

El Forest Products Laboratory (1999), indica que los efectos combinados de encogimiento radial y tangencial pueden torcer la forma de las piezas de madera debido a la diferencia en el encogimiento y la curvatura de anillos anuales. Se ilustran los mayores tipos de distorsión como resultado de estos efectos en la figura 7.

### **2.3.8 Encogimiento transversal y volumétrico**

El Forest Products Laboratory (1999), ha reunido datos para representar el promedio del encogimiento radial, tangencial, y volumétrico de numerosas especies nacionales obtenidos por los métodos descritos por la ASTM, a través del Método D143-94 Norma de prueba de muestras pequeñas de madera limpia.

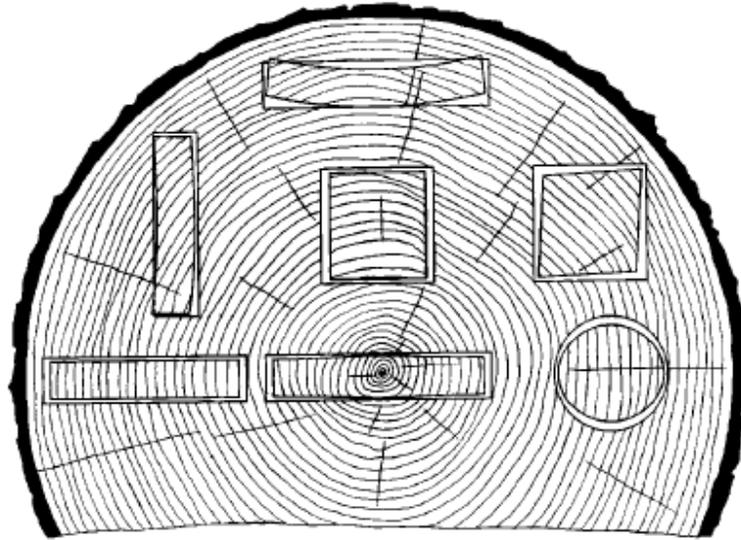


Figura 7. Encogimiento característico y distorsión del corte paralelo, cuadrado, y piezas redondas afectados por la dirección de los anillos de crecimiento. El encogimiento tangencial es alrededor de dos veces más grande que el radial. (Forest Products Laboratory, 1999).

Según indica el Forest Products Laboratory (1999), el encogimiento de la madera es afectado por varias variables. En general, el encogimiento mayor es asociado con la densidad mayor. El tamaño y forma de una pieza de madera pueden afectar el encogimiento, y la proporción de secado para algunas especies puede afectar el encogimiento.

De acuerdo con Rietz (1978), el encogimiento de la madera varía con las especies y con la orientación de la fibra en las superficies tangencial, radial o longitudinal. La variabilidad del encogimiento transversal y volumétrico puede ser expresada por un coeficiente de variación de aproximadamente 15%, según lo expresa Winandy (1994).

Los valores de encogimiento reunidos por el Forest Products Laboratory (1999), para algunas especies nacionales en los Estados Unidos, expresados como un porcentaje de la dimensión verde, se listan en el Cuadro 20 de la sección de Anexos. También se listan algunos valores de encogimiento reunidos de la literatura mundial para algunas especies importadas en los Estados Unidos seleccionadas en el Cuadro 21 de la sección de Anexos.

Según Pérez (1983), en la mayoría de las especies la contracción radial es sólo un 50% del valor de la contracción tangencial. Como un promedio de todas las especies, indica que la contracción en las tres direcciones principales (tangencial, radial y longitudinal) tiene una razón de 100:50:1 aproximadamente.

Además, existe una relación entre los coeficientes de contracción en dirección tangencial y radial ( $R_{T/R}$ ). Cuánto más coincidentes sean las contracciones radial y tangencial, menos tensiones se producen en la madera y más estabilidad tendrá (Pérez, 1983).

Vignote y Martínez (2006), indican que las maderas con relación entre coeficientes  $R_{T/R} > 2$  presentan elevada tendencia a deformación, lo que dificulta su uso en la elaboración de muebles y carpintería. Gutiérrez y Silva (1999), clasifican las maderas según su relación entre coeficientes ( $R_{T/R}$ ) en el Cuadro 4.

Cuadro4. Clasificación de la madera según su relación de estabilidad  $R_{T/R}$

Relación de contracción	Tipo de contracción
< 1.50	Muy baja o muy estable
1.50 – 2.00	Baja o estable
2.01 – 2.50	Mediana o moderadamente estable
2.51 – 3.00	Alta o inestable
> 3.00	Muy alta o muy inestable

(Gutiérrez y Silva, 1999).

Pérez (1983), clasifica las maderas en base a la contracción volumétrica total, según el Cuadro 5.

Cuadro 5. Clasificación de la madera según su contracción volumétrica

Clase	Contracción Volumétrica (%)	Tipo de comparación
Gran contracción	15.1 a 20	Madera en trozos con grandes grietas de secado, que deberán aserrarse antes del secado
Contracción mediana	10.1 a 15	Madera en trozos con grietas medianas, pudiendo ser conservada en trozos para estivación de minas y postes
Pequeña contracción	5 a 10	Madera en trozos con pequeñas grietas que se pueden secar antes de su aserrado o elaboración.

(Pérez, 1983).

### 2.3.9 El peso, densidad, y la gravedad específica

Dos factores primarios afectan el peso de los productos de la madera: La densidad de la estructura básica de la madera y el contenido de humedad. Un tercer factor, minerales y sustancias extraíbles, sólo tienen un marcado efecto en un número limitado de especies (Winandy, 1994).

La densidad de la madera, exclusiva del agua, varía grandemente dentro de y entre las especies. Aunque la densidad de la mayoría de las especies disminuye entre aproximadamente 320 y 720 kg/m<sup>3</sup> (20 y 45 lb/ft<sup>3</sup>), el rango de densidad realmente se extiende desde aproximadamente 160 kg/m<sup>3</sup> (10 lb/ft<sup>3</sup>) para balsa a más de 1,040 kg/m<sup>3</sup> (65 lb/ft<sup>3</sup>) para algunas otras maderas importados. (Forest Products Laboratory. 1999).

Según el Forest Products Laboratory (1999), un coeficiente de variación de aproximadamente 10% es considerado conveniente para describir la variabilidad de densidad dentro de las especies nacionales comunes.

De acuerdo con McMillen y Wengert (1978), la madera es usada en una gama amplia de condiciones y tiene un amplio rango de contenido de humedad en uso. La humedad constituye parte del peso de cada producto en uso; por consiguiente, la densidad debe

reflejar este hecho. Esto ha producido que la densidad de la madera a menudo haya sido determinada y reportada en base al contenido de humedad en uso.

El Forest Products Laboratory (1999), indica que la densidad calculada de la madera, incluso el agua contenida en la madera, es normalmente basada en las características promedio de las especies. Este valor siempre debe ser considerado una aproximación debido a la variación natural en la anatomía, contenido de humedad, y la proporción de duramen y albura que ocurre.

No obstante, esta determinación de densidad normalmente es suficientemente exacta para permitir la utilización apropiada de productos de madera donde el peso es importante. Tales aplicaciones van desde la estimación de cargas estructurales al cálculo de pesos de envío aproximados. Para regularizar comparaciones de especies o productos y estimaciones de peso del producto, se usa la gravedad específica como una base de referencia normal, en lugar de la densidad. (Forest Products Laboratory 1999).

Según Vignote y Martínez (2006), la definición tradicional de gravedad específica es la proporción de la densidad de la madera a la densidad de agua en una temperatura de referencia especificada (a menudo 4.4°C (40°F)) donde la densidad del agua es 1.0000 g/cm<sup>3</sup>). Para reducir la confusión introducida por la variable del contenido de humedad, la gravedad específica de madera está normalmente basada en el peso seco al horno y el volumen de algunos contenidos de humedad especificados.

Según el Forest Products Laboratory (1999), las bases normalmente usadas para determinar la gravedad específica son el peso seco al horno y el volumen (a) verde, (b) seco al horno, y (c) al 12% de contenido de humedad. El peso seco al horno y el volumen verde se usan a menudo en las bases de datos para caracterizar la gravedad específica de especies que están referidas a la gravedad específica básica.

Se puede apreciar la relación entre la gravedad específica y el contenido de humedad en la madera en la figura 8.

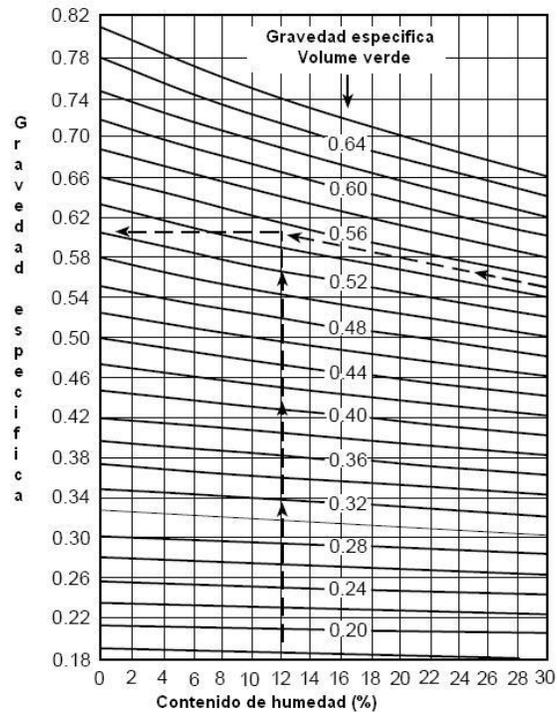


Figura 8. Relación entre la gravedad específica y el contenido de humedad en la madera. (Forest Products Laboratory, 1999).

Según Vignote y Martínez (2006), se pueden clasificar las maderas por su densidad, según el Cuadro 6:

Cuadro 6. Clasificación de la madera por su densidad

Tipo de densidad	Densidad en $\text{kg/m}^3$	Densidad en $\text{g/cm}^3$
Ligeras	< de 500	< de 0.500
Semiligeras	De 500 a 599	De 0.500 a 0.599
Semipesadas	De 600 a 649	De 0.600 a 0.649
Pesadas	De 650 a 799	De 0.650 a 0.799
Muy pesadas	> de 800	> de 0.800

(Vignote y Martínez, 2006).

## 2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Muchos materiales cuando están en servicio están sujetos a fuerzas o cargas. En tales condiciones es necesario conocer las características del material para diseñar el

instrumento donde va a usarse de tal forma que los esfuerzos a los que vaya a estar sometido no sean excesivos y el material no se fracture. (García, s. f.). El comportamiento mecánico de un material es el reflejo de la relación entre su respuesta o deformación ante una fuerza o carga aplicada.

#### **2.4.1 Propiedades mecánicas de la madera**

Las propiedades mecánicas son las características de un material en respuesta a las fuerzas aplicadas externamente. De acuerdo con Spavento, Keil y Monteoliva (2008), las propiedades mecánicas de la madera son aquellas que definen la aptitud y capacidad para resistir cargas externas, excluyendo los esfuerzos debidos a las tensiones internas producto de los cambios de humedad.

Los valores de las propiedades mecánicas son dados en términos de esfuerzos (fuerza por unidad de área) y deformación (deformación que es el resultado del esfuerzo aplicado). Los valores de las propiedades mecánicas de la madera se obtienen de las pruebas de laboratorio hechas con madera limpia (sin defectos naturales que reducirían la fuerza, como los nudos, las grietas, las rajaduras, etc.). (Winandy, 1994)

La orientación de las fibras que componen la madera da lugar a la anisotropía de su estructura, por lo que al definir sus propiedades mecánicas hay que distinguir siempre entre la dirección perpendicular y la dirección paralela a la fibra. (Infomadera, s. f. b). En este hecho radica la principal diferencia de comportamiento frente a otros materiales utilizados en estructuras como el acero y el hormigón. Las resistencias y módulos de elasticidad en la dirección paralela a la fibra son mucho más elevados que en la dirección perpendicular.

#### **2.4.2 Propiedades elásticas**

De acuerdo con el Forest Products Laboratory (1999), las propiedades elásticas se refieren a la resistencia de un material a la deformación bajo un esfuerzo aplicado y su capacidad de recobrar sus dimensiones originales cuando el esfuerzo es removido. Para un material con las propiedades elásticas ideales cargado debajo del límite

proporcional (elástico), toda deformación es recuperable y el cuerpo devuelve a su forma original cuando el esfuerzo es removido.

La madera no es idealmente elástica ya que alguna deformación por la carga no se recupera inmediatamente cuando la carga es removida; sin embargo, las deformaciones residuales son generalmente recuperables durante un período de tiempo. Aunque técnicamente es considerada un material visco elástico, normalmente se asume que la madera se comporta como un material elástico para más aplicaciones de la ingeniería. (Winandy, 1994).

#### **2.4.2.1 Módulo de elasticidad**

Expresa la relación existente entre la carga y la deformación dentro del límite de proporcionalidad. Según indica Díaz (2005), el módulo de elasticidad, es una medida de rigidez de un material. Es aquella propiedad de la materia que le permite resistir una fuerza que tiende a cambiar su forma o volumen y que es responsable de la recuperación de su forma o volumen original cuando dicha fuerza deja de actuar.

Según el Forest Products Laboratory (1999), la elasticidad implica que las deformaciones producidas por la fuerza aplicada son completamente recuperables después de que las cargas son retiradas. Cuando se carga a los niveles de tensión más altos, la deformación plástica o la rotura ocurren. Los tres módulos de elasticidad que se denotan por EL, ER, y ET respectivamente, son los módulos elásticos a lo largo de los ejes longitudinales, radiales, y tangenciales de la madera.

Estos módulos normalmente se obtienen de las pruebas de compresión; sin embargo, los datos para ER y ET no son extensos. Existen valores promedio de ER y ET para las muestras de unas especies como las proporciones con la EL. Las proporciones elásticas, así como las propias constantes elásticas, varían dentro de y entre las especies y con el contenido de humedad y la gravedad específica (Forest Products Laboratory, 1999).

#### **2.4.2.2 Módulo de corte**

El módulo de corte relaciona el esfuerzo de corte con la deformación del corte. Se denotan los tres módulos de corte para madera GLR, GLT, y GRT para el longitudinal radial, longitudinal tangencial, y radial longitudinal, respectivamente. Por ejemplo, GLR es el módulo de rigidez basado en la deformación de corte en el plano longitudinal-radial y el esfuerzo de corte en los planos longitudinal-tangencial y radial-tangencial. (Winandy, 1994).

#### **2.4.3 Propiedades de esfuerzo**

Las propiedades de esfuerzo significan la última resistencia de un material a las cargas aplicadas. Con la madera, la fuerza varía significativamente dependiendo de la especie, las condiciones de carga, duración de la carga, y varios factores medioambientales. De acuerdo con Díaz (2005), carga es toda fuerza externa que es aplicada sobre una estructura. Las fuerzas que resisten a las cargas son fuerzas internas que se desarrollan en un cuerpo y son denominadas tensiones internas. A la tensión interna referida a una unidad de área resistente en una sección transversal de un cuerpo se le denomina esfuerzo unitario.

Spavento, et al. (2008), indican que debido a que la madera es anisotrópica, las propiedades mecánicas también varían en los tres ejes principales. Los valores de las propiedades referidas al eje longitudinal son generalmente significativamente más altos que aquéllos en los ejes tangenciales o radiales.

Las propiedades de esfuerzos en el eje longitudinal normalmente son llamadas las propiedades paralelas al grano. Para propósitos de ingeniería, la diferenciación entre paralelo y perpendicular al grano es suficiente porque las direcciones tangenciales y radiales son aleatorizadas por el proceso de aserrado primario (conversión de trozas a tablas). (Winandy, 1994).

### **2.4.3.1 Compresión**

Díaz (2005), indica que se distinguen dos tipos de fuerzas de compresión según el sentido en el que actúe la aplicación de una fuerza, siendo estos, compresión paralela y compresión perpendicular a la fibra.

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, del orden de 15 a 17 veces superior.

De acuerdo con Díaz (2005), la compresión perpendicular, ocurre cuando la fuerza externa es aplicada 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.

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).

La compresión aplicada en un ángulo al grano produce tensiones que actúan paralela y perpendicularmente al grano. La fuerza a cualquier ángulo intermedio es el intermedio a los valores de compresión paralela y perpendicular al grano (Winandy, 1994).

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 del Cuadro 7.

Cuadro 7. Clasificación de la madera de acuerdo al esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra

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

(Rivero, 2004. Citado por Spavento, et al., 2008)

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 el Cuadro 8.

Cuadro 8. Clasificación de la madera de acuerdo al esfuerzo de compresión paralela a la fibra

Esfuerzo de compresión en kg/cm <sup>2</sup>	Clasificación
< 200	Muy bajo
201 - 300	Bajo
301 - 400	Medio
401 - 500	Alto
> 500	Muy alto

(Rivero, 2004. Citado por Spavento, et al., 2008)

#### 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. 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).

Acuña y Casado, (2005) indican que las Influencias que afectan a 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.

Rivero (2004), citado por Spavento, et al., (2008) propone una clasificación para la madera según el ensayo de flexión estática para los valores del Módulo de Ruptura MOR y Módulo de Elasticidad MOE. Esta clasificación es presentada en el Cuadro 9, sus valores son expresados en  $\text{kg/cm}^2$ .

Cuadro 9. Clasificación de la madera según los valores de flexión estática.

MOR	MOE	Clasificación
< 500	< 100000	Muy bajo
500 - 950	101000 - 120000	Bajo
951 - 1220	121000 - 150000	Medio
1221 - 1750	151000 - 200000	Alto
> 1750	> 200000	Muy alto

(Rivero, 2004. Citado por Spavento, et al., 2008)

### 2.4.3.3 El corte

Cuando es usada como una viga, la madera se expone a esfuerzos de compresión en una superficie de la viga y a un esfuerzo en el otro. Esta oposición de esfuerzos resulta en una acción de corte a través de la sección de la viga. La acción de corte paralelo al grano es llamada corte horizontal. Spavento et al. (2008), indican que es la capacidad que tiene la madera de resistir fuerzas que tienden a causar el deslizamiento de una sección sobre otra adyacente a la anterior.

Recíprocamente, cuando el esfuerzo es aplicado perpendicular a la longitud de la celda en un plano paralelo al grano, esta acción es llamada corte rodante. Los esfuerzos del corte rodante producen una tendencia para las células de la madera para rodar entre sí. En general, los valores del esfuerzo de corte rodante para las muestras de madera limpia promedian de 18 a 28% de los valores del corte paralelo al grano. (Winandy, 1994).

Rivero (2004), citado por Spavento, et al. (2008) propone la clasificación de la resistencia madera según el esfuerzo de corte. Esta clasificación está representada en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Clasificación de la resistencia de la madera según el esfuerzo de corte.

Esfuerzo de corte en $\text{kg/cm}^2$	Clasificación
< 40	Muy bajo
40 – 85	Bajo
86 – 120	Medio
121 – 175	Alto
> 175	Muy alto

(Rivero, 2004. Citado por Spavento, et al., 2008).

### 2.4.3.4 La dureza

La dureza representa la resistencia de la madera al hundimiento y destrucción. La dureza es comparativamente mediada por la fuerza requerida para empotrar una bola de 11.3 mm de diámetro en la madera. (Winandy, 1994).

Spavento et al. (2008), indican que la dureza determina la resistencia que ofrece la madera a la penetración de cuerpos de mayor solidez y consistencia. Es una característica que depende de la cohesión de las fibras y de su estructura. Se manifiesta en la dificultad que pone la madera de ser penetrada por otros cuerpos (clavos, tornillos, etc.) o a ser trabajada (cepillo, sierra, formón).

Según Acuña y Casado (2005), la dureza depende de la especie, de la zona del tronco, de la edad. En general suele coincidir que las más duras son las más pesadas. El duramen es más duro que la albura. Las maderas verdes son más blandas que las secas. Las maderas fibrosas son más duras. Las maderas más ricas en vasos son más blandas. Las maderas más duras se pulen mejor.

Esta característica es importante en la definición de la facilidad de trabajo de la madera. Las maderas muy duras son de difícil elaboración tanto por sierras como por cuchillas, llegando en muchos casos a resultar poco rentable su aprovechamiento. Por el contrario, ciertos usos, como la carpintería (sobre todo el parquet) o el mueble, exigen un mínimo de dureza.

El Cuadro 11 muestra la clasificación de la madera según su dureza según Coronel (1995), citado por Spavento, et al., (2008).

Cuadro 11. Clasificación de la madera según su dureza

Clasificación	Dureza Janka (kg/cm <sup>2</sup> )
Muy blanda	<300
Blanda	301 – 500
Semidura	501 – 700
Dura	701 – 1000
Muy dura	>1000

(Coronel, 1995. Citado por Spavento, et al., 2008).

En el Cuadro 16 en la sección de Anexos, se muestran las propiedades mecánicas de algunas maderas que son importadas dentro de los Estados Unidos y Canadá.

## **2.5 LAS PROPIEDADES Y CALIDADES DE LA MADERA ASERRADA**

De acuerdo con Fernández, Díez y Gutiérrez (1998), el nivel de calidad más alto de madera aserrada podría parecer deseable para todos los usos, y de hecho se necesita para varios usos. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones, tal material sería prohibitivamente caro y un mal uso de recurso de la madera. En la práctica, el nivel de calidad necesitado para una función puede especificarse fácilmente porque se clasifica la madera en un sistema ordenado desarrollado para servir a los intereses de los usuarios y los productores.

El sistema de clasificación consiste actualmente en varios sistemas, cada uno diseñado para productos específicos. La madera dura es principalmente clasificada para la manufactura, con sólo cantidades pequeñas clasificadas para la construcción. La madera blanda también se clasifica para manufactura y construcción, pero principalmente para la construcción. (Winandy, 1994).

En la práctica, un método, voluntario pero con un sistema de responsabilidades ha evolucionado en los Estados Unidos para el desarrollo, fabricación, y comercialización de la mayoría de la madera clasificada por esfuerzos. En general, los principios de clasificación por esfuerzos, se desarrollan de los resultados de la investigación y los conceptos de ingeniería, menudo dentro de los comités y subcomités de la ASTM. (Forest Products Laboratory, 1999).

Según el Forest Products Laboratory (1999), el Instituto Nacional para Normas y la Tecnología de los Estados Unidos, coopera con productores, distribuidores, usuarios, y las agencias regionales de reglamentación de grados de la madera, a través del Comité de Normas de Madera Americana (ALSC, American Lumber Standard Committee). El ALSC ha congregado normas voluntarias para madera blanda voluntaria para manufactura, llamadas Normas de Maderas Blandas Americanas (American Softwood Lumber Standard).

Las Normas de Maderas Blandas Americanas y su Reglamento Nacional de Grados prescriben las maneras en que los principios de clasificación por esfuerzos pueden usarse para formular reglas para madera dimensionada (nominal 2 a 4 pulgadas de grosor). La norma de esta madera es la base para el mercadeo la madera estructural en los Estados Unidos. (Winandy, 1994).

## **2.6 PINO CANDELILLO (*Pinus maximinoi* H.E. Moore)**

### **2.6.1. Clasificación taxonómica**

En la ficha técnica del Comité Nacional Forestal (CONAFOR, s. f.) se hace la siguiente descripción sobre el *Pinus maximinoi* H.E. Moore:

Reino	Plantae
Subreino	Embryonta
División	Pinophyta
Clase	Pinopsida
Orden	Pinales
Familia	Pinaceae
Género	<i>Pinus</i> sp.
Especie	<i>Pinus maximinoi</i> H. E. Moore
Nombre común	Pino, pino candelillo, pino ocote, pino canis. Cantaj, Tzin, Pinabete
Origen	De México y Centro América

### **2.6.2 Descripción de la especie**

Según la descripción botánica compilada por Salazar, Soihet y Méndez (2000), el *Pinus maximinoi* H. E. Moore, es un árbol de 20 a 35 m de altura y de 45 a 100 cm de diámetro. Tiene capa muy densa, ramas con ángulo recto y horizontalmente verticiladas. La corteza joven es delgada y lisa, cuando vieja, se quiebra en plaquetas elongadas con fisuras color café rojizas. Presenta follaje denso, verde azulado mate o verde grisáceo, notoriamente colgantes. Acículas generalmente cinco por fascículo, delgadas, de 20 a 28 cm de largo y 0.7 a 0.8 mm de ancho, márgenes finamente serrados, estomas presentes en la superficie dorsal y ventral.

Las vainas, son persistentes, de 12 a 18 mm de largo. Canales resiníferos medios, usualmente dos. Los estróbilos masculinos estaminados, y los femeninos subterminales, oblongos, aislados o en grupos de 4 a 5, con pedúnculos largos y escamosos, las escamas son delgadas. La madera es de color castaño pálido, textura fina, grano recto, superficie medianamente lustrosa, olor agradable y sabor no característico (Salazar et al., 2000).

Según el INAB (2012), el *Pinus maximinoi* H. E. Moore se encuentra naturalmente en ecosistemas forestales puros de esta especie o asociados principalmente a *Pinus tecunumanii*, *Pinus pseudostrobus*, *Alnus sp.*, *Ostrya virginiana* y *Liquidambar styraciflua*, en sitios de mayor altitud y con *Pinus oocarpa* y *Quercus sp.* en las partes de bajas altitudes. Esta es una especie de amplia distribución ya que se encuentra en sitios que van desde los 600 hasta los 2,400 msnm, con precipitaciones entre 1,000 y 2,400 mm anuales, en suelos de textura francos a franco-arcillosos, con pH entre 4.5 a 7.5.

La floración inicia de los 6 a los 8 años de edad, aunque nunca es muy prolífico. La floración es de febrero a abril. Se desarrolla en altitudes que van desde los 600 a los 2400 msnm. Crece bien en suelos de franco a franco arcilloso, en suelos profundos con buen drenaje, en suelos con un pH de 4.2 a 6.5 (CONAFOR, s. f.).

### III. JUSTIFICACION DEL TRABAJO

#### 3.1 DEFINICION DEL PROBLEMA

Desde que inició el Programa de Incentivos Forestales (PINFOR) en 1997 por parte del Instituto Nacional de Bosques (INAB), se ha incrementado la cantidad de plantaciones forestales y el manejo de bosques naturales de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, principalmente en el área de la Alta y Baja Verapaz (INAB, 2012).

A pesar de la cantidad de plantaciones y bosques naturales de *Pinus maximinoi* H. E. Moore en el país, aún no se cuenta con información sobre sus propiedades físicas y mecánicas. Al determinar éstas propiedades, se dará a conocer la calidad de ésta madera lo que podría llevar a un aumento en su valor agregado.

La madera se encuentra como uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción y cada vez adquiere mayor interés debido a que su uso reduce las emisiones de carbono y en la diversidad de aplicaciones que se le puede dar. Por ejemplo, las maderas duras o pesadas se emplean para la elaboración de vigas, columnas, y pisos, mientras que las maderas suaves o ligeras se emplean para la elaboración de muebles, molduras y productos de ebanistería.

En nuestro país, aún no se realiza la diferenciación de la madera por el área del fuste de donde proviene, en madera de albura y madera de duramen, debido a que requeriría de más tiempo en la labor de aserrado. Tampoco existe alguna normativa para clasificar la madera considerando los valores de sus esfuerzos máximos para un posible uso estructural.

Al determinar las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, se puede considerar las aplicaciones o usos que se le pueden dar a la madera proveniente de raleos o de bosque natural, e incentivar la diferenciación de la madera de albura y de duramen para algunas industrias como la desintegradora y aquellos procesos de tratamientos especiales en la madera.

### 3.2 JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION

Al determinar las propiedades físicas y mecánicas de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, se contará con información técnica necesaria para el diseño estructural en madera, como el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura en flexión, así como de los esfuerzos de compresión y de corte, los cuales son valores que se han adaptado de tablas internacionales al no contar con información técnica de la madera de nuestro país.

El sector forestal nacional puede ser competitivo en el mercado local, nacional y extranjero, al ofrecer madera de uso estructural principalmente, pero para ello, es necesario contar con la información técnica que permita realizar la normalización y clasificación de la madera según sus propiedades físicas y mecánicas.

Debido a que el desarrollo de la madera juvenil se da durante los primeros años de crecimiento de los árboles (aproximadamente hasta los veinte o veinticinco años), la madera extraída del primero y segundo raleo de una plantación forestal posee una gran proporción de madera juvenil, lo que implica que no posea las mismas características y propiedades físicas y mecánicas que posee la madera proveniente de un bosque maduro.

Es necesario determinar las propiedades físicas y mecánicas de la madera joven y de la madera madura de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, proveniente de los raleos y cortas finales de plantaciones forestales, y de bosques naturales para el diseño de estructuras en madera principalmente, teniendo en consideración el área del fuste de donde provenga (albura o duramen).

Con esta investigación, se proporcionará información técnica para las distintas industrias existentes en la región y en el país, industrias como las de elaboración de muebles y las de diseño y construcciones estructurales, logrando darle un valor agregado a la madera proveniente de plantaciones forestales tanto de raleos como de cortas finales.

## IV. OBJETIVOS

### 4.1 GENERAL

Determinar las propiedades físicas y mecánicas de la madera de albura y duramen de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, proveniente de un segundo raleo y de corta final dentro de una plantación forestal empleando la norma ASTM-D143-94.

### 4.2 ESPECIFICOS

- a. Determinar la proporción de madera de albura y duramen en dos alturas del tronco a través del uso de reactivos químicos.
- b. Clasificar la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore según los resultados obtenidos para las propiedades físicas y mecánicas, empleando clasificaciones propuestas por varios investigadores.
- c. Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de la madera extraída en las zonas de la albura y duramen en dos estados de la madera (seco y verde) para madera de corta final y de raleo.

## **V. HIPOTESIS**

### **5.1 HIPOTESIS NULA**

La madera proveniente del duramen y de la albura de *Pinus maximinoi* H. E. Moore posee similares valores en sus propiedades físicas y mecánicas en estado verde y en estado seco.

### **5.2 HIPOTESIS ALTERNA**

La madera proveniente del duramen y de la albura de *Pinus maximinoi* H. E. Moore posee distintos valores en sus propiedades físicas y mecánicas en estado verde y en estado seco.

## **VI. METODOLOGIA**

### **6.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE DONDE SE OBTUVO EL MATERIAL EXPERIMENTAL**

La finca donde se obtuvo la madera para el estudio se encuentra localizada en la Aldea Choval, municipio de Cobán del departamento de Alta Verapaz. Se localizaron dos puntos como referencia dentro de la finca, siendo estos: Punto 1: Latitud Norte 15° 31' 14" Longitud Oeste 90° 23' 35" y Punto 2: Latitud Norte 15° 31' 33" Longitud Oeste 90° 23' 47".

La finca se encuentra a una altitud promedio de 1395 msnm y según el sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge se encuentra dentro del Bosque muy húmedo subtropical frío bmh - S(f).(MAGA, 2002a).

Los suelos de la finca pertenecen al grupo de las Tierras Altas Sedimentarias, y se encuentra dentro de la sierra plegada de Chamá. (MAGA, 2002b).

#### **6.1.1 Accesos al área**

Se transitan 6 kilómetros aproximadamente por la carretera asfaltada que conduce a Chisec desde la cabecera departamental de Alta Verapaz, hasta llegar a la finca Siguanhá, propiedad del señor Teodoro Wellmann, donde se encuentra la carretera antigua de terracería, a mano izquierda, se toma esta carretera hacia la finca Chicocom, propiedad de Refinsa.

Se transitan aproximadamente 7 kilómetros pasando por el casco de la finca Chicocom, hasta llegar a la finca Choval. (Figura 9).



Figura 9. Acceso y ubicación geográfica a la Finca Choval, Cobán Alta Verapaz

## 6.2 MATERIAL EXPERIMENTAL

La especie utilizada para el presente estudio fue el pino candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore) proveniente del segundo raleo de una plantación de once años y de una corta final de una plantación forestal de 30 años localizadas en la finca Choval.

Se extrajeron diez árboles al azar, de los cuales cinco árboles eran provenientes del segundo raleo y cinco árboles de la corta final. Se cortó una troza de cada árbol, de 2 m de longitud, de las cuales se obtuvo el material para la elaboración de las distintas probetas.

A cada troza se le cortó una rodela, disco o sección transversal de un grueso de 0.10 m a cada extremo, las cuales serían utilizadas para la determinación de la proporción de albura y duramen. De cada troza, se procedió a cortar un tablón, de 0.06 m de grueso, teniendo especial cuidado para que la médula de cada troza quedara al centro del tablón.

Luego de esto, cada tablón fue cortado por la mitad, en el sector de la médula, ya que de esta forma, la mitad de un tablón fue usado para elaborar las probetas a usar en estado verde, y la otra mitad del tablón fue puesta a secar para obtener las probetas a usar en estado seco.

En cada corte realizado, se marcó la madera según su edad, en madera de raleo y en madera de corta final, así como la zona a donde correspondía, zona de albura y zona de duramen.

### **6.3 FACTORES ESTUDIADOS**

Las pruebas que se realizaron, sirvieron para determinar las propiedades físicas y mecánicas más usuales en muestras de madera limpia, empleando la norma ASTM-D-143-94. A continuación se detallan los factores estudiados.

#### **6.3.1 Proporción de albura y duramen**

Para la determinación de albura y duramen, se adoptó la metodología propuesta por Zeledón (2005) en su investigación. Para ello, se utilizaron secciones transversales, discos o rodajas de las trozas estudiadas, debidamente lijadas.

Estas secciones fueron medidas en forma transversal en dos ejes (en x y en y), promediando el valor para obtener un solo valor en cuanto al diámetro total y diámetro sin corteza (Figura 10).

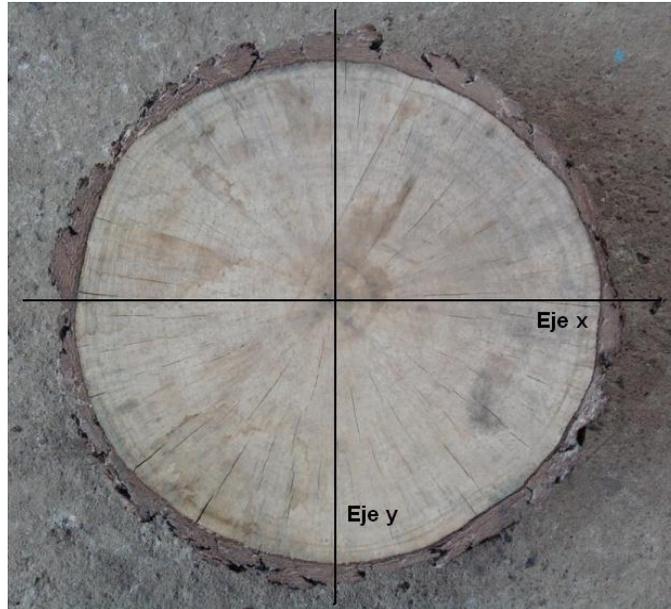


Figura 10. Pieza de madera previa a ser demarcada para diferenciar la albura y el duramen.

Posteriormente se preparó una disolución con 10 mg de azul de bromofenol en 100 mL de agua, para lo cual se utilizó una balanza analítica y una probeta de 100 mL. La disolución obtenida es de color morado (Figura 11) y se aplicó con una brocha pequeña sobre toda la superficie de la sección transversal previamente preparada.



Figura 11. Preparación del Azul de Bromofenol para realizar la determinación de la albura y el duramen en las piezas de madera.

En el lapso de 1 a 2 minutos la albura se volvió oscura (color azulado) mientras que el duramen quedó con un color más claro, lo que permitió hacer una diferenciación entre ambos tejidos (Figura 12).



Figura 12. Pieza de madera donde se observa la diferencia entre la albura (color azul) y el duramen (color amarillo).

Nuevamente se midió en forma transversal en los dos ejes al ser posible la visualización del duramen y en algunos casos de la médula. De esta forma se obtuvo la información necesaria y se tabuló.

### **6.3.2 Propiedades físicas**

#### **6.3.2.1 Porcentaje de humedad (%)**

Se adoptó la metodología propuesta por la ASTM (2002) según la norma D-143-94 para la determinación del contenido de humedad (CH). Después de realizar cada una de las distintas pruebas en el laboratorio, a cada probeta de madera ensayada se le cortó una pieza pequeña para determinar el porcentaje del contenido de humedad que poseía.

Esta pequeña pieza fue pesada y luego secada en un horno eléctrico a una temperatura de  $103 \pm 2^\circ \text{C}$ , hasta que alcanzó un peso constante aproximadamente después de 24

horas y así se determinó el peso seco. El porcentaje de humedad se determinó para todas las pruebas que se realizaron con la siguiente ecuación:

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

### 6.3.2.2 Determinación de la desviación de la fibra

Para la determinación de la desviación de la fibra se utilizó la madera de las rodajas empleadas para determinar la albura y el duramen, y se siguió la metodología propuesta en la norma UNE 56544, la cual trata de la clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. De estas rodajas se cortó una sección, la cual iba de lado a lado de la rodaja, atravesando la medula o parte central de la rodaja (Figura 13).

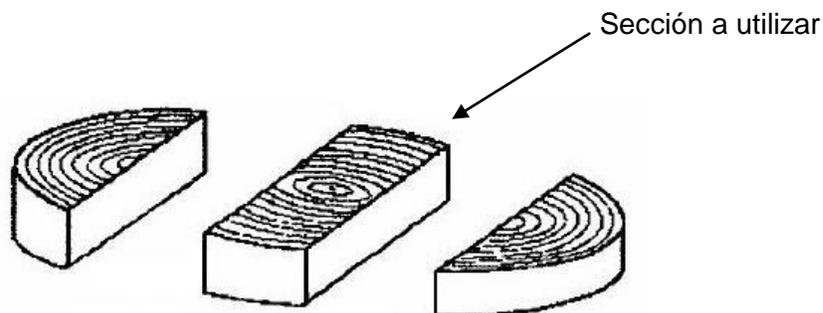


Figura 13. Corte realizado en cada una de las rodajas para obtener las tablillas que se utilizaron para determinar la inclinación de la fibra.

Al tener esta pieza de madera, se cortó por la mitad, atravesando la médula, y con una de las mitades se obtuvieron tablillas, las cuales iban desde la parte central (medula) hacia la periferia de la pieza.

Estas tablillas tenían un grosor aproximado de un centímetro ya que no se podía hacer cortes más finos con la sierra de banco por seguridad del operario de la máquina, pero si daría una buena referencia con respecto a la información que se extraerían de ellas (Figura 14). La otra mitad del listón se utilizó para determinar la contracción e hinchazón de la madera.

Luego de esto, se lijaron en todas las tablillas una de sus superficies, hasta que fuese posible observar con claridad la fibra en cada una de ellas. La medición de la inclinación se realizó mediante el empleo de una regla graduada, elaborada especialmente para esta labor. En la madera de raleo se obtuvieron 13 tablillas y en la madera de corta final se obtuvieron 15 tablillas.



Figura 14. Tablillas obtenidas para la medición de la inclinación de la fibra. La primera tablilla a la izquierda corresponde a la zona de la médula y la del extremo derecho corresponde a la periferia o zona cercana a la corteza.

Esta regla en forma de escuadra, posee ambos lados graduados en centímetros y milímetros, de tal manera que al colocarla sobre las pequeñas tablas de madera, era posible medir la desviación de la fibra a lo largo y ancho de las tablillas (Figura 15).



Figura 15. Medición de la inclinación de la fibra en las tablillas, utilizando la regla elaborada.

Correspondiendo los valores en el eje x a la medición efectuada a lo ancho de la tablilla y los valores en el eje y a la medición efectuada a lo largo de la tablilla, el número de pieza corresponde el No. 1 a la pieza obtenida en la médula y el número mayor a la pieza obtenida en la periferia de la rodaja.

El resultado fue expresado como porcentaje, haciendo uso de la expresión siguiente:

$$\% \text{ Inclinación de la fibra} = (BC / AC) \times 100$$

Dónde:

BC = desviación de la fibra en milímetros (a lo ancho de la tablilla)

AC = distancia sobre la cual se toma la medida, en milímetros (a lo largo de la tablilla).

### 6.3.2.3 Densidad

Debido a la falta del equipo en el laboratorio para la determinación de la densidad empleando la norma ASTM D 143-94-00, la densidad se obtuvo a través de la norma ASTM D 2395-02, la cual proporciona varios métodos para su determinación, optando por realizarse con el modo IV (Sección 10.2.4), el cual consiste en determinar el

volumen por el desplazamiento de un líquido de densidad conocida, para ello se utiliza una probeta graduada de sección mayor a las piezas que serán sumergidas.

Con las tablillas utilizadas para la medición de la inclinación de la fibra, se elaboraron piezas de 1 x 2 cm con un largo de 8 cm. Se escogieron estas dimensiones debido a que las piezas podían ser sumergidas dentro de la probeta.

Cada una de las caras de estas piezas fueron identificadas según el plano que les correspondía, siendo: Superficie radial la parte angosta de las piezas, y la superficie tangencial la parte ancha. Cada una de las piezas fue identificada de la siguiente forma: una letra R indicaba que era madera del raleo, F indicaba que se trataba de madera de corta final.

Luego, un número que indicaba de que individuo o repetición se trataba (estos iban del uno al cinco) y por último una cifra que indicaba con el número uno a la pieza obtenida en la medula de la rodaja, hasta el número más alto, lo que indicaba que era una pieza obtenida cerca de la corteza o periferia de la rodaja (Figura 16).



Figura 16. Piezas para determinar la densidad. En la parte superior se observan las piezas correspondientes a la madera de corta final F, abajo las piezas obtenidas con la madera del raleo.

Para determinar la densidad, fue necesario determinar el volumen por el método de desplazamiento, mediante la inmersión de las piezas consideradas dentro de un líquido de peso específico conocido, en este caso se utilizó agua (Figura 17).



Figura 17. Determinación del volumen de las piezas de madera a través del método de desplazamiento.

El procedimiento seguido fue el indicado en la norma ASTM D 2395-02 y se detalla a continuación:

1. Se llenó con agua aproximadamente la mitad de una probeta graduada de 1000 mL, para facilitar la lectura del nivel del agua en la probeta, preferiblemente coincidiendo con una de las marcas (este es el nivel 1).
2. Se sumergió la muestra dentro de la probeta graduada, utilizando unas pinzas para mantener las piezas dentro del agua.
3. Se determinó el nivel del agua alcanzado al sumergir la pieza (nivel 2).
4. La diferencia entre los dos niveles (1 y 2), es igual al volumen de la muestra y es dado por:

$$\text{Volumen de la pieza} = \text{Nivel 2} - \text{Nivel 1}$$

Luego de determinarse el volumen de cada pieza, las mismas fueron pesadas en una balanza electrónica (Figura 18), de tal forma que la densidad de cada pieza se obtuvo empleando la fórmula:

$$\text{Densidad} = \text{Peso} / \text{Volumen}$$



Figura 18. Determinación del peso de cada pieza utilizada para obtener la densidad de la madera.

Luego de determinar la densidad de las piezas secas al aire (CH aproximadamente 12%), las piezas fueron puestas a secar dentro de un horno eléctrico por veinticuatro horas (Figura 19).



Figura 19. Piezas empleadas para la determinación de la densidad puestas al horno para secarlas.

Se determinó la densidad para dos estados de contenido de humedad en la madera:

- Densidad verde ( $\text{g/cm}^3$ ,  $\text{kg/m}^3$ ), considerando el peso húmedo de la muestra y su volumen.
- Densidad seca al aire ( $\text{g/cm}^3$ ,  $\text{kg/m}^3$ ), considerando el peso seco de la muestra y su volumen.

Para determinar el volumen de las piezas secas al horno, fue necesario recubrir las piezas con una delgada capa de parafina para que éstas no absorbieran agua y mostraran un resultado distinto de volumen.

La parafina fue disuelta en un recipiente de vidrio (beaker) puesto a calentar en una estufa eléctrica, y aplicada a las piezas empleando una pequeña brocha (Figura 20).



Figura 20. Preparación de la parafina empleada para recubrir las piezas de madera secas al horno para determinar el volumen por inmersión.

#### 6.3.2.4 Contracción volumétrica y dimensional

La contracción volumétrica consiste en que la madera absorba o pierda agua, excepto en el PSF (punto de saturación de la fibra), ya que en este punto y arriba de este la madera no sufre contracciones.

La contracción volumétrica se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Contracción volumétrica} = \frac{\text{volumen verde} - \text{volumen seco}}{\text{volumen verde}} \times 100$$

La contracción dimensional, consiste en determinar cuánto se reducen las dimensiones de las piezas de madera a causa de la pérdida de agua. Se determinó la contracción radial y tangencial, por considerar que son las que más afectan a las piezas de madera.

Esta contracción dimensional se determinó empleando la madera con un contenido de humedad de 12 % (Seca al aire). Para ello, se utilizaron las mismas piezas de madera empleadas para la determinación de la densidad, registrando los valores de sus

dimensiones en sus superficies radial y tangencial. Estos valores fueron tomados de la siguiente forma:

En las piezas de madera de 1 x 2 x 8 cm secas al aire, en cada una de las superficies radial y tangencial, se tomaron tres mediciones, dos en los extremos de cada cara y una en la parte central (Figura 21). Luego este valor se promedió y se tomó como el valor a comparar al secar las piezas de madera en el horno eléctrico.

El número de pieza indicaba con el número uno a la pieza extraída en la zona de la médula y el número más alto a la pieza extraída en la zona de la periferia o cercana a la corteza. Rad indicaba que se trata de la superficie Radial y Tan hacía referencia a la superficie Tangencial.

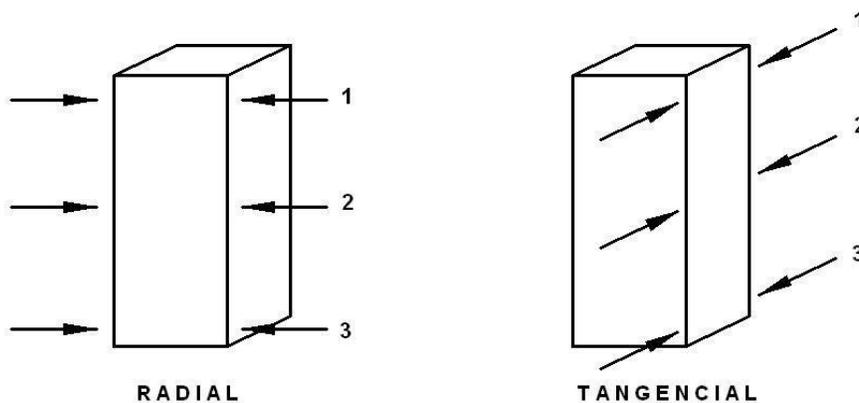


Figura 21. Indicación de los puntos donde se tomaron los valores dimensionales de cada una de las superficies.

Estas mediciones fueron realizadas en las piezas de madera seca al aire y seca al horno, de tal forma que se comparó el valor inicial (seca al aire) con el valor final (seca al horno). La contracción se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Contracción dimensional (r, t)} = \frac{\text{Longitud inicial} - \text{longitud final}}{\text{Longitud inicial}} \times 100$$

### **6.3.3 Propiedades mecánicas**

En esta investigación se realizaron las siguientes pruebas de propiedades mecánicas, basados en la norma ASTM D-143-94 R00 (ASTM, 2004) considerando que son las de mayor importancia y que se cuenta con el equipo de laboratorio apropiado:

#### **6.3.3.1 Flexión estática ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )**

Para las pruebas de flexión estática se elaboraron probetas de 50 x 50 x 760 mm, de las dos zonas consideradas en cada troza (duramen o zona central y albura o zona periférica) debiendo registrar las dimensiones reales de cada una (largo, ancho y alto) antes de realizar la prueba, así como el punto central a lo largo de la probeta, que es donde se colocó el medidor de deformación.

Según la norma ASTM D-143-94 R00 (ASTM, 2004), la muestra se colocará de manera que la carga se aplicará a través del bloque de apoyo a la superficie tangencial más cercana a la médula. La carga es aplicada al centro de cada una de las probetas, siendo la longitud libre entre los soportes de 70 cm. Las bases de cada uno de los soportes se aceitaron, para lograr una mejor posición horizontal de la probeta a ensayar.

Las curvas de carga-deflexión fueron registradas hasta la carga máxima para todas las pruebas de flexión estática. Por norma, las curvas deben prolongarse hasta 76 mm de deflexión, o hasta que la muestra falle.

La carga es aplicada continuamente a la probeta, con una velocidad constante de la cabeza móvil de la prensa hidráulica de 2.5 mm/min. Dentro del límite proporcional, las lecturas de deformación/carga deben tomarse cada 0.02 mm, anotando la carga aplicada en ese momento.

Después de que el límite proporcional se alcanza, menos refinamiento es necesario en la observación de desviaciones, pero es conveniente leerlos hasta llegar al límite de su capacidad, normalmente alrededor de 1 pulgada (25 mm). Las desviaciones se leen con

una precisión de 0,2 mm y también después de intervalos con cambios bruscos en la carga.

Las fallas se clasificarán de acuerdo con la apariencia de la superficie fracturada y la manera en que la falla se desarrolla (Figura 22). Las superficies de fractura se pueden dividir en "abrupta" y "fibrosa", el término "abrupta" indica una falla sin astillamiento y "fibrosa" indica una fractura que muestra astillas.

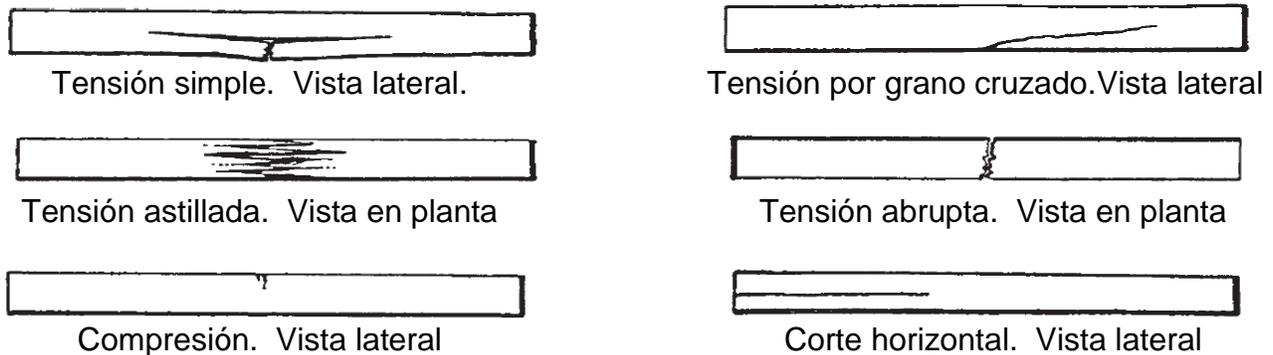


Figura 22. Tipos de falla en flexión estática. (ASTM D 143-94 00, 2000).

Se determinó la carga al límite elástico (este valor viene dado este por el punto donde una tangente trazada a la carga se separa de ésta). Se determinó también el esfuerzo máximo o módulo de ruptura y el módulo de elasticidad a flexión. En la figura 23 se aprecia una probeta sometida a la prueba de flexión estática.

Para este tipo de pruebas se utilizó el deflectómetro, el cual esta calibrado para determinar la deflexión de las piezas de madera. La propiedad de flexión estática se refiere a la resistencia que ofrece la madera a cargas, cuando es utilizada como una viga (Torelli, 1982).



Figura 23. Probeta sometida a la prueba de flexión estática.

### **6.3.3.2 Compresión paralela y perpendicular a la fibra ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )**

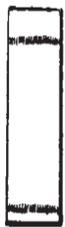
Tamaño de las muestras. La prueba de compresión paralela a la fibra utiliza muestras de 50 por 50 por 200 mm. Las dimensiones reales de la sección transversal y la longitud se midieron antes de cada prueba.

Se debe tener especial cuidado en la preparación de las probetas que se utilizaran para esta prueba, ya que se debe asegurar que las superficies de los extremos sean paralelas y perpendiculares al eje longitudinal. La máquina utilizada poseía un rodillo equipado con un cojinete esférico para obtener una distribución uniforme de la carga sobre los extremos de la muestra.

La carga se aplicó de manera continua durante toda la prueba a una velocidad de movimiento de la cruceta móvil de 0.03 mm/min. La norma indica que las curvas de compresión se tomarán hasta una longitud que no exceda de 150 mm. Las lecturas de compresión de carga serán continuas hasta que el límite de proporcionalidad sea pasado, según lo indicado por la curva.

En el procedimiento de la prueba se midieron deformaciones para un intervalo específico de carga (en este caso, a cada 500 libras) usando un deformímetro, especial para la prueba y que se ajusta a la probeta (la aproximación del aparato se multiplicó por la lectura y se obtuvo la deformación en mm).

Las fallas de compresión serán clasificadas de acuerdo con la apariencia de la superficie de fractura (Figura 24). En caso de que dos o más tipos de fallas se desarrollen, todas serán descritas en el orden de su ocurrencia, por ejemplo, corte seguido por barrido. La falla también será dibujada en la posición en que ocurrió en la hoja de datos.



Aplastamiento. Este término se utiliza cuando el plano de ruptura es aproximadamente horizontal.



Forma de cuña. La dirección de la división, es notada en el plano radial o tangencial.



Cizallamiento. Este término se utiliza cuando el plano de ruptura forma un ángulo de más de 45 grados con la parte superior de la muestra.



Rajadura. Este tipo de falla suele producirse en muestras con defectos internos antes de la prueba y será la base para la eliminación de la muestra.



Compresión y corte paralelo al grano. Esta falla ocurre generalmente en piezas de grano cruzado y será la base para la eliminación de la muestra.



Barrido o enrollado final. Este tipo de falla suele ser asociada con un exceso del contenido de humedad en los extremos de la pieza, al corte inadecuado de la muestra, o ambos. Esta no es un tipo aceptable de falla y por lo general se asocia con una reducción de la carga.

Figura 24. Tipos de fallas ocurridas en la prueba de compresión paralela a la fibra. (ASTM D 143-94 00, 2000).

Las probetas se sometieron a una fuerza uniformemente distribuida en la superficie de contacto hasta que la misma provocó una falla, mediante este ensayo se pueden

obtener distintos tipos de propiedades como el módulo de elasticidad, el límite de proporcionalidad de esfuerzos, el esfuerzo a compresión y otros (Figuras 25 y 26).

El aparato utilizado para determinar la deformación de las muestras fue el deformímetro, utilizado en la prueba de flexión estática. El valor incluido fue el esfuerzo máximo en compresión paralela en  $\text{kg/cm}^2$ , que es la resistencia que ofrece la madera a una acción que actúa en la dirección paralela a las fibras (Torelli, 1982).



Figura 25. Probeta sometida a carga en compresión paralela a la fibra. Se observa la falla causada en forma de cuña.

Las muestras para la prueba de compresión perpendicular a la fibra, deben ser elaboradas en dimensiones de 50 x 50 x 150 mm. Las dimensiones reales de la sección transversal y la longitud se midieron antes de cada prueba.



Figura 26. Probeta sometida a carga en compresión perpendicular a la fibra.

### **6.3.3.3 Dureza radial, tangencial y longitudinal (kg)**

La dureza es la propiedad de la madera que tiene una mayor relación con sus propiedades mecánicas, es decir que mientras la prueba de dureza resulte en un valor alto, se podría esperar que en las demás pruebas también se obtengan valores altos, esto es desde el punto de vista estructural y de resistencia al ataque de bichos.

De acuerdo con Vargas (1987), la dureza es la resistencia que opone la madera a la abrasión, desgaste, penetración y la compresión que en ella se ejerce. Para su determinación se utilizó el método Janka, que consiste en medir el esfuerzo necesario para introducir en las caras transversales y en las laterales (tangencial y radial) de una probeta, una semiesfera de acero de un centímetro cuadrado de área hasta una profundidad igual a su radio (Figura 27).



Figura 27. Probeta empleada para la determinación de la dureza.

#### 6.3.3.4 Corte Paralelo a la Fibra (kg/cm<sup>2</sup>)

Para esta prueba se utiliza una mordaza, que es un accesorio especial para corte, el cual permite que la fuerza de la máquina se transfiera a la probeta sólo por corte directo paralelo a la fibra (Figura 28). El esfuerzo máximo a cortante ( $\sigma_{\text{corte}}$ ), en kg/cm<sup>2</sup>, mide la capacidad que tiene la madera para resistir acciones que tienden a producir deslizamiento de un plano interno de la madera sobre su adyacente (Vargas, 1987).



Figura 28. Probeta empleada para la determinación del esfuerzo de corte.

### **6.3.3.5 Retiro de clavos radial, tangencial y longitudinal (kg)**

Los clavos usados para las pruebas del retiro fueron de un diámetro de 0.0985 pulgadas (2.5 mm). Los clavos que debieron de usarse son los de punta de diamante. Todos los clavos se limpiaron antes del uso para quitar cualquier capa o película de la superficie que pudiera estar presente como resultado de operaciones de fabricación.

Cada clavo se utilizó una sola vez. El método se basa en aplicar las cargas necesarias para extraer clavos, de dimensiones normalizadas, introducidos en las caras y cabezas de la probeta a una misma profundidad. Los clavos fueron colocados en ángulos rectos a la cara de la muestra a una penetración total de 1 ¼ pulgadas (32 mm).

Dos clavos se colocaron en la superficie tangencial, dos en una superficie radial, y uno en cada extremo. La elección entre las dos superficies radiales y dos tangenciales debe dar un promedio justo de la pieza.

En las caras radial y tangencial, los clavos se colocaron a una distancia suficiente de los bordes y extremos de la muestra para evitar la ruptura. En general, los clavos no deben colocarse más cerca que ¾ pulgadas (19 mm) del borde o 1 ½ pulgadas (38 mm) del extremo de una pieza.

Los dos clavos en una cara radial o tangencial no deben colocarse en línea entre sí a menos de 2 pulgadas (50 mm) de separación. Quitar todos los seis clavos en una sola pieza inmediatamente después de ser colocados. Sujetar las muestras durante la prueba en los asientos.

La figura 29 muestra una de las probetas sometidas a la prueba de extracción de clavos.



Figura 29. Probeta sometida a la prueba de retiro de clavos.

Se enviaron las barras al laboratorio para realizar los ensayos determinados que proporcionaron la información necesaria para el presente trabajo. Las dimensiones de las barras utilizadas en las pruebas se muestran en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Dimensiones de las probetas para la determinación de las propiedades mecánicas en muestras de madera limpia según la norma ASTM D – 143 – 94.

Prueba a realizar	Dimensión de la barra en mm
Flexión estática	50 x 50 x 760
Compresión paralela a la fibra	50 x 50 x 200 ó 25 x 25 x 100
Compresión perpendicular a la fibra	50 x 50 x 150
Dureza radial, tangencial y longitudinal	50 x 50 x 150
Corte paralelo a la fibra	50 x 50 x 63
Retiro de clavos	50 x 50 x 200

(Forest Products Laboratory. 1999).

Se realizó un análisis estadístico para determinar si existían diferencias significativas entre la madera de albura y duramen en la madera proveniente del raleo y en la madera de corta final.

#### 6.3.4 Módulo de Ruptura (obtenido a partir del ensayo a flexión)

El módulo de ruptura fue calculado empleando la ecuación siguiente:

$$\text{MOR} = \frac{3P a}{b h^2}$$

Siendo:

MR = módulo de ruptura en kg/cm<sup>2</sup>

P = Carga máxima en kg.

a = distancia desde la reacción al punto de carga más próximo en cm.

b = ancho de la viga en cm

h = profundidad o peralte de la viga en cm

### 6.3.5 Módulo de Elasticidad (obtenido a partir del ensayo a flexión)

El módulo de elasticidad fue calculado empleando la ecuación siguiente:

$$\text{ME} = P' a \frac{3L^2 - 4a^2}{4bh^3 A}$$

Siendo:

E = módulo de elasticidad en kg/cm<sup>2</sup>

P' = Cualquier carga dentro del intervalo proporcional en kg.

a = distancia de la reacción al punto de carga más próximo en cm.

b = ancho de la viga en cm

h = profundidad o peralte de la viga en cm

L = luz o distancia de la viga en cm

A = deflexión provocada por P'

## 6.3 DESCRIPCION DE LOS TRATAMIENTOS

Para la realización de las pruebas físicas y mecánicas, provenientes de dos partes distintas del tronco, se extrajeron barras provenientes de la zona del duramen y de la albura.

Debido a que en las coníferas a edades jóvenes es difícil diferenciar la albura del duramen, se determinó la proporción de albura y duramen a través del uso de reactivos químicos, siendo empleado para este caso el azul de bromofenol, el cual ha sido empleado con éxito en varias especies.

De esta forma, se determinaron dos tratamientos, siendo éstos madera de albura y madera de duramen (Incluyendo la médula). A cada uno de estos tratamientos, se deben agregar dos condiciones para la madera en base a su contenido de humedad, éstas condiciones son madera verde (Contenido de humedad >30 %) y madera al 12% (seca al aire). Por tal razón, se extrajeron dos barras del núcleo o centro de la troza y dos barras de la zona de la albura (Figura 30).

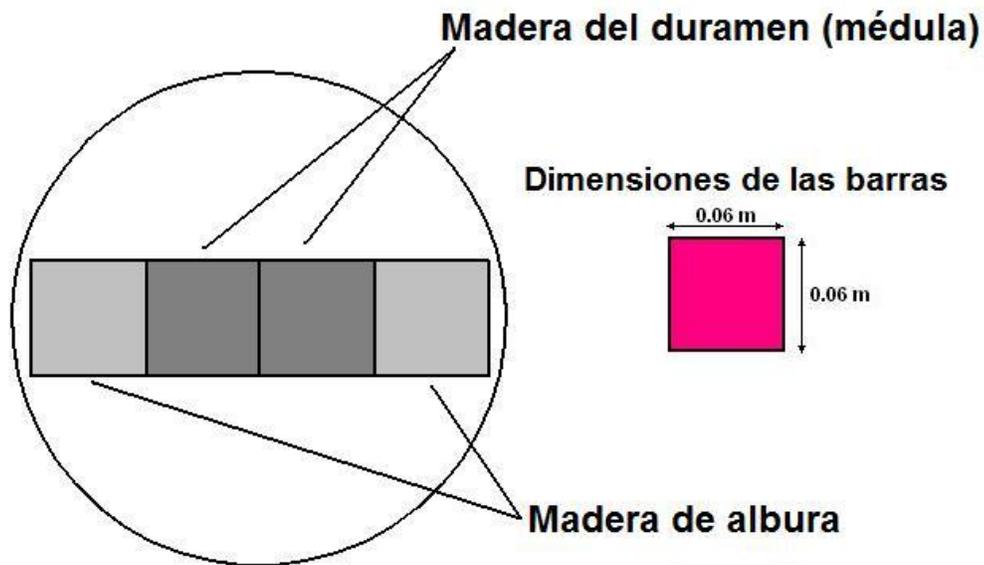


Figura 30. Ubicación de las barras a extraer de cada troza a ser evaluada.

Las trozas seleccionadas de cada árbol se marcaron sobre sus secciones transversales, para evitar confusiones, y de ellas se cortaron barras de 0.06 x 0.06 x 1.80 m que, posteriormente, fueron utilizadas en la elaboración de probetas con las dimensiones normalizadas, según el tipo de ensayo, ya sea físico o mecánico, por la norma ASTM D-

143, luego estas reglas se almacenaron protegiéndolas del sol, la lluvia y la humedad para evitar daños en las mismas.

#### **6.4 ANALISIS ESTADISTICO**

Para el análisis estadístico de los valores obtenidos en las pruebas de laboratorio, se consideraron dos experimentos:

- a. Experimento 1: pruebas realizadas con madera de corta final, y
- b. Experimento 2: pruebas realizadas con madera de raleo.

Para cada experimento se consideraron dos factores: el factor A, relacionado con el contenido de humedad de la madera, con dos niveles,  $A_1$  = madera secada al aire (contenido de humedad de 12%) y  $A_2$  = madera verde.

El factor B, relacionado con la zona del fuste de donde se extrajeron las probetas, con dos niveles,  $B_1$  = madera proveniente de la zona del duramen y  $B_2$  = madera proveniente de la zona de la albura o cercana a la corteza del fuste.

El diseño experimental utilizado fue el de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas, con cinco repeticiones en cada experimento. Cada árbol constituyó un bloque o repetición, como se muestra en la Figura 31.

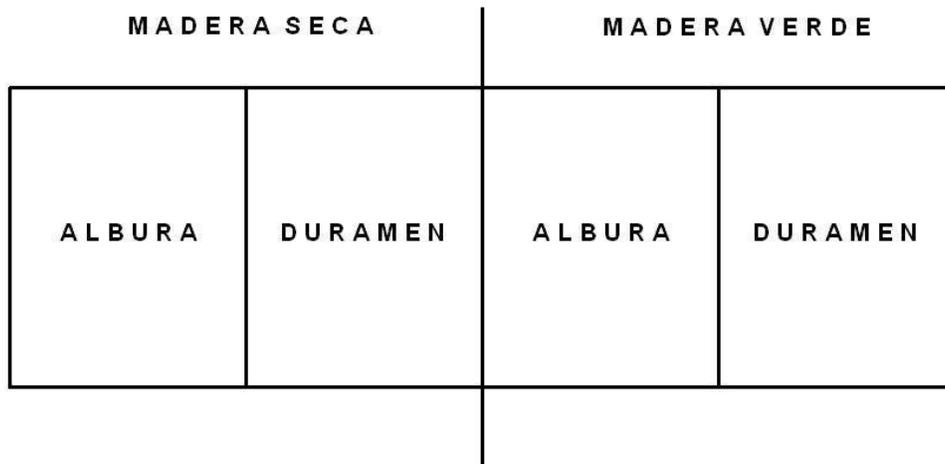


Figura 31. Sección transversal de madera obtenida de cada árbol, que representa un bloque, utilizada para las pruebas realizadas en el laboratorio.

Las variables de respuesta medidas fueron: módulo de ruptura y módulo de elasticidad en flexión estática, compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular a la fibra, dureza radial, tangencial y longitudinal y corte paralelo a la fibra, y aplicado un análisis de varianza, con un nivel de 5% de significancia, de acuerdo con el modelo estadístico matemático asociado a este diseño experimental (Montgomery, 2004) el cual se describe a continuación:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \rho_k + (\alpha\rho)_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

Siendo:

$Y_{ijk}$  = Variable de respuesta medida en la  $ijk$  - ésima unidad experimental

$\mu$  = Media general de la variable de respuesta

$\beta_j$  = Efecto del  $j$  - ésimo bloque o repetición (un árbol)

$\alpha_i$  = Efecto del  $i$  - ésimo estado de la madera (verde y seco)

$(\alpha\beta)_{ij}$  = Efecto de la interacción entre el  $i$ -ésimo estado de la madera con el  $j$ -ésimo bloque, que es utilizado como residuo de parcelas grandes y es representado como error(a)

$\rho_k$  = Efecto de la  $k$  - ésima parte del fuste (albura y duramen)

$(\alpha\rho)_{ik}$  = Efecto de la interacción entre el  $i$ -ésimo estado de la madera con la  $k$  - ésima parte del fuste.

$\varepsilon_{ijk}$  = Error experimental asociado a  $ijk$ -ésima unidad experimental, que es utilizado como residuo de las parcelas pequeñas, y es definido como: error(b)

En los casos en que fueron observadas diferencias significativas en los efectos principales o en la interacción, fue aplicada una prueba de comparación múltiple de medias, usando el criterio propuesto por Tukey.

Para las variables módulo de ruptura y de elasticidad en flexión estática, compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular a la fibra, dureza radial, tangencial y longitudinal y corte paralelo a la fibra se utilizó una prueba de t para comparación de medias provenientes de grupos independientes, usando un nivel de 5% de significancia. Los datos fueron procesados utilizando el programa estadístico Infostat (Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W., 2010).

## **6.5 VARIABLES RESPUESTA**

Las variables de respuesta analizadas en este estudio se enlistan a continuación:

1. Propiedades físicas:
  - a. Porcentaje de humedad (%)
  - b. Densidad verde al 30 % de humedad y seca al 12 % de humedad (en  $\text{g/cm}^3$ )
  - c. Contracción volumétrica(en %)
  - d. Desviación de la fibra (en %)
2. Propiedades mecánicas
  - a. Flexión estática (en  $\text{kg/cm}^2$ )
  - b. Compresión paralela y perpendicular a la fibra (en  $\text{kg/cm}^2$ )
  - c. Dureza radial, tangencial y longitudinal (en kg)
  - d. Corte paralelo a la fibra (en  $\text{kg/cm}^2$ )
  - e. Retiro de clavos radial, tangencial y longitudinal (en kg)
3. Módulo de ruptura, obtenido a partir del ensayo a flexión (en  $\text{kg/cm}^2$ )
4. Módulo de elasticidad, obtenido a partir del ensayo a flexión (en  $\text{kg/cm}^2$ )
5. Esfuerzo de corte (en  $\text{kg/cm}^2$ )

## **VII. RESULTADOS**

### **7.1 PROPIEDADES FÍSICAS EVALUADAS**

#### **7.1.1 Proporción de albura y duramen en el fuste de los árboles**

La madera del duramen no solo es más oscura en ocasiones, sino que también es más densa y resistente a los ataques de insectos, mientras que la zona exterior del tronco, es decir la albura, es más clara, más porosa, blanda y en ocasiones menos valiosa. Sin embargo, desde el punto de vista de los tratamientos físicos, la albura es más fácil de tratar y de trabajar en la mayor parte de los procesos de elaboración y desintegración mecánica.

#### **7.1.2 Proporción de albura – duramen en madera de raleo.**

El Cuadro 23 en la sección de Anexos contiene los datos obtenidos en las mediciones de albura y duramen a 0.20 m de altura (altura del tocón) en madera de raleo. El Cuadro 24 en la sección de Anexos contiene los datos obtenidos en las mediciones de albura y duramen a 2.00 metros de altura en madera de raleo.

En la madera del raleo, para las dos alturas consideradas, no se hizo visible la presencia de duramen, ya que las rodajas de madera quedaron completamente azuladas, pudiéndose identificar únicamente la médula, con formas irregulares en todas las piezas.

Por tanto, en la madera de raleo únicamente existe albura, ya que el duramen se debe a un proceso que se da con el transcurso de los años. Debido a que la edad de los árboles del segundo raleo es de once años, el tiempo ha sido muy poco para que se dé el inicio de la duraminización. A veinte centímetros de altura, se observa un mayor porcentaje de corteza (10.43 %) que a dos metros de altura (9.55 %).

En la figura 32 se muestran los resultados en porcentajes obtenidos en las rodajas del fuste de los árboles provenientes del raleo, a dos alturas distintas, siendo estas a veinte centímetros de la base del árbol (altura del tocón) y a dos metros de altura. También se muestran las proporciones de médula y corteza.

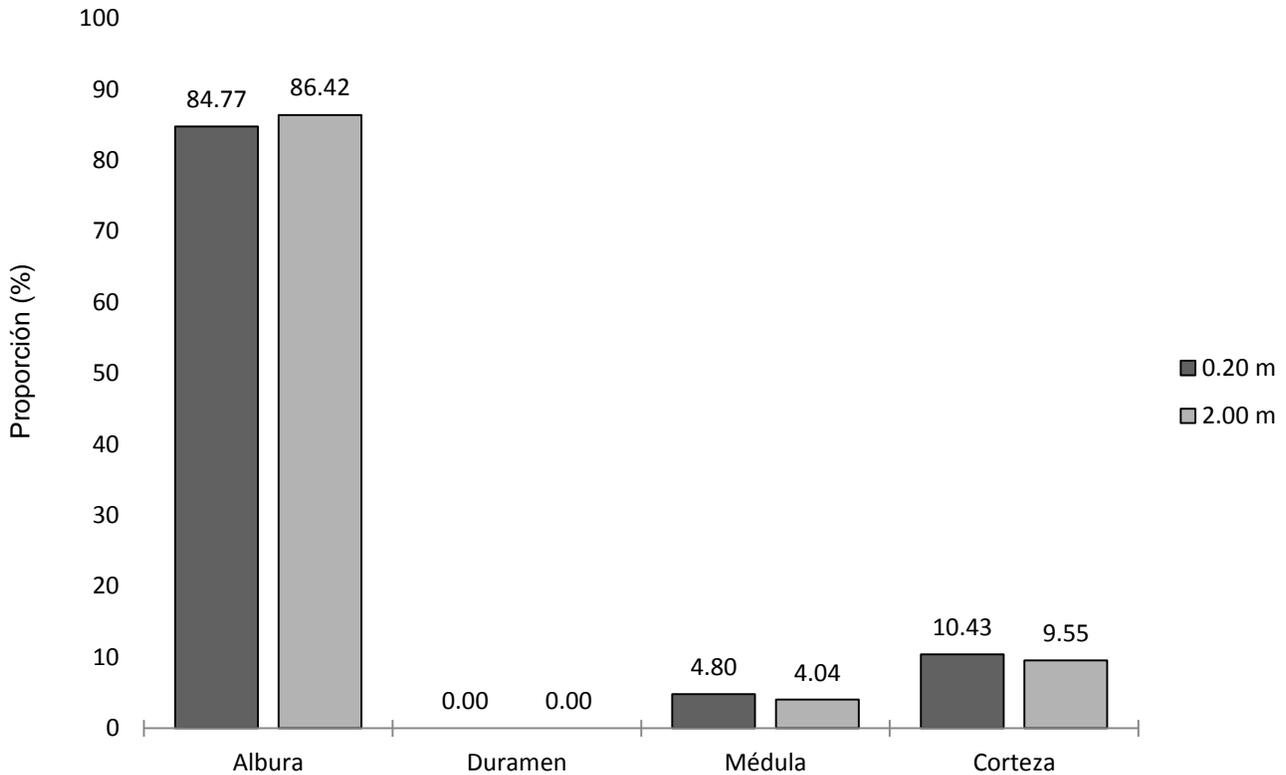


Figura 32. Proporción de albura, duramen, médula y corteza, en el fuste de madera de raleo, a la altura de 0.20 m (altura del tocón) y a 2.00 m.

Para la médula, no existe demasiada variación en cuanto a proporción para ambas alturas. La proporción de albura es menor (84.77 %) a veinte centímetros de altura, debido a que el grueso de la corteza es mayor a esta altura. A dos metros de altura, la proporción de albura es mayor (86.42 %), ya que la corteza es más delgada.

Debido a que la madera de raleo no posee duramen, esta madera puede ser fácilmente tratada y trabajada en los procesos de elaboración y de desintegración. Pudiendo encontrarse mercado para esta madera en la industria desintegradora. Si se opta por el aserrío de la madera de raleo, es necesario realizar un despiece especial, mediante el cual se liberen a las piezas aserradas de la médula, que está presente en el fuste del árbol a estas alturas.

### 7.1.3 Proporción de albura – duramen en madera de corta final.

En la figura 33 se muestran los resultados en porcentajes obtenidos en las rodajas del fuste de los árboles provenientes de la corta final, a dos alturas distintas, siendo estas a veinte centímetros de la base del árbol (altura del tocón) y a dos metros de altura. También se muestran las proporciones de médula y corteza.

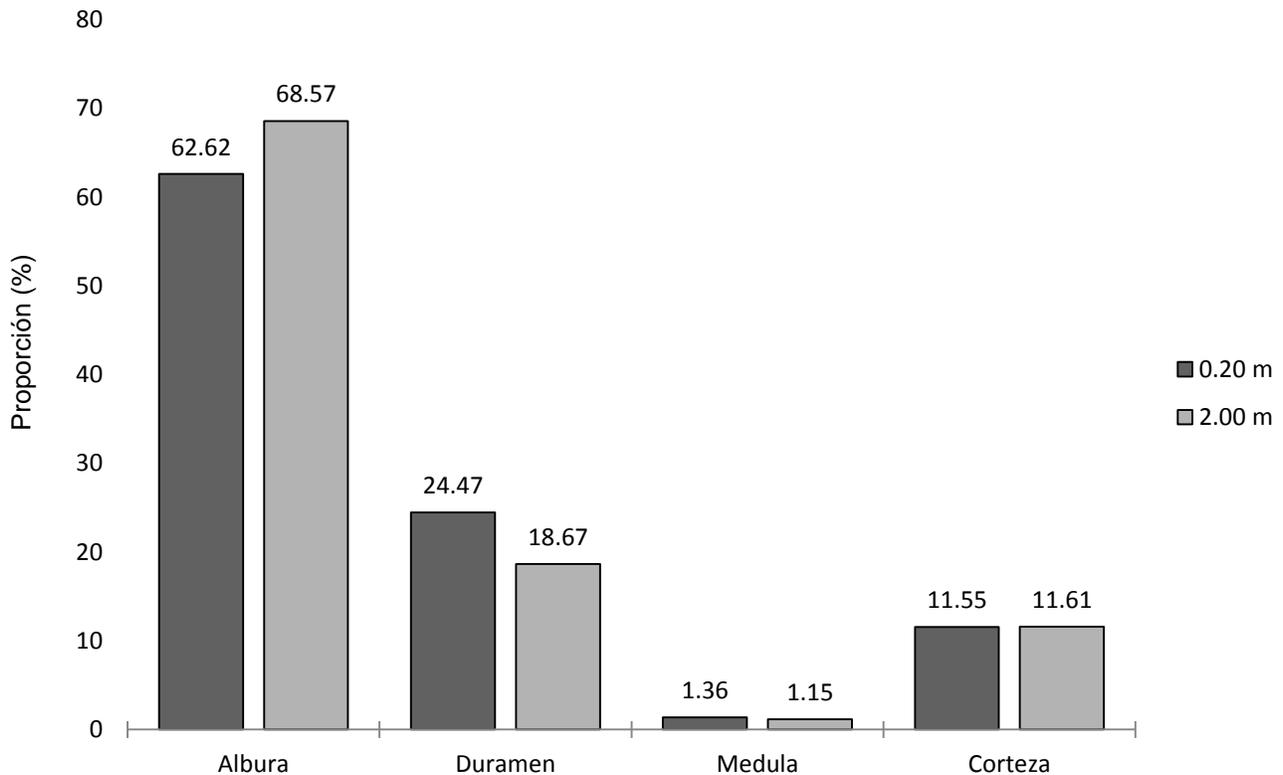


Figura 33. Proporción de albura, duramen, médula y corteza, en el fuste de madera de corta final, a la altura de 0.20 m (altura del tocón) y a 2.00 m.

El Cuadro 25 en la sección de Anexos contiene los datos obtenidos en las mediciones de albura y duramen a 0.20 m de altura (altura del tocón) en madera de corta final. El Cuadro 26 en la sección de Anexos contiene los datos obtenidos en las mediciones de albura y duramen a 2.00 metros de altura en madera de corta final.

En la madera proveniente de corta final, se logró observar el duramen en las piezas de madera empleadas, a ambas alturas. A veinte centímetros de altura, la proporción de albura es menor (62.62 %) a la proporción obtenida a dos metros (68.57 %).

La proporción de duramen fue mayor a veinte centímetros de altura (24.47 %) que la proporción obtenida a dos metros (18.67), lo que demuestra que el duramen se va formando en el fuste de los árboles en las células que conforman la madera juvenil.

La proporción de médula es baja a ambas alturas, lo que supone un crecimiento lento de los árboles, debido a factores climáticos (poca precipitación, suelos pobres, etc.) y/o silvícolas (mal manejo forestal como la falta de raleos, lo que produce una alta competencia por nutrientes y por luz), siendo su valor más alto a 20 cm. de altura (1.36 %). La proporción de corteza es mayor para 2.033 metros de altura (11.61 %).

#### **7.1.4 Inclinación de la fibra de la madera**

La desviación general de la fibra puede definirse como la falta de paralelismo entre el eje principal de la pieza y la dirección principal de la fibra. La inclinación de la fibra de la madera es una variable que afecta a las propiedades mecánicas de la madera en forma inversamente proporcional.

En la sección de Anexos, el Cuadro 27 contiene los datos correspondientes a la inclinación de la fibra en porcentaje para la madera de raleo y el Cuadro 28 la información correspondiente a la madera de corta final. El Cuadro 29 contiene las medidas resumen del porcentaje de inclinación de la fibra para la madera de corta final y madera de raleo.

En la figura 34 se presenta el comportamiento de la inclinación de la fibra para los dos tipos de madera evaluados, desde la médula hacia la periferia del tronco. Los porcentajes de inclinación de la fibra son mayores en la parte central del tronco (13.67 % para madera de corta final y 12.22 % para madera de raleo) y van disminuyendo a medida que se van acercando a la periferia del fuste hasta alcanzar los valores más bajos (3 % para madera de corta final y 4.5 % para madera de raleo).

Este comportamiento decreciente es similar en los dos tipos de madera, corta final y raleo.

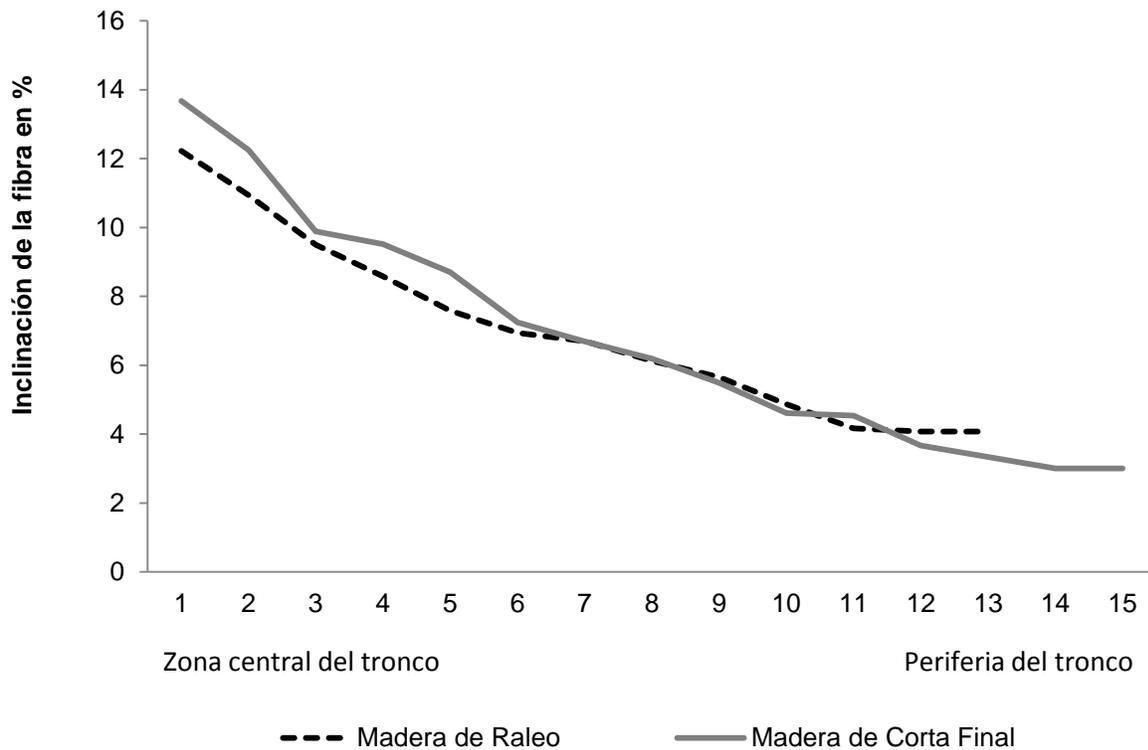


Figura 34. Comportamiento del porcentaje de inclinación de la fibra, de la médula hacia la periferia del tronco, para los dos tipos de madera evaluados.

Los porcentajes de inclinación de la fibra son mayores en la parte central del tronco (13.67% para madera de corta final y 12.22% para madera de raleo) y van disminuyendo a medida que se van acercando a la periferia del fuste hasta alcanzar los valores más bajos (3% para madera de corta final y 4.5% para madera de raleo).

Para esta propiedad, se obtuvo un valor medio de 6.79% para la madera de Corta Final, con una desviación estándar de 3.39 y un coeficiente de variación de 49.88. Para la madera de raleo se obtuvo un valor medio de 7.04%, con una desviación estándar de 2.65 y un coeficiente de variación de 37.63.

El alto porcentaje de inclinación de la fibra, evidencia la presencia de madera juvenil, la cual está presente en la madera formada durante los primeros años de crecimiento, que si bien no difiere en aspecto de la del resto, posee unas características de comportamiento mecánico y físico diferentes a las del resto de la madera formada.

En la zona central del tronco se observó una mayor inclinación de la fibra la cual tiende a disminuir al alejarse hacia la periferia. Una inclinación de la fibra mayor es indicativa de la presencia de madera juvenil, la cual está presente en la madera de raleo y de corta final en los primeros años de su crecimiento.

Según la clasificación propuesta por Vignote y Martínez (2006) y considerando que la inclinación de la fibra fue medida en la superficie tangencial, la madera de raleo y de corta finales clasificada como madera con fibra poco inclinada (inclinación de la fibra < 10 %).

#### **7.1.5 Densidad**

Esta característica física, como ya se ha indicado, influye de forma muy directa en casi la totalidad de características físicas y mecánicas, y por tanto, su conocimiento es muy importante (Vignote y Martínez, 2006). Es particularmente importante la densidad en los siguientes aspectos:

La densidad es importante en procesos como el secado, en el que a medida que la madera es más densa, más agua contiene (para la misma humedad de la madera) y más energía y tiempo cuesta en eliminarse. Puede ser un factor decisivo para ciertos usos. Así, en envase y embalajes se busca ligereza para hacer más fácil el transporte. Respecto al mueble, quizá el comprador valore más el aspecto compacto y pesado.

También es importante porque influye en la productividad de muchos procesos industriales. Así en la obtención de pasta, se obtendrán mayores rendimientos con maderas densas que ligeras (dado que se compra por volumen y se vende por peso).

De la misma manera, la utilización de la madera para la obtención de energía se basa en su densidad. La madera es más apta cuanto más densa sea.

En la sección de Anexos, el Cuadro 30 contiene los datos obtenidos para la densidad de la madera de raleo, desde la médula (pieza No. 1) hacia la periferia del fuste del árbol (pieza No. 13); el Cuadro 31 contiene los datos obtenidos para la densidad de la madera de corta final, desde la médula hacia la periferia del fuste del árbol. El Cuadro 32 reúne los datos de las medidas resumen de la densidad de la madera de corta final y de la madera de raleo.

La figura 35 muestra el comportamiento de la densidad de la madera seca al aire, desde la médula hacia la periferia del tronco, para la madera de corta final y para la madera de raleo evaluadas en el laboratorio.

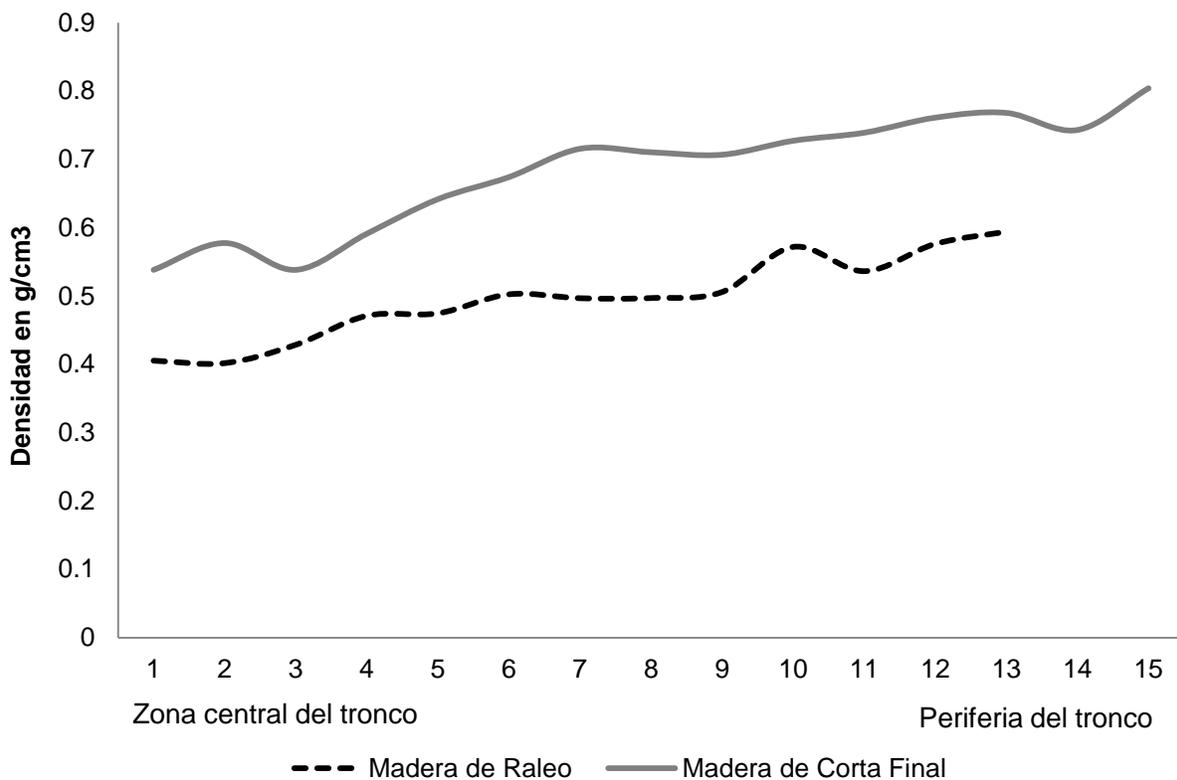


Figura 35. Comportamiento de la densidad de la madera seca al aire, de la médula hacia la periferia del tronco, para los dos tipos de madera evaluados.

Para la densidad, se obtuvo un valor medio de  $0.6823 \text{ g/cm}^3$  para la madera de corta final, y un valor medio de  $0.4970 \text{ g/cm}^3$  para la madera de raleo.

En base a la clasificación propuesta por Vignote y Martínez (2006), y según los resultados obtenidos, se puede clasificar a la madera de corta final como madera pesada ( $0.650 - 0.799 \text{ g/cm}^3$ ) y a la madera del raleo como madera ligera ( $<0.500 \text{ g/cm}^3$ ). Según lo observado, la densidad de la madera tanto de raleo como de corta final, tiende a aumentar con la edad del árbol, por lo que se espera que la madera proveniente árboles maduros posea una mayor densidad que la madera de árboles jóvenes.

#### **7.1.6 Contracción dimensional y volumétrica**

La madera posee la propiedad de variar sus dimensiones y por tanto su volumen cuando su contenido de humedad cambia. Cuando la madera se seca por debajo del Punto de Saturación de la Fibra (PSF), se producen fenómenos comúnmente llamados movimientos o juego de la madera (Vignote y Martínez, 2006).

La contracción dimensional se refiere a la disminución en la dimensión de cada una de las superficies de las piezas de madera. Esta contracción dimensional se expresa en % e indica cuanto disminuyó su dimensión al secarse al horno y perder completamente el agua contenida en ella. Si el fenómeno es de aumento de volumen, se designa con el nombre de hinchazón.

En el sentido longitudinal de la madera, el movimiento es muy pequeño, y en la práctica se considera nulo, mientras que en el sentido radial puede variar entre un 4.5 y 8 %. En el sentido tangencial, la contracción es, en general de 1.5 a 2 veces mayor que en el sentido radial.

En el apartado 7.1.2, se determinó que en la madera de raleo no se ha desarrollado el duramen, por lo tanto, se denominó a la madera de esta zona como madera del centro y a la madera de la albura como zona de la periferia del tronco.

En la sección de Anexos, el Cuadro 33 reúne los datos obtenidos para la contracción dimensional en la madera de raleo, para la zona central del tronco y el Cuadro 34 para la zona de la periferia del tronco. El Cuadro 35 reúne los datos obtenidos para la contracción dimensional en madera de corta final para la zona del duramen y el Cuadro 36 para la zona de la albura. El Cuadro 37 muestra los datos para la contracción volumétrica de la madera de raleo y el Cuadro 38 contiene los datos para la contracción volumétrica de la madera de corta final.

Según la figura 36, en lo que se refiere a la contracción dimensional, la contracción tangencial es mayor que la radial, para ambas edades (madera de raleo y madera de corta final), siendo en la zona de la periferia, cercana a la corteza y en la de la albura donde alcanza su mayor valor (5.71 % para madera de raleo y 6.49 % para madera de corta final).

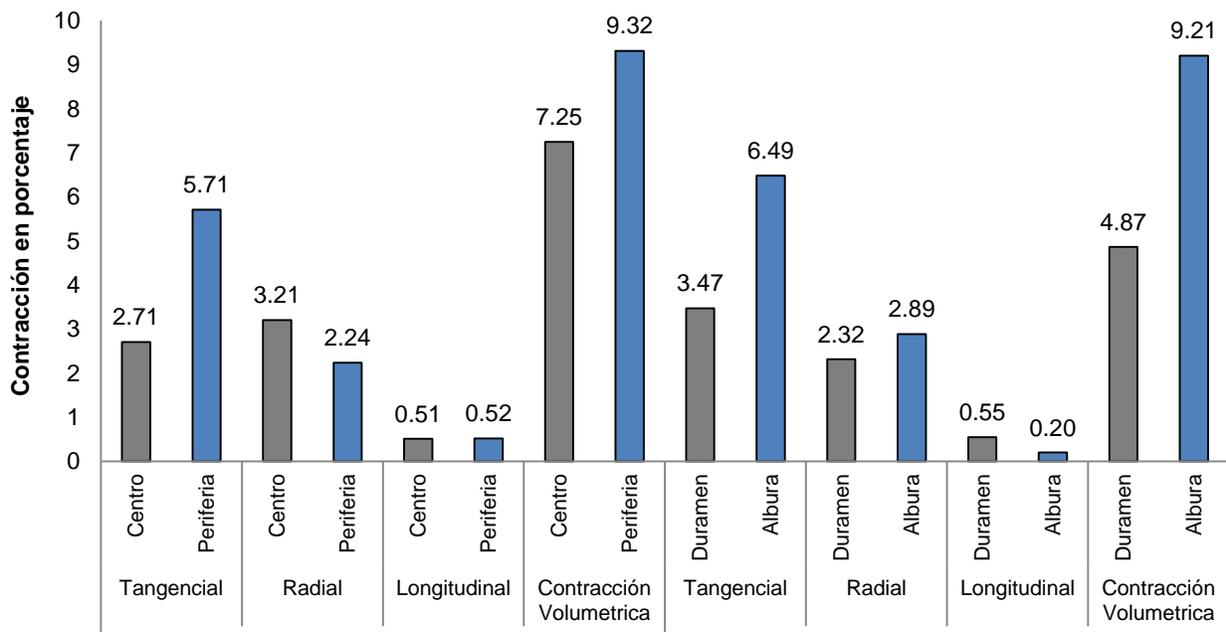


Figura 36. Contracción dimensional en las superficies tangencial, radial, longitudinal y contracción volumétrica en madera de raleo y corta final. Contenido de humedad inicial > 30 %.

Como lo indica Winandy (1994), la contracción dimensional en el sentido longitudinal es más baja, presentando valores casi similares (0.52% para madera de raleo y 0.55% para la de corta final) y puede ser considerada como nula.

El valor promedio de contracción dimensional para la madera de raleo es de 4.20% para la superficie tangencial y 2.72% para la superficie radial. La relación de las contracciones T/R correspondiente es de 1.54 para la madera de raleo. Para la madera de corta final, el valor promedio de la contracción dimensional en la superficie tangencial es de 4.98% y para la superficie radial es de 2.60%, con una relación de contracciones T/R de 1.91 para la madera de corta final.

Según lo indicado por Vignote y Martínez (2006), maderas con relación entre coeficientes  $T/R > 2$  presentan elevada tendencia a deformación, y los valores obtenidos muestran que la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore tanto de raleo como de corta final, es una madera que posee una contracción dimensional baja, o sea, es una madera estable, pudiendo ser sometida a los procesos de secado de la madera y ser utilizada sin problemas para la fabricación de muebles y carpintería.

En lo referente a contracción volumétrica, la madera de raleo presenta un valor promedio de 8.28% y la madera de corta final presenta un valor de 7.03%. Según la clasificación propuesta por Pérez (1983), la contracción volumétrica de *Pinus maximinoi* H. E. Moore tanto para madera de raleo como de corta final, se encuentra en el rango de contracción de 5 a 10%, lo que indica que es una madera de pequeña contracción, lo que significa que la madera puede ser secada antes del proceso de aserrado o de elaboración.

## **7.2 PROPIEDADES MECÁNICAS**

### **7.2.1 Dureza**

La dureza es una característica que depende de la cohesión de las fibras y de su estructura. Se manifiesta en la dificultad que presenta la madera de ser penetrada por otros cuerpos (clavos, tornillos, etc.) o a ser trabajada (cepillo, sierra, formón).

La dureza depende de la especie, de la zona del tronco, de la edad. En general, se suele coincidir en que las maderas más duras son las más pesadas (de mayor densidad). El duramen es más duro que la albura. Las maderas verdes son más blandas que las secas. Las maderas fibrosas son más duras. Las maderas más ricas en vasos son más blandas. Las maderas más duras se pulen mejor.

En la sección de Anexos, el Cuadro 39 muestra los resultados de la prueba de dureza Janka para la madera de raleo en estado verde, y el Cuadro 40 muestra los resultados de la prueba de dureza Janka para la madera de corta final en estado verde.

#### **7.2.1.1 Dureza en madera de raleo y corta final en estado verde**

Según la figura 37, para el estado verde en la madera de raleo se obtuvieron valores más bajos para la zona del centro del tronco (184.49 kg), debido a que esta zona posee una mayor proporción de médula y madera juvenil de rápido crecimiento.

Para la madera de la zona cercana a la periferia o corteza del tronco, los valores fueron mayores, siendo para la superficie tangencial la de mayor valor (279.72 kg) debido a que esta madera posee menor cantidad de madera juvenil y menor inclinación de la fibra.

En la madera de corta final, la zona del duramen, presentó los valores más altos en las superficies radial (382.06 kg) y tangencial (355.08 kg), este resultado es debido a la acumulación de minerales en esta zona del tronco durante el proceso de duraminización.

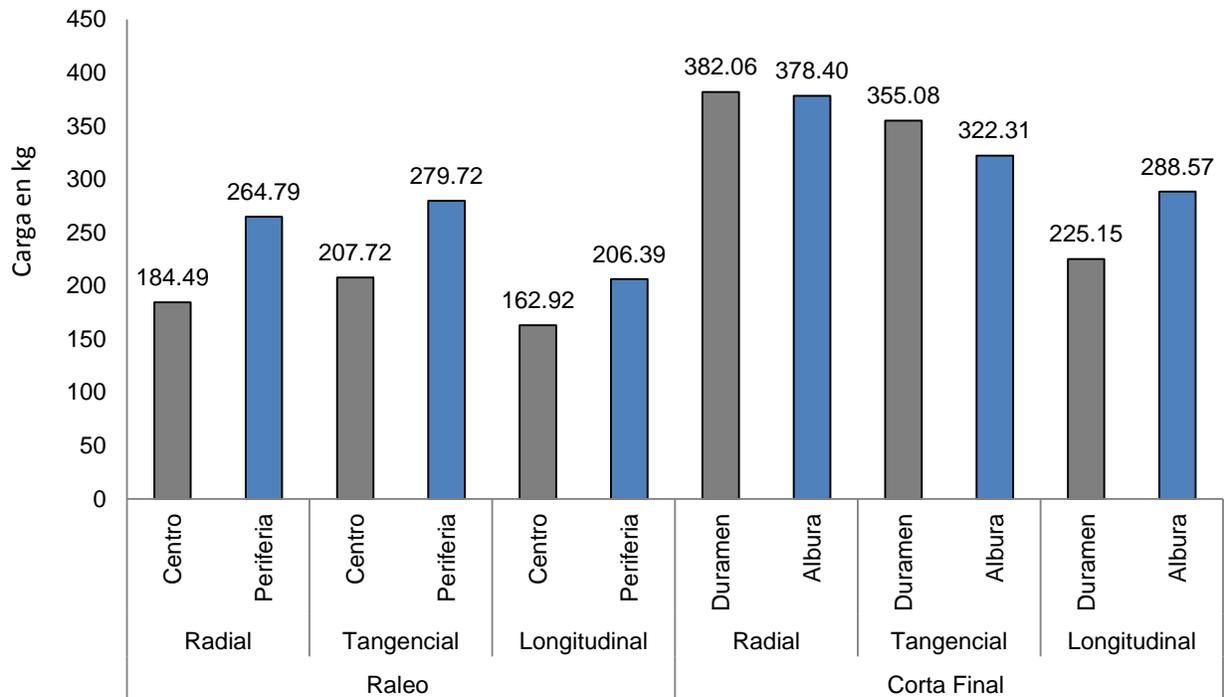


Figura 37. Dureza de la madera en estado verde, en sus superficies radial, tangencial y longitudinal, en madera de raleo y de corta final.

La madera de la albura, presentó su valor más alto en la superficie radial (378.40 kg). En ambas zonas (duramen y albura), la superficie radial presenta los valores más altos para la propiedad mecánica de dureza.

### 7.2.1.2 Dureza en madera de raleo y corta final en estado seco

En la sección de Anexos, el Cuadro 41 reúne la información sobre la prueba de dureza Janka para la madera de raleo en estado seco, y el Cuadro 42 para la madera de corta final en estado seco.

En esta prueba, con madera seca al aire con un contenido de humedad (CH) aproximado de 12 %, en la madera de raleo se obtuvieron valores más bajos para la madera procedente del centro del tronco siendo en la superficie tangencial la de menor valor (214.64 kg), siendo mayor a la que presentó en estado verde.

Para la madera de la zona cercana a la periferia o corteza del tronco, los valores fueron mayores, siendo para la superficie longitudinal la de mayor valor (305.45 kg).

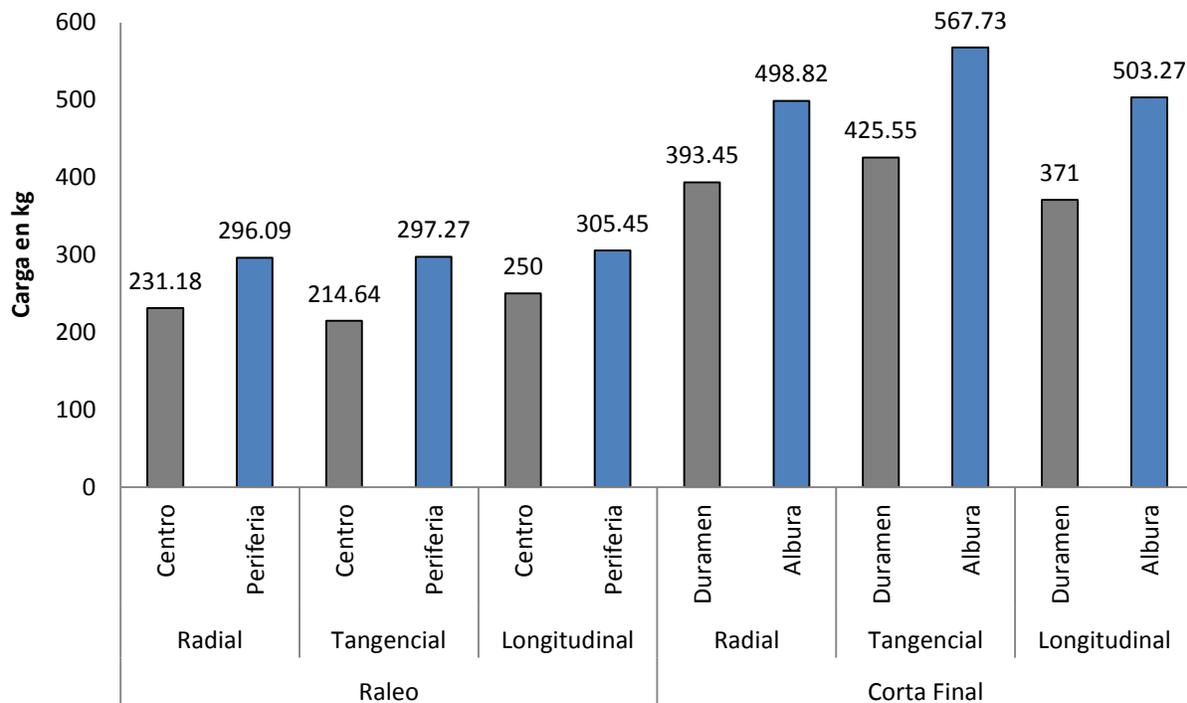


Figura 38. Dureza de la madera en estado seco, en sus superficies radial, tangencial y longitudinal, en madera de raleo y de corta final.

En la madera de corta final, la zona de la albura, presentó los valores más altos en las superficies tangencial (567.73 kg) y longitudinal (503.27 kg), seguida por la radial (498.82 kg). La madera del duramen, presentó su valor más alto en la superficie tangencial (425.55 kg). Se apreció que la madera en estado verde es más blanda que la madera en estado seco, tanto para la madera de raleo como para la madera de corta final.

Para la madera en estado verde, se obtuvo un valor promedio de dureza de 234.18 kg para la madera de raleo y 359.46 kg para la madera de corta final. En estado seco, la madera de raleo obtuvo un valor promedio de 259.795 kg y la madera de corta final un promedio de 471.38 kg.

Según la clasificación propuesta por Coronel (1995), citado por Spavento et al., (2008) para clasificar la madera según su dureza, se puede clasificar a la madera de raleo en estado verde como muy blanda y en estado seco como madera blanda. La madera de corta final se clasifica como madera blanda en estado verde y en estado seco.

El Cuadro 59 (Anexos) contiene el Análisis de Varianza para la prueba de dureza en madera de corta final, el cual mostró que se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las medias del estado de la madera (Cuadro 60 - Anexos), y en las interacciones del estado por la parte de la madera (Cuadro 62 - Anexos).

Se obtuvo un Coeficiente de Variación de 12.54% y un  $R^2$  de 0.92. En la comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera (albura y duramen) no se encontraron diferencias significativas (Cuadro 61 - Anexos).

La figura 39 muestra la comparación múltiple de medias de los estados de la madera de corta final, indicando que existe diferencia significativa entre los estados (letras distintas) obteniéndose una carga media de 471 kg para el estado seco y una carga media de 359 kg para la madera en estado verde. Esto significa que la madera de corta final en estado seco posee un mayor valor de dureza, siendo más fácil de trabajar la madera en estado verde.

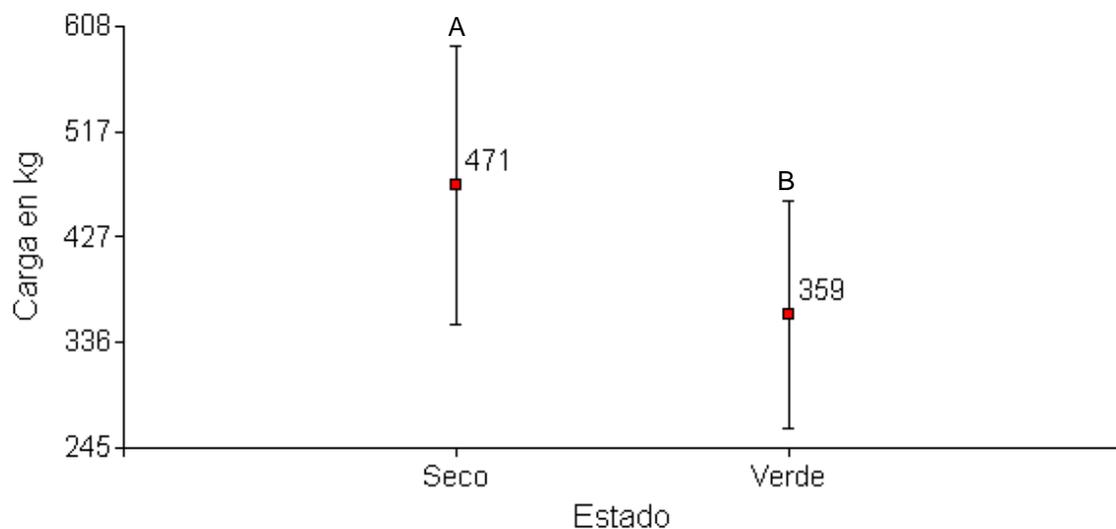


Figura 39. Comparación múltiple de medias de los estados de la madera de cortafinal en el análisis de la prueba de dureza.

La figura 40 corresponde a la comparación múltiple de medias para las partes de la madera, la cual no muestra diferencias significativas entre las dos zonas, presentando para la prueba de dureza la zona de la albura una carga media de 442 kg, mientras que la zona del duramen una carga media de 389 kg.

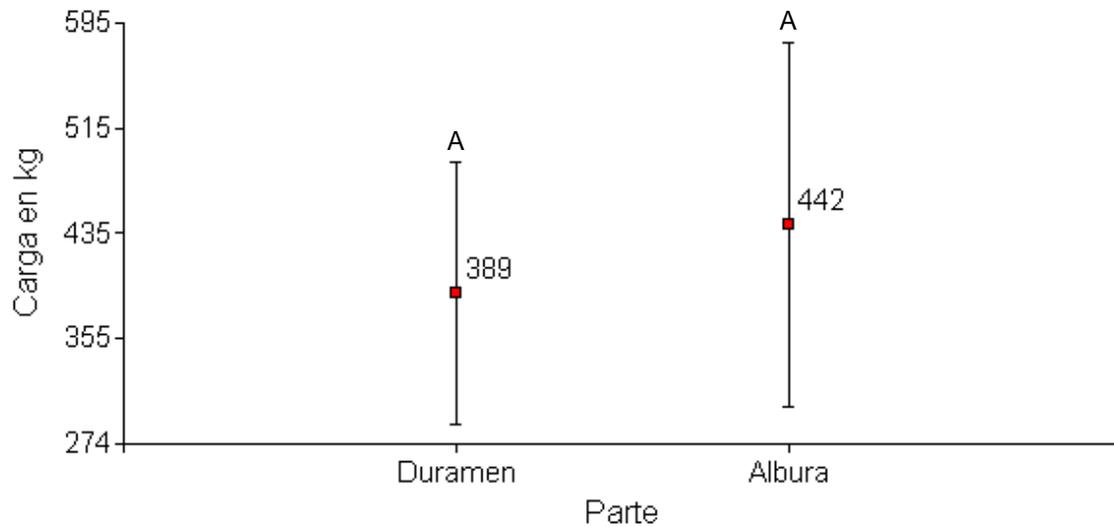


Figura 40. Comparación múltiple de medias de las zonas de la maderade corta final del análisis de la prueba de dureza.

La figura 41 muestra la comparación múltiple de medias de la interacción entre el estado y la zona del fuste de la madera de corta final en la prueba de dureza Janka, la cual indica que solo existe diferencia significativa entre la media de la interacción duramen en estado seco con las otras interacciones, entre las cuales no se logra distinguir diferencias significativas. En estado seco, la albura obtuvo el mayor valor de dureza, con una media de 533 kg, y el duramen un valor de 410 kg. En estado verde, el duramen presentó una media de 369 kg y la albura una media de 350 kg.

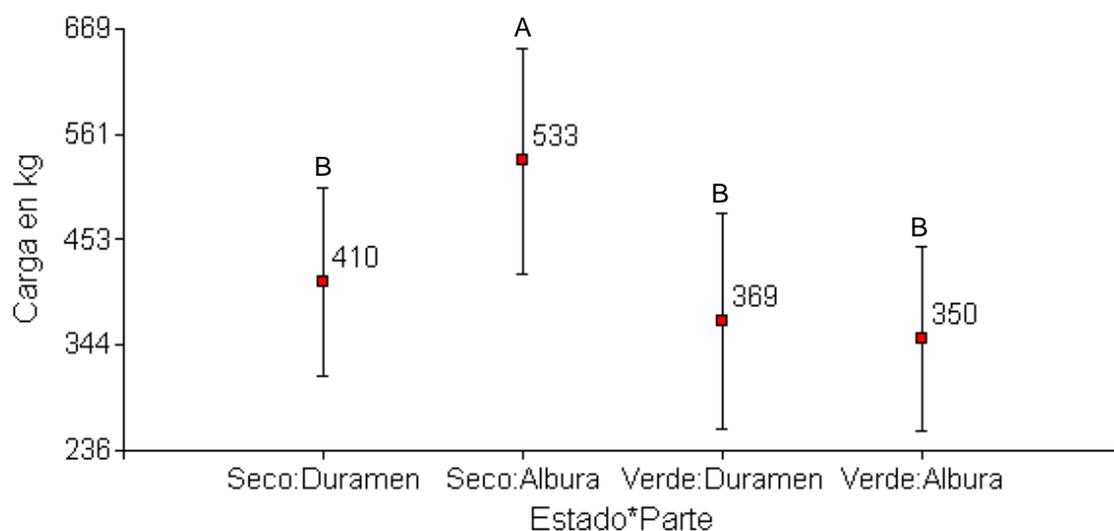


Figura 41. Comparación múltiple de medias en la interacción entre el estado y la zona del fuste de la madera de corta final para la prueba de dureza Janka

El Análisis de Varianza para la prueba de dureza en madera de raleo (Cuadro 87 en sección de Anexos), indica que no se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en la comparación múltiple de medias para el estado verde y seco (Cuadro 88 - Anexos) solamente entre las partes del tronco (Cuadro 89 - Anexos).

La figura 42 indica que para la prueba de dureza Janka no existe diferencia significativa entre los estados de la madera de raleo, obteniéndose una carga media de 260 kg para el estado seco y una carga media de 234 kg para el estado verde.

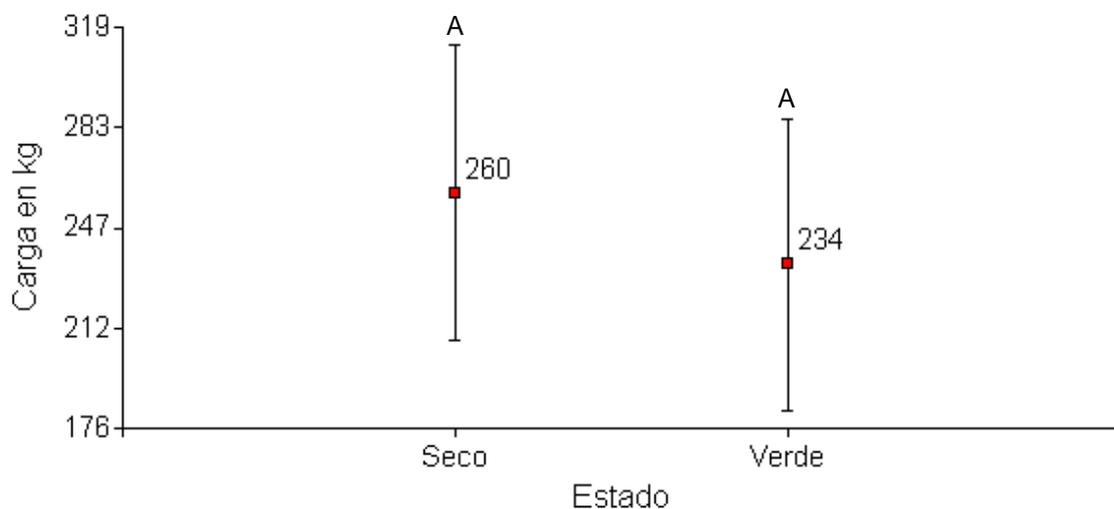


Figura 42. Comparación múltiple de medias del estado de la madera de raleo para la prueba de dureza Janka

Esto significa que la madera de raleo en estado seco posee un mayor valor de dureza, siendo más fácil de trabajar la madera en estado verde.

La figura 43 muestra la comparación múltiple de medias la cual determinó diferencias significativas entre las dos zonas de la madera de raleo, presentando para la prueba de dureza una carga en la zona de la periferia una media de 284 kg, mientras que para la zona central del tronco presenta una media de 210 kg.

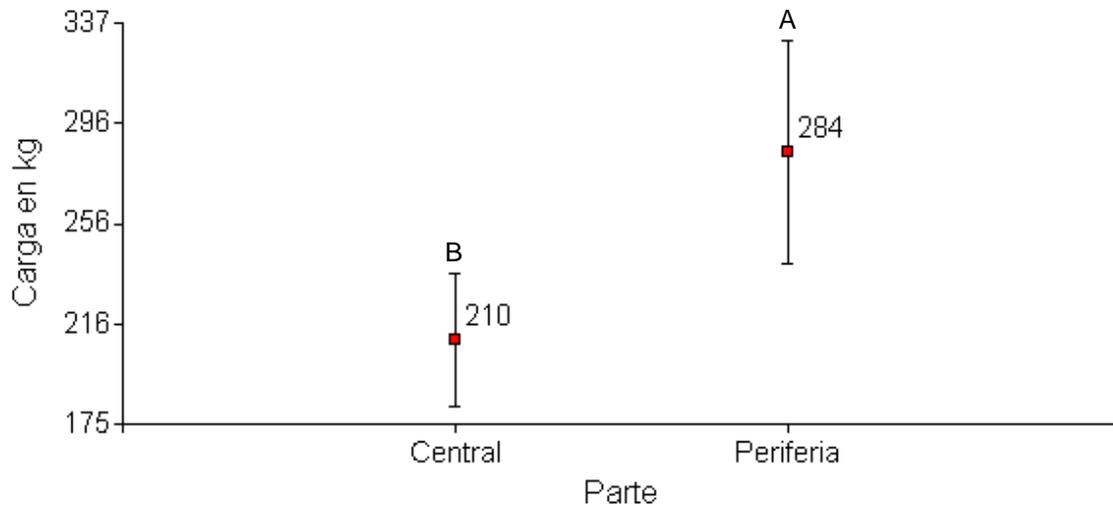


Figura 43. Comparación múltiple de medias de la parte de la madera de raleo para la prueba de dureza

La figura 44 muestra la comparación múltiple de medias de la interacción del estado con la parte de la madera de raleo, la cual indica que no existe diferencia significativa entre las interacciones de las medias de la periferia en estado seco y verde, tampoco existe diferencia significativa entre las medias de la zona central en estado seco y verde (Cuadro 90 - Anexos). Existe diferencia significativa entre las dos partes, madera de la periferia y de la zona central sin importar el estado del contenido de humedad.

La madera de la periferia obtuvo el mayor valor de dureza en estado seco, con una media de 297 kg, y en estado verde obtuvo una media de 272 kg. La madera de la zona central obtuvo su mayor valor con una media de 223 kg en estado seco, y en estado verde, presentó una media de 196 kg.

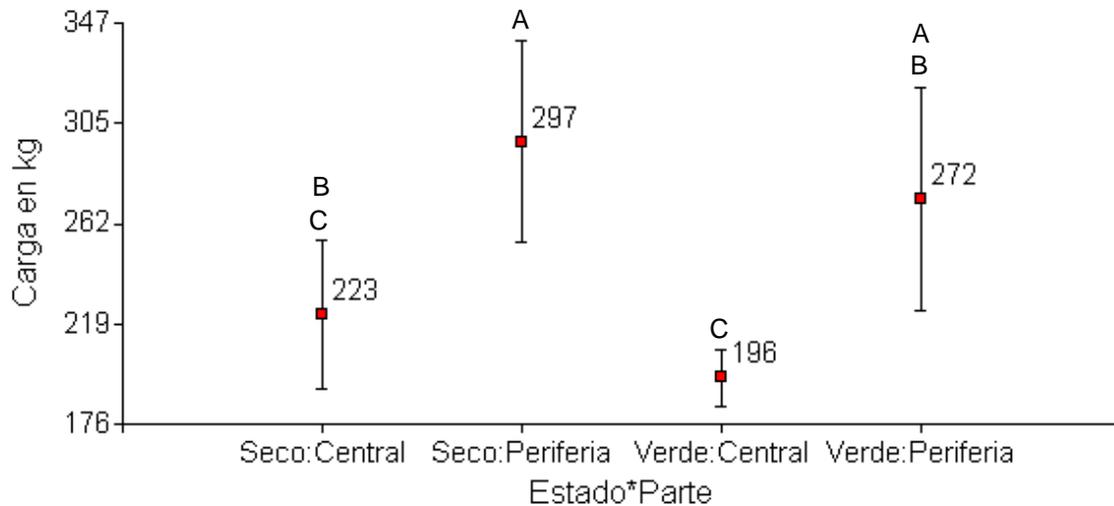


Figura 44. Comparación múltiple de medias de la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo para la prueba de dureza

## 7.2.2 Prueba de Extracción de Clavos

Los clavos son el mecanismo más común para realizar juntas en construcciones de madera. Existen clavos de muchos tipos, tamaños y formas. Los clavos resisten cargas de extracción, cargas laterales o combinaciones de estas dos.

Ambas resistencias son afectadas por la madera, el clavo, y las condiciones de uso. La resistencia de un clavo a ser extraído de una pieza de madera depende de la densidad de la madera, del diámetro del clavo, y de la profundidad de penetración. El estado de la superficie del clavo al momento de ser clavado también influye en la resistencia inicial de la extracción

### 7.2.2.1 Extracción de clavos en madera en estado verde

El Cuadro 43 (Anexos) contiene el resumen de la prueba de extracción de clavos en madera de raleo en estado verde, y el Cuadro 44 (Anexos) contiene el resumen de la prueba de extracción de clavos en madera de corta final en estado verde.

La figura 45 muestra que la madera de corta final presentó mayor resistencia a la extracción de clavos, siendo la madera de la zona de la albura en sus superficies radial y tangencial las que presentaron valores mayores (97.82 kg y 96.36 kg).

En la madera de raleo, la mayor resistencia a la extracción de clavos, la presentó la madera de la zona de la periferia del tronco en la superficie tangencial (68.59 kg) y en la superficie radial, fue la madera de la zona central (65.23 kg).

En las superficies longitudinales (extremos de las piezas), los valores de resistencia fueron los más bajos siendo estos de 22.05 y 21.95 kg para la madera de la zona central y del duramen, en madera de raleo y de corta final respectivamente.

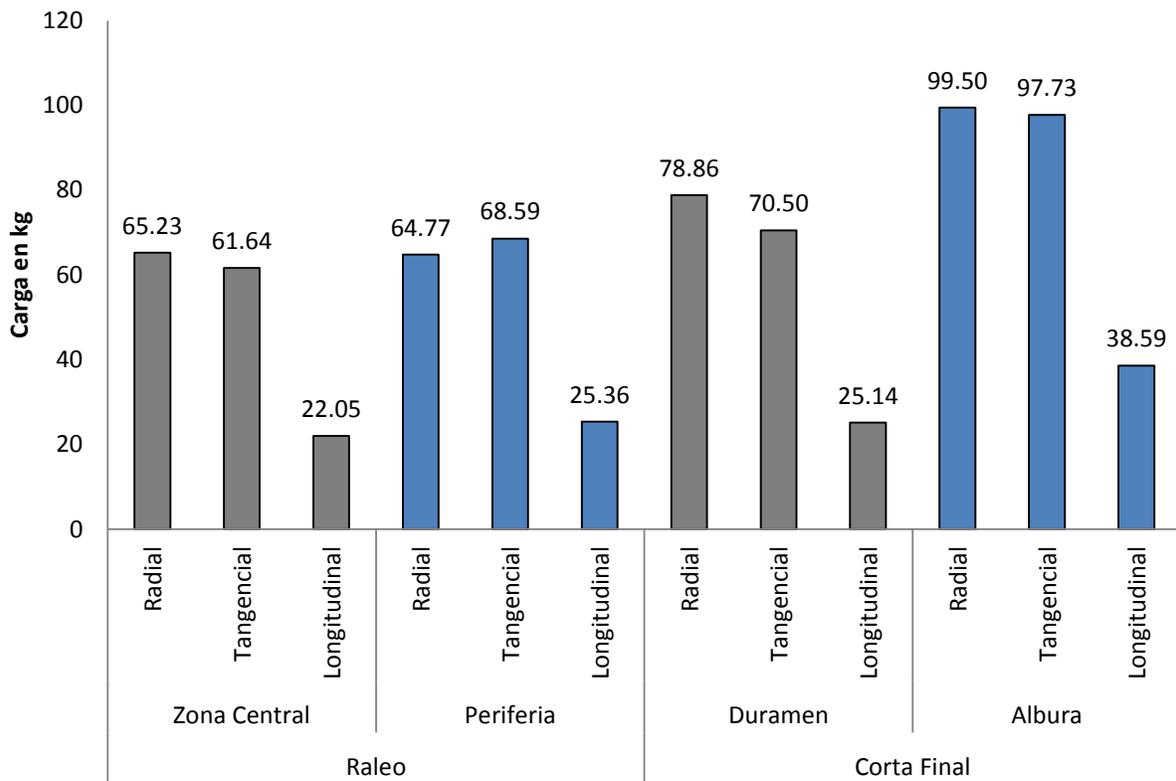


Figura 45. Cargas máximas para la extracción de clavos en madera de raleo y corta final en estado verde, en sus superficies radial, tangencial y longitudinal.

### 7.2.2.2 Extracción de clavos en madera en estado seca

El Cuadro 45 (Anexos) contiene el resumen de la prueba de extracción de clavos en madera de raleo en estado seco y el Cuadro 46 (Anexos) contiene el resumen de la prueba de extracción de clavos en madera de corta final en estado seco. La figura 46 indica que la madera de corta final presentó mayor resistencia a la extracción de clavos,

siendo la madera de la zona de la albura en sus superficies radial y tangencial la que presento valores mayores (81.41 kg y 78.68 kg respectivamente).

En la madera de raleo, la mayor resistencia a la extracción de clavos, la presentó la madera de la zona de la periferia del tronco en la superficie radial (75.77 kg) y en la superficie tangencial (68.68 kg). En las superficies longitudinales (extremos de las piezas), los valores de resistencia fueron los más bajos siendo estos de 33.18 kg para la zona central de la madera de raleo y 27.64 kg para la madera del duramen en la madera de corta final.

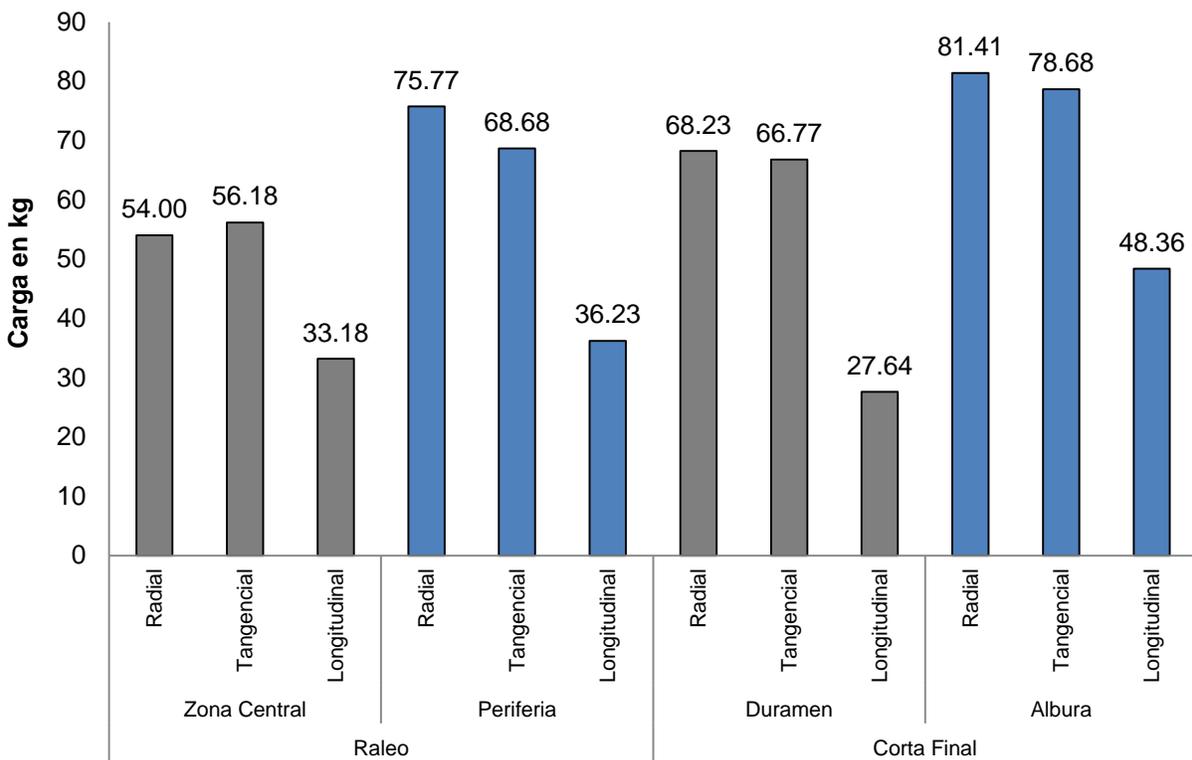


Figura 46. Cargas máximas para la extracción de clavos en madera de raleo y corta final en estado seco (CH = 12 % aproximadamente), en sus superficies radial, tangencial y longitudinal.

El Cuadro 63 (Anexos) contiene la información del Análisis de la varianza para la prueba de extracción de clavos en madera de corta final. En este análisis se encontraron diferencias significativas en sus fuentes de variación.

El Cuadro 64 (Anexos), muestra la comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de corta final para la prueba de extracción de clavos, indica que existe diferencia significativa entre los estados de la madera. La figura 47, muestra que el estado verde de la madera obtuvo un valor promedio de 87 kg y el estado seco un valor promedio de 74 kg.

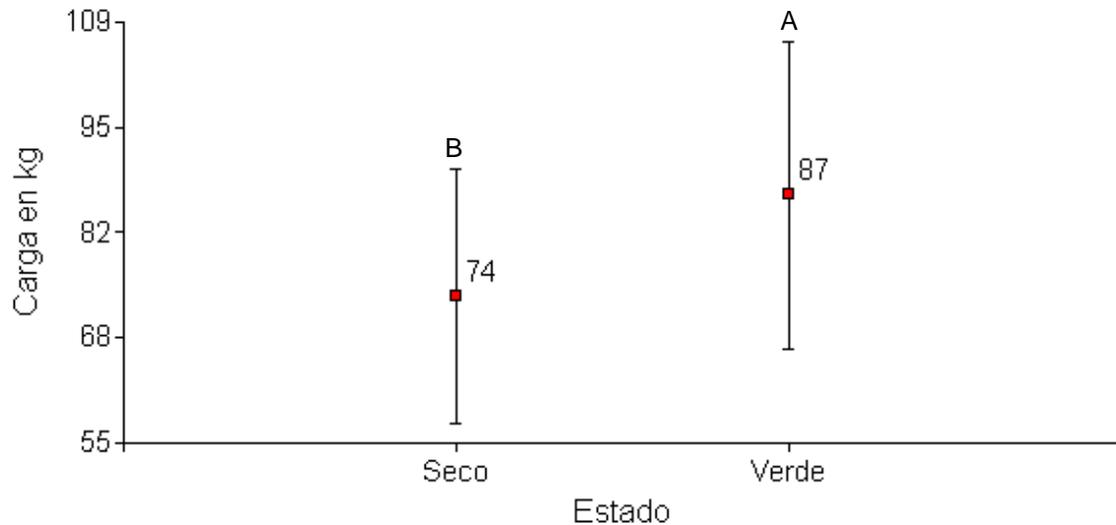


Figura 47. Comparación múltiple de medias de los estados de la madera de corta final en el análisis de extracción de clavos.

El Cuadro 65 (Anexos), contiene la comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de corta final para la prueba de extracción de clavos, e indica que existe diferencia significativa entre las partes de la madera. La figura 48 muestra que la madera de la albura presentó un valor promedio de 89 kg y la madera de duramen un valor promedio de 71 kg.

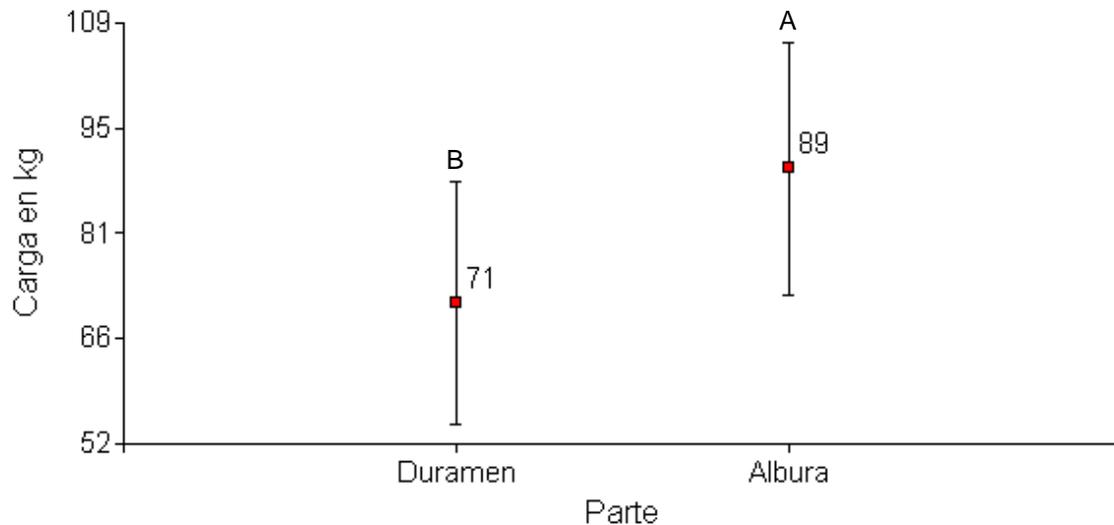


Figura 48. Comparación múltiple de medias de la parte de la madera de corta final en el análisis de extracción de clavos.

El Cuadro 66 (Anexos), muestra la comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para la prueba de extracción de clavos, e indica que existe diferencia significativa entre las distintas interacciones, debido a las diferencias mostradas por el estado y la parte de la madera.

La figura 49, muestra los valores promedios de las interacciones. La madera de albura en estado verde mostró un valor promedio de 99 kg y en estado seco un valor de 80 kg. La madera de duramen en estado verde mostró un valor promedio de 75 kg y en estado seco un valor promedio de 68 kg. La madera de albura mostró una mejor resistencia a la extracción de clavos en ambos estados de la madera.

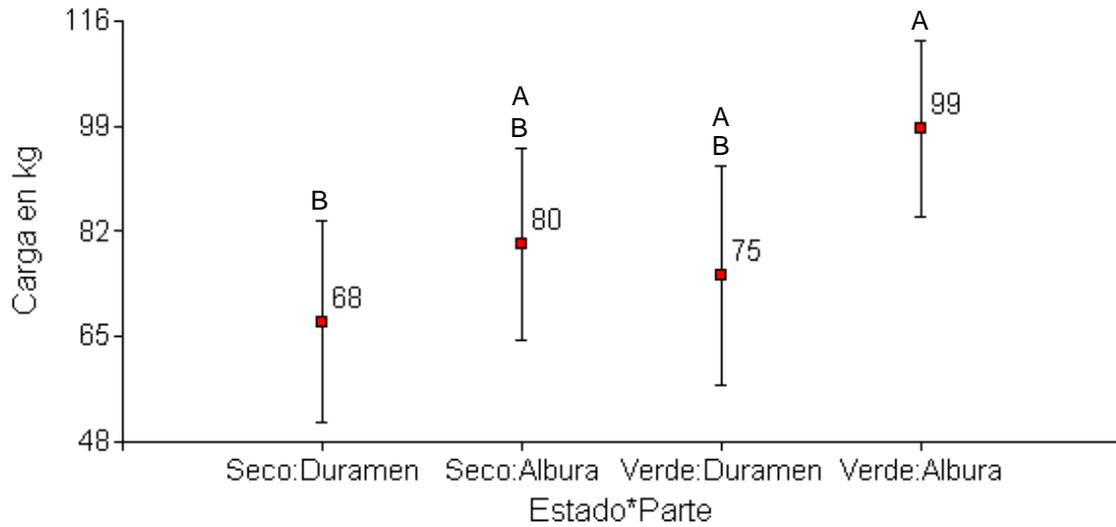


Figura 49. Interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final en la prueba de extracción de clavos

El Cuadro 91 (Anexos), contiene el análisis de la varianza para la prueba de extracción de clavos en madera de raleo. Según el análisis realizado, no existen diferencias significativas en ninguna de sus fuentes de variación.

El Cuadro 92 (Anexos) contiene la comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de raleo en la prueba de extracción de clavos, en el cual no existen diferencias significativas entre los estados de la madera. La figura 50, muestra que la madera de raleo en estado verde, obtuvo un valor promedio de 65 kg, mientras que en estado seco obtuvo un valor promedio de 64 kg.

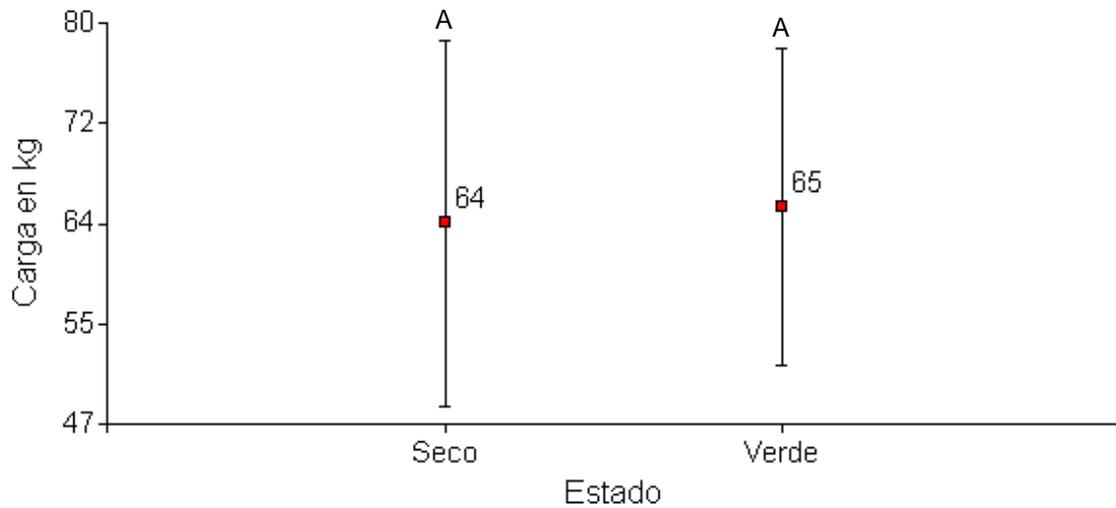


Figura 50. Comparación múltiple de medias de los estados de la madera de raleo en la prueba de extracción de clavos.

El Cuadro 93 (Anexos), contiene la comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de raleo en la prueba de extracción de clavos, el cual indica que no existe diferencia significativa entre las partes de la madera. Según la figura 51, la madera de la periferia obtuvo un valor promedio de 69 kg y la madera de la zona central un valor promedio de 59 kg.

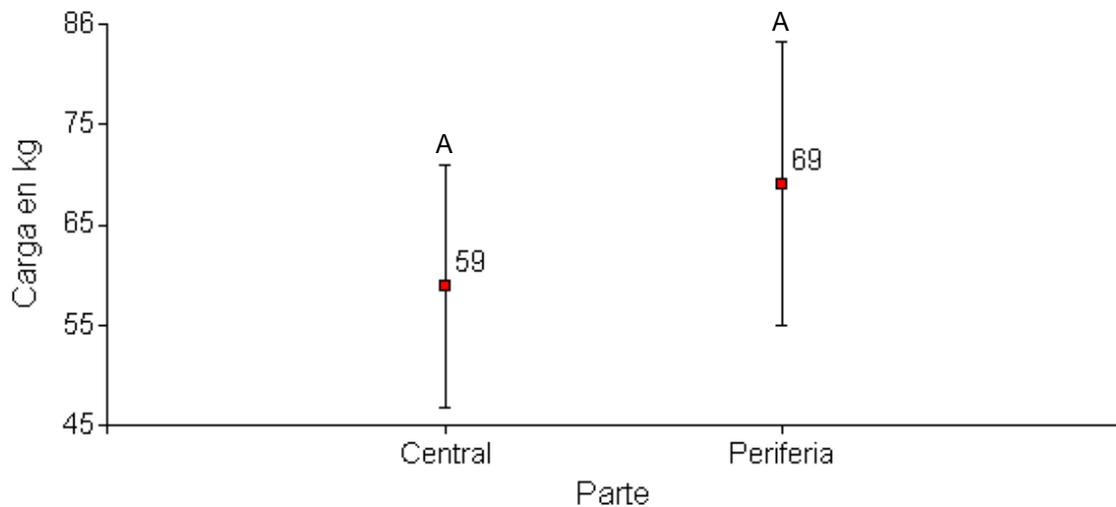


Figura 51. Comparación múltiple de medias de la parte de la madera de raleo en la prueba de extracción de clavos.

El Cuadro 94 (Anexos), contiene la comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en la prueba de extracción de clavos el cual indica que no existe diferencia significativa entre las distintas interacciones.

La figura 52, muestra que la madera de la zona de la periferia obtuvo un valor promedio de 72 kg en estado seco, y en estado verde un valor promedio de 67 kg. La madera de la zona central obtuvo un valor promedio de 63 kg en estado verde y en estado seco un valor promedio de 55 kg.

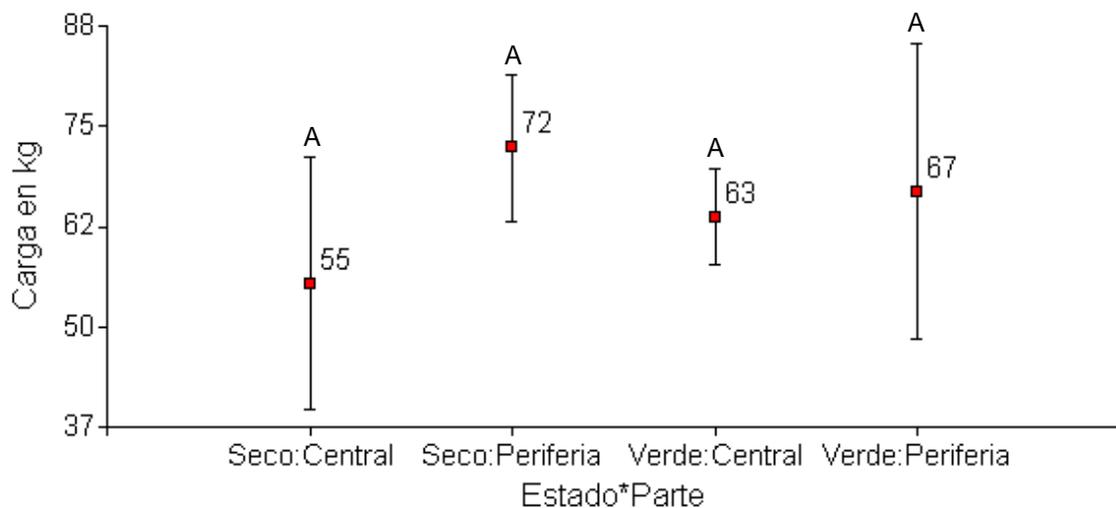


Figura 52. Interacción entre las medias del estado por la parte de la madera de raleo en la prueba de extracción de clavos.

### 7.2.3 Prueba de corte paralelo a la fibra

La prueba de resistencia al corte paralelo a la fibra, determina la capacidad para resistir el deslizamiento interno de una parte de la pieza de madera a otra a lo largo de la fibra al aplicársele una carga externa.

Esta resistencia es debida a la unión o adherencia de las fibras entre, o a través de los anillos anuales. Los valores presentados son la fuerza media en los planos de corte longitudinales (extremos de las piezas).

### 7.2.3.1 Prueba de esfuerzo de corte en madera verde

El Cuadro 47 (Anexos) contiene los resultados de la prueba del esfuerzo de corte en madera de raleo en estado verde y el Cuadro 48 (Anexos) contiene los resultados de la prueba de esfuerzo de corte en madera de corta final en estado verde.

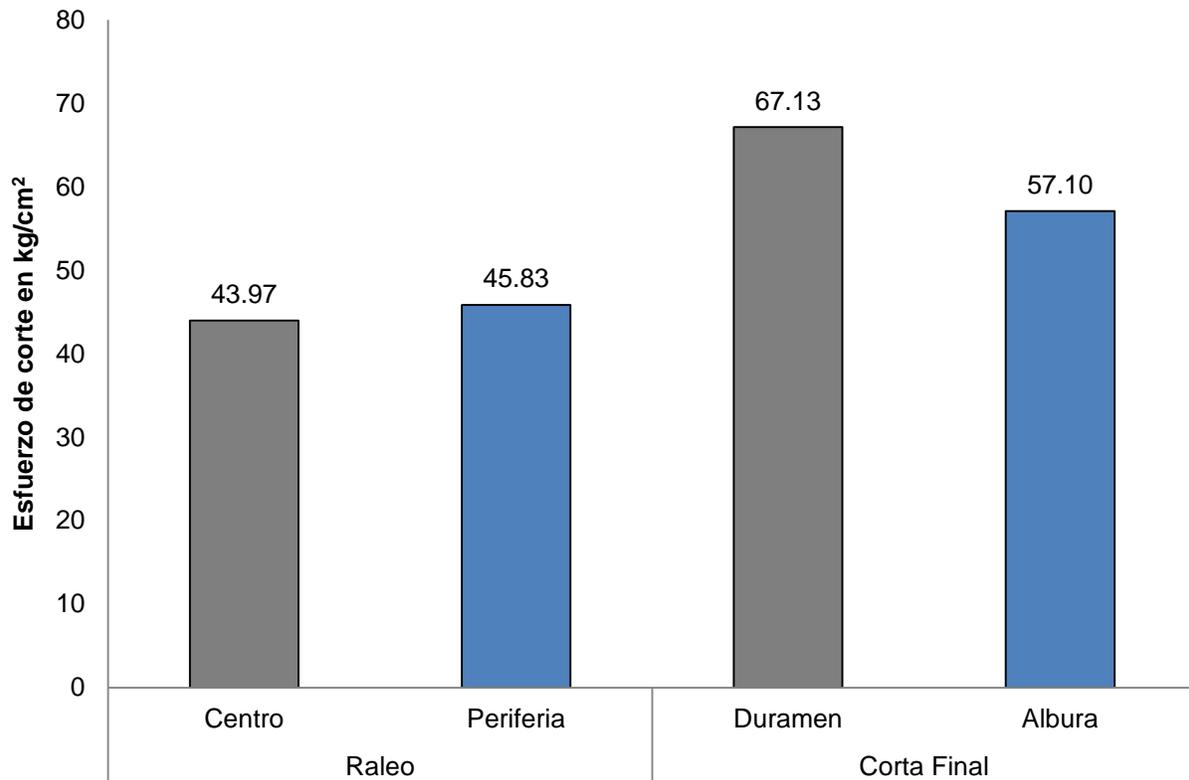


Figura 53. Esfuerzo de corte en madera raleo y corta final en estado verde

Según los resultados observados en la figura 53, la madera de la zona del duramen proveniente de la corta final presenta mejor resistencia al corte, ya que soportó una carga máxima de 67.13 kg/cm<sup>2</sup>, y la de la albura soportó una carga de 57.10 kg/cm<sup>2</sup>.

La madera de la zona de la periferia proveniente del raleo, presentó la mayor resistencia, con una carga máxima de 45.83 kg/cm<sup>2</sup> y la de la zona central soportó una carga de 43.97 kg/cm<sup>2</sup>. La madera de las probetas se encontraba con un CH > 30 %.

### 7.2.3.2 Prueba de Esfuerzo de Corte en Madera Seca

El Cuadro 49 (Anexos) contiene los resultados de la prueba del esfuerzo de corte en madera de raleo en estado seco y el Cuadro 50 (Anexos) contiene los resultados de la prueba de esfuerzo de corte en madera de corta final en estado seco.

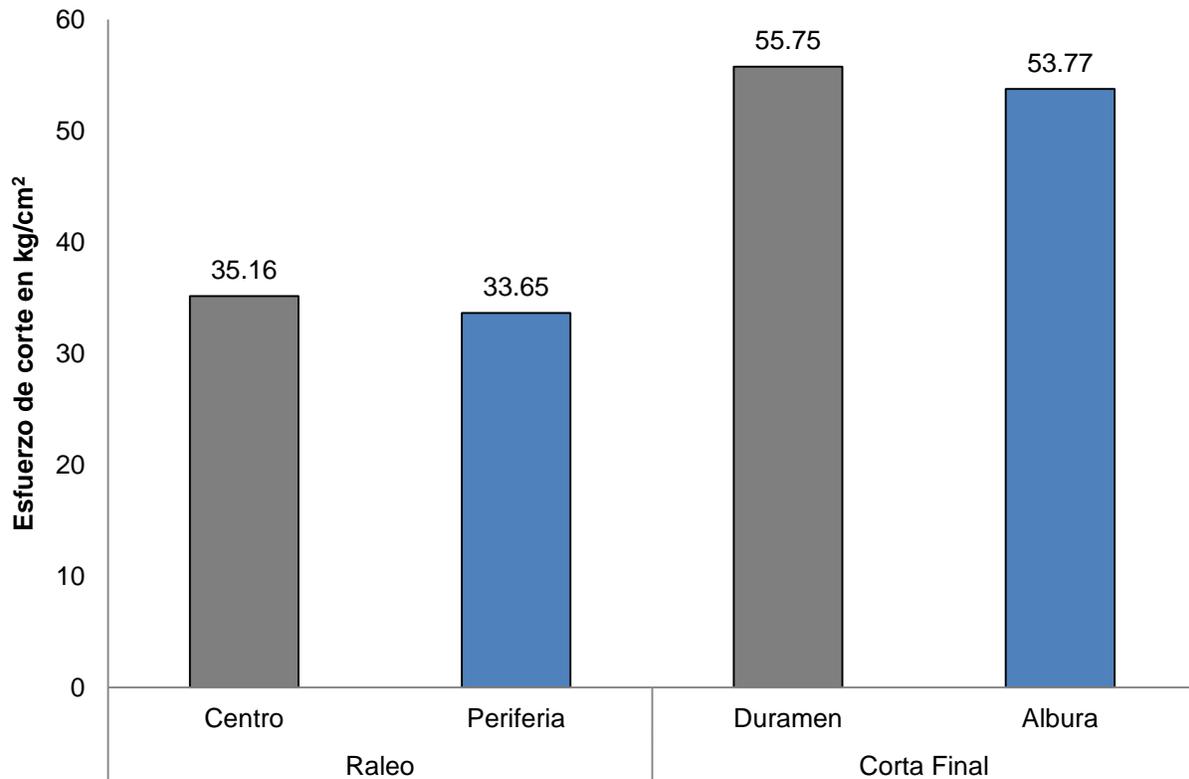


Figura 54. Esfuerzo de corte en madera raleo y corta final en estado seco

Según los resultados observados en la figura 54, la madera de la zona del duramen proveniente de la corta final presenta mejor resistencia al corte, ya que soportó una carga máxima de 55.75 kg/cm<sup>2</sup>, y la de la albura soportó una carga de 53.77 kg/cm<sup>2</sup>.

La madera proveniente del raleo, presentó en la madera de zona central una carga máxima de 35.16 kg/cm<sup>2</sup> y en la zona de la periferia soportó una carga de 33.65 kg/cm<sup>2</sup>. La madera de las probetas se encontraba con un contenido de humedad aproximado de 12 %.

Los valores promedio para el esfuerzo de corte en la madera de raleo son de 44.90 kg en estado verde y 62.11 kg en estado seco. Para la madera de corta final se obtuvieron valores promedio de 34.40 kg en estado verde y 54.76 en estado seco.

Según la clasificación propuesta por Rivero (2004), citado por Spavento et al. (2008), para la clasificación de la resistencia de la madera según el esfuerzo de corte, la madera de raleo y de corta final en estado verde, se clasifica como madera de baja resistencia al esfuerzo de corte. En estado seco, la madera de raleo se clasifica como madera de muy baja resistencia al esfuerzo de corte y la madera de corta final como madera de baja resistencia al esfuerzo de corte.

El Análisis de Varianza del Cuadro 67 (Anexos) para la prueba de corte paralelo a la fibra en madera de corta final, indica que no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en ninguna de las fuentes de variación del análisis.

La figura 55 muestra que según la comparación múltiple de medias del Cuadro 68 (Anexos), no existe diferencia significativa entre los estados de la madera en la prueba del esfuerzo de corte, obteniéndose una media de mayor valor para el estado verde (62  $\text{kg/cm}^2$ ) que para el estado seco (55  $\text{kg/cm}^2$ ). Esto significa que la madera de corta final en estado verde posee mayor resistencia al esfuerzo de corte paralelo a la fibra.

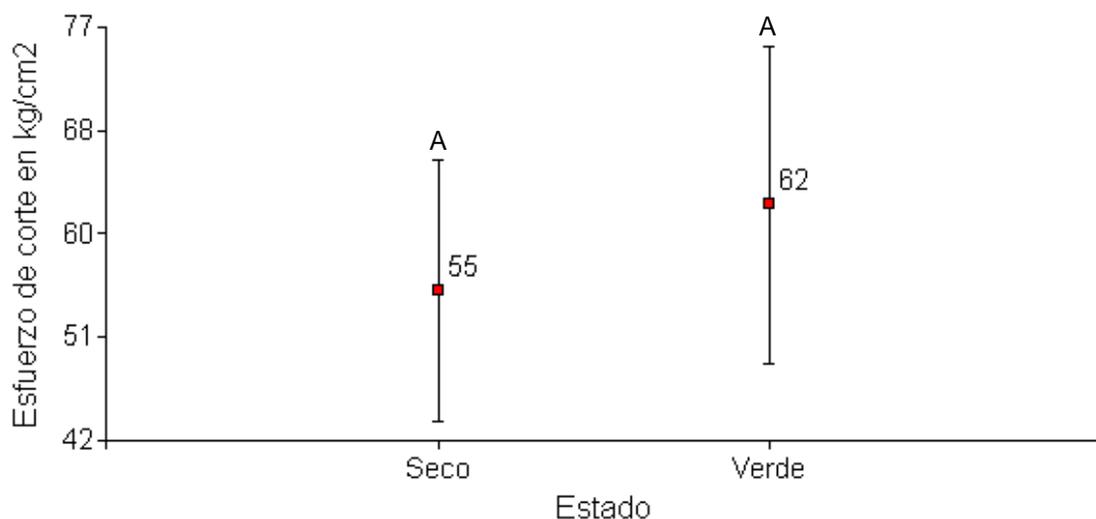


Figura 55. Comparación múltiple de medias del estado de la madera de corta final para la prueba de esfuerzo de corte paralelo a la fibra

La figura 56 muestra la comparación múltiple de medias de las zonas de la madera de corta final, la cual no muestra diferencias significativas entre las dos, presentando para el esfuerzo de corte paralelo a la fibra, la zona del duramen una media de 61 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que la zona la albura presenta una media de 55 kg/cm<sup>2</sup> (Cuadro 69 - Anexos).

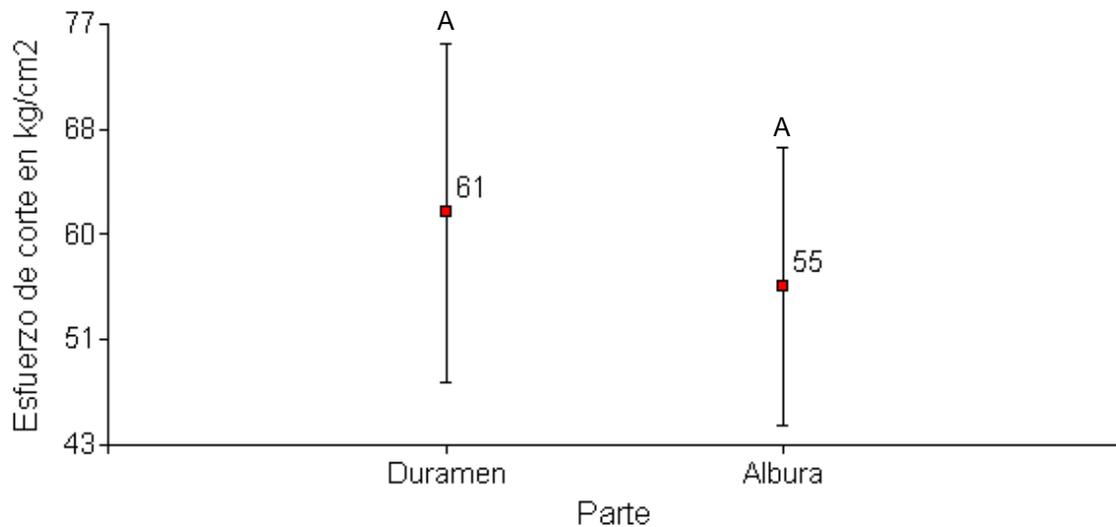


Figura 56. Comparación múltiple de las medias de las partes de la madera de corta final para la prueba del esfuerzo de corte

La figura 57 muestra la comparación múltiple de medias, la cual indica que no existe diferencia significativa entre las interacciones del estado y la zona de la madera para la prueba de corte paralelo a la fibra en madera de corta final (Cuadro 70 - Anexos).

Esto demuestra que las partes de la madera en cualquiera de los estados, son homogéneas en cuanto a la resistencia al esfuerzo de corte que pueden soportar. En estado verde, el duramen obtuvo el mayor valor del esfuerzo de corte, con 67 kg/cm<sup>2</sup>, y la albura un valor de 57 kg/cm<sup>2</sup>. En estado seco, el duramen presentó una media de 56 kg/cm<sup>2</sup> y la albura una media de 54 kg/cm<sup>2</sup>.

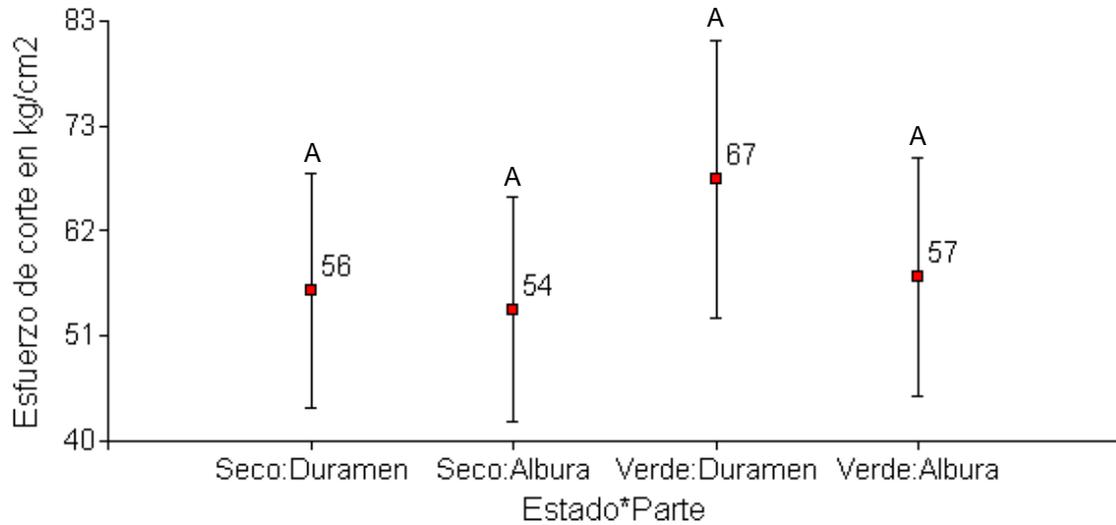


Figura 57. Interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final en la prueba de corte paralelo a la fibra

El Análisis de Varianza para la prueba de corte paralelo a la fibra en madera de raleo (Cuadro 95-Anexos), indica que la única diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) se debe al estado de la madera (contenido de humedad). La figura 58 indica que existe diferencia significativa entre las medias de los estados de la madera de raleo, obteniéndose una media de mayor valor para el estado verde con  $45 \text{ kg/cm}^2$  y para el estado seco una media de  $34 \text{ kg/cm}^2$  (Cuadro 96 - Anexos).

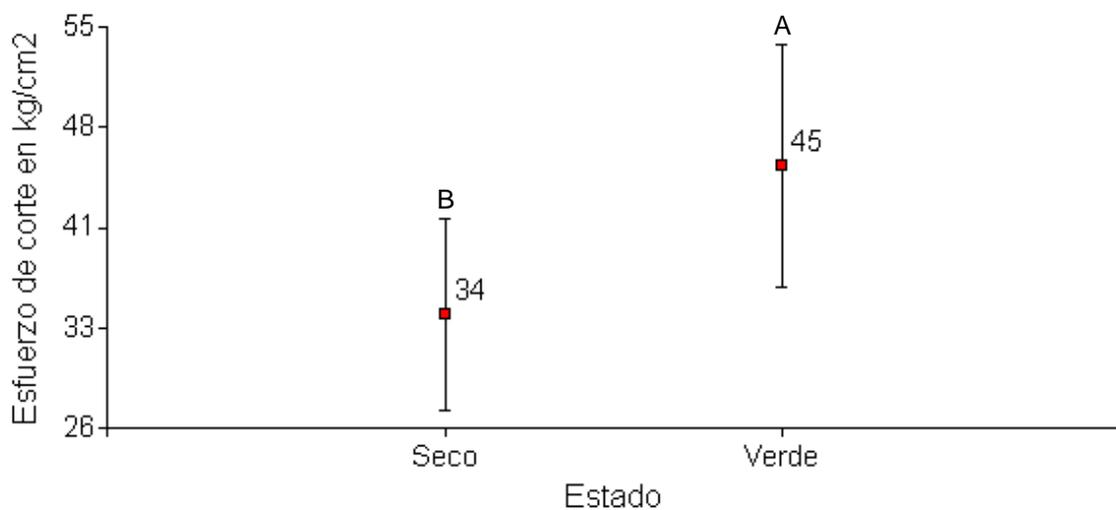


Figura 58. Comparación múltiple de medias de los estados de la madera de raleo para la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra

Esto significa que la madera de raleo en estado verde posee una mayor resistencia al esfuerzo de corte paralelo a la fibra. La figura 59 indica que no existen diferencias significativas entre las dos zonas de la madera, presentando para el esfuerzo de corte paralelo a la fibra, la zona central una media de 40 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que la zona de la periferia presenta una media de 40 kg/cm<sup>2</sup> (Cuadro 97- Anexos).

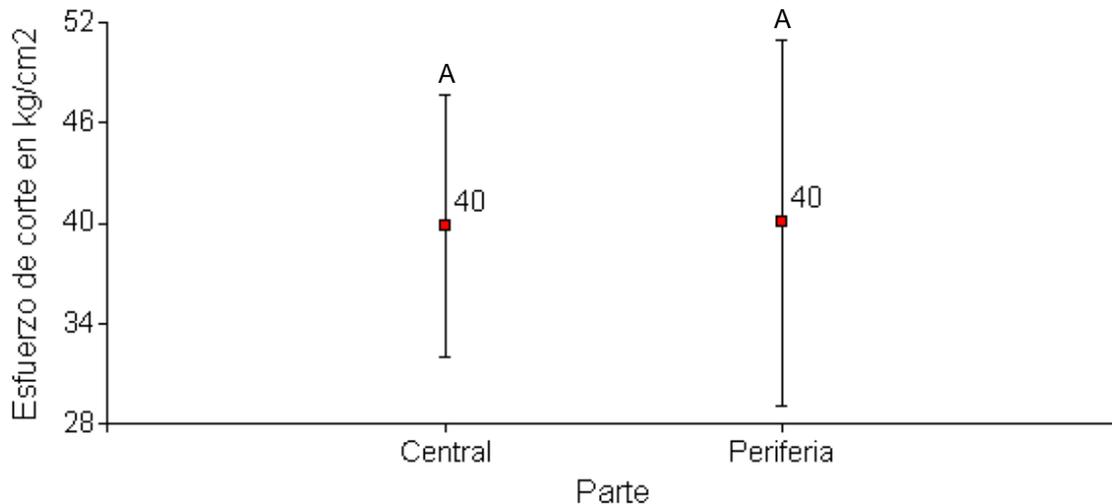


Figura 59. Comparación múltiple de medias de la parte de la madera de raleo para la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra

La figura 60 indica que la diferencia significativa entre las medias de las distintas interacciones del estado y la parte de la madera de raleo para la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra (Cuadro 98 - Anexos) se debe únicamente al estado o contenido de humedad de la madera.

Esto demuestra que las partes de la madera en estado verde, son homogéneas en cuanto a la resistencia al esfuerzo de corte que pueden soportar y presentan medias con valores mayores al estado seco, las cuales también son homogéneas.

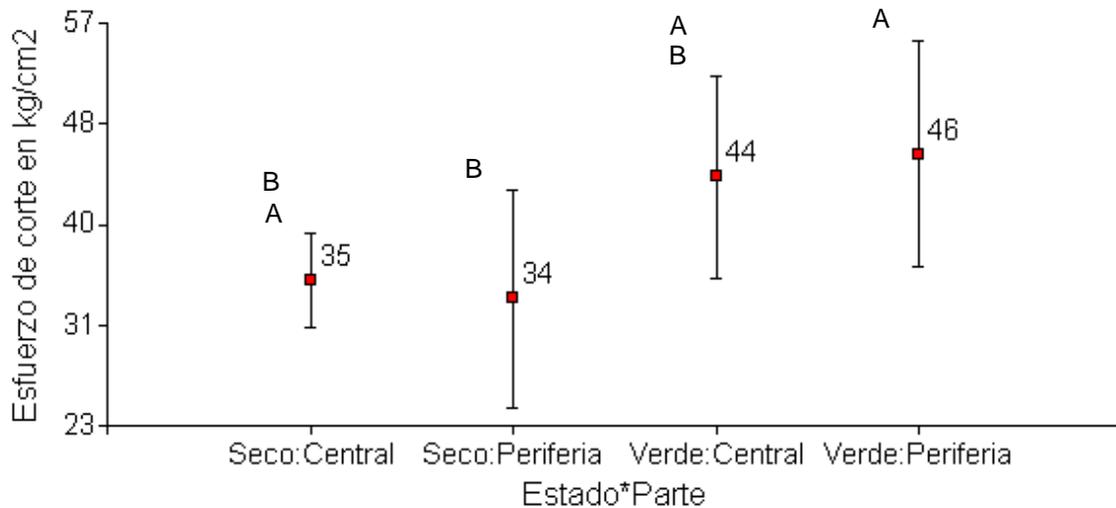


Figura 60. Interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo para la prueba de corte paralelo a la fibra

#### 7.2.4 Flexión Estática

La flexión estática es la resistencia de una viga a una carga puntual, aplicada en el centro de la luz, determinando la tensión en el límite de proporcionalidad, módulo de ruptura y el módulo de elasticidad.

La elasticidad de la madera, implica que las deformaciones producidas por las cargas son totalmente recuperables después de que las cargas se retiran. Cuando se carga a mayores niveles de esfuerzo, se produce la deformación plástica o fallo.

Los tres módulos de elasticidad, que se denotan por EL, ER, y ET, respectivamente, son los módulos de elasticidad a lo largo de los ejes longitudinal (EL), radial (ER) y tangencial (ET) de la madera. Estos módulos se obtienen generalmente a partir de los ensayos de flexión y compresión, sin embargo, los datos de ER y ET no son extensos.

El Módulo de Ruptura refleja la capacidad máxima de carga de un miembro en flexión y es proporcional al momento máximo soportado por la muestra. El Módulo de Ruptura es un criterio aceptado de fuerza, aunque no es un esfuerzo verdadero porque la fórmula por la cual se calcula sólo es válida para el límite elástico.

### 7.2.4.1 Prueba de flexión estática en madera verde

El Cuadro 51 (Anexos), contiene los datos obtenidos para el Módulo de Ruptura y el Módulo de Elasticidad en la prueba de flexión estática de la madera de raleo y de corta final en estado verde.

Según los resultados observados en la figura 61, en la prueba de flexión estática, la madera de la zona central del tronco proveniente del raleo, presenta el menor valor del Módulo de Ruptura MOR, con un valor de  $217.741 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que la madera de la zona de la albura proveniente de la corta final, presentó el mayor valor del MOR, con  $490.648 \text{ kg/cm}^2$ . La madera de las probetas se encontraba con un contenido de humedad  $> 30 \%$ .

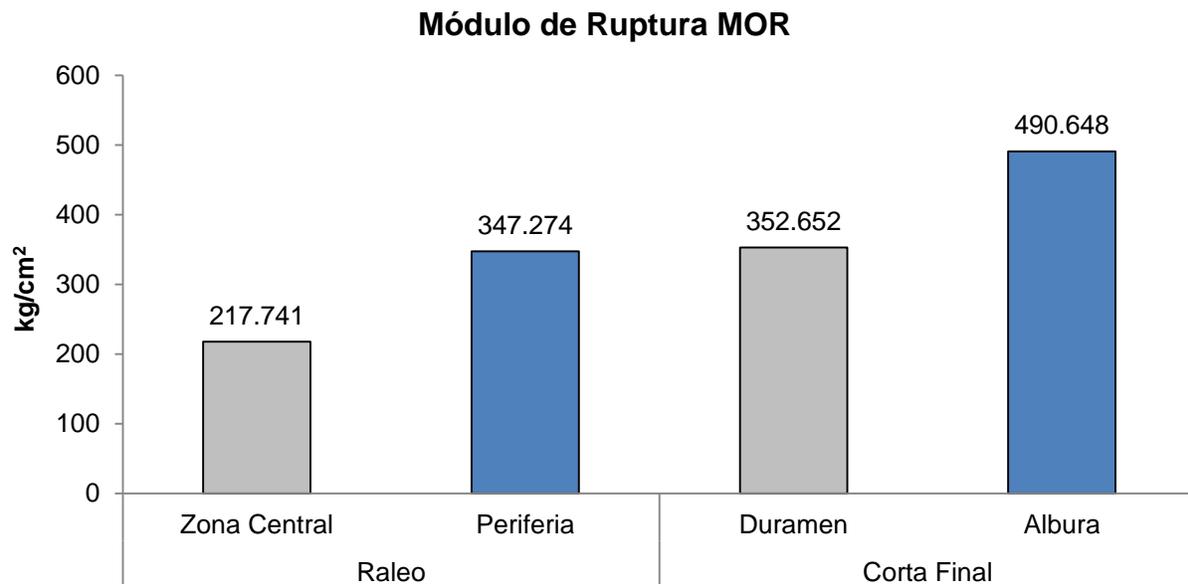


Figura 61. Módulo de ruptura de la prueba de flexión estática en madera raleo y corta final en estado verde

Según la figura 62, la madera de la zona central del tronco proveniente del raleo, presenta el menor valor del Módulo de Elasticidad MOE, con un valor de  $44028.644 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que la madera de la zona del duramen proveniente de la corta final, presentó el mayor valor del MOE, con  $144482.114 \text{ kg/cm}^2$ . La madera de las probetas se encontraba con un contenido de humedad  $> 30 \%$ .

### Módulo de Elasticidad MOE

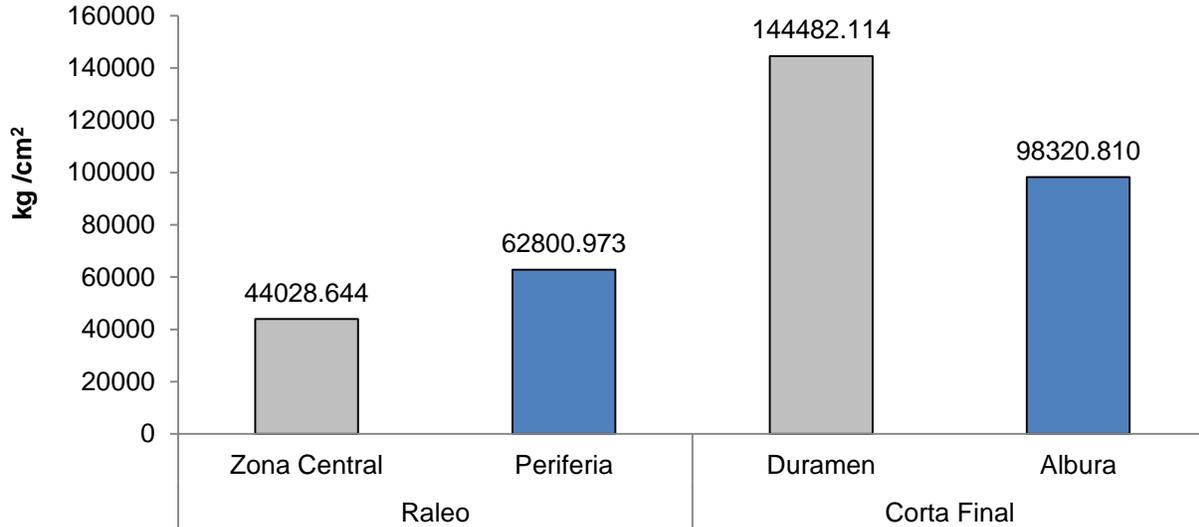


Figura 62. Módulo de elasticidad de la prueba de flexión estática en madera raleo y corta final en estado verde

Durante la realización de esta prueba, se tuvo el inconveniente de que muchas de las probetas utilizadas no estaban completamente limpias, es decir, libres de defectos, ya que dentro de ellas existían nudos, los cuales causan que las fibras del tronco rodeen las fibras del nudo, dando lugar a una desviación de la fibra muy localizada. Esto trae como consecuencia, que el entorno del nudo se convierta en un punto débil de la pieza. Este problema de los nudos se tuvo tanto en la madera de raleo como en la de corta final.

#### 7.2.4.2 Prueba de Flexión Estática en Madera Seca

El Cuadro 52 (Anexos), contiene los datos obtenidos sobre el Módulo de Ruptura y el Módulo de Elasticidad en la prueba de flexión estática para la madera de raleo y de corta final en estado seco.

Los resultados del Módulo de Ruptura en flexión estática en madera en estado seco mostrados en la figura 63, indican que la madera de raleo en la zona de la periferia, y la madera de corta final en la albura presentan los valores más altos.

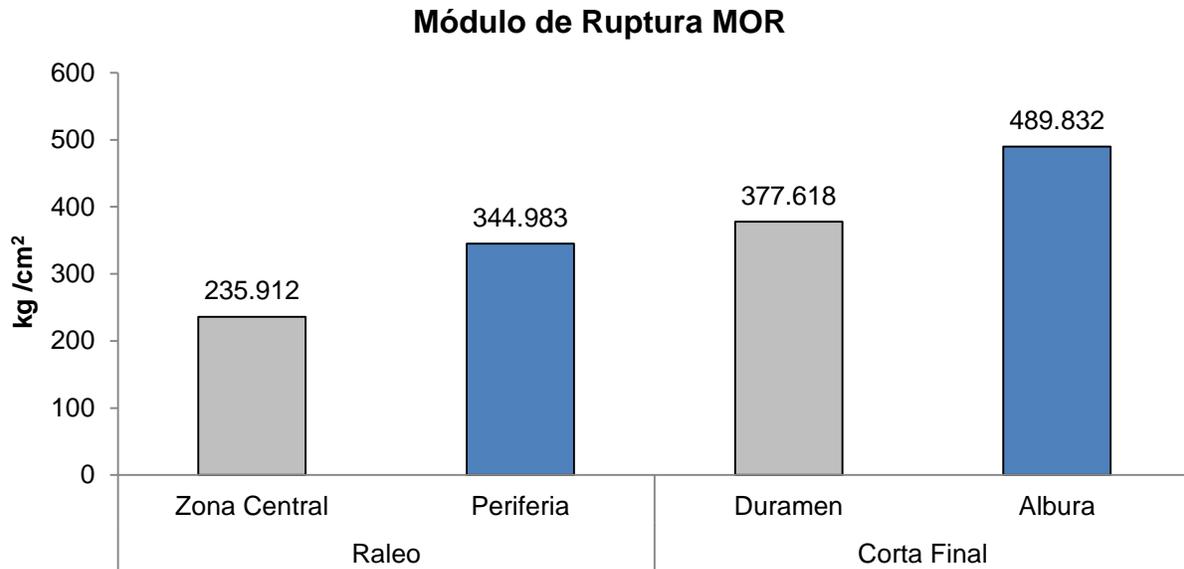


Figura 63. Módulo de ruptura de la prueba de flexión estática en madera raleo y corta final en estado seca

En la madera del raleo, la zona central presentó un valor de 235.912 kg/cm<sup>2</sup>, y la de la periferia 344.983 kg/cm<sup>2</sup>. En la madera de corta final, el duramen presentó un valor de 377.618 kg/cm<sup>2</sup> y la de la albura 489.832 kg/cm<sup>2</sup>.

Los valores correspondientes al Módulo de Elasticidad MOE de la prueba de flexión estática en madera raleo y corta final en estado seca mostrados en la figura 64, presentan mayores valores en la madera correspondiente a la corta final, siendo la de la albura la que tiene un valor de 101292.926 kg/cm<sup>2</sup>, y la del duramen 97810.901 kg/cm<sup>2</sup>. La madera del raleo, presenta su mayor valor en la madera de la periferia del tronco, con 89683.631 kg/cm<sup>2</sup>, y la madera de la zona central con 60683.249 kg/cm<sup>2</sup>.

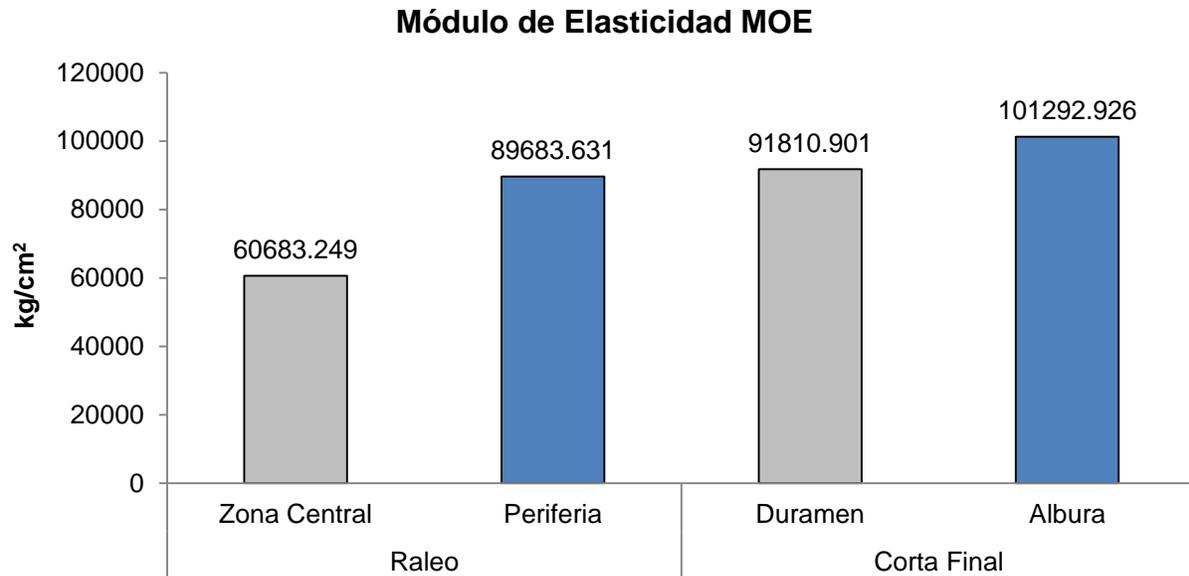


Figura 64. Módulo de elasticidad de la prueba de flexión estática en madera raleo y corta final en estado seca

Se obtuvieron valores promedio para el Módulo de Ruptura MOR para la madera de raleo en estado verde de  $282.507 \text{ kg/cm}^2$  y en estado seco de  $290.447 \text{ kg/cm}^2$ . Para la madera de corta final, se obtuvieron valores promedio de  $421.65 \text{ kg/cm}^2$  para el estado verde y  $433.725 \text{ kg/cm}^2$  para el estado seco.

Según la clasificación de la madera según los valores de flexión estática propuesta por Rivero (2004), citado por Spavento et al. (2008), la madera de raleo y de corta final en estado verde y en estado seco se clasifican como madera con Módulo de Ruptura MOR en flexión muy bajo.

En relación al Módulo de Elasticidad MOE en flexión, se obtuvieron valores promedio para la madera de raleo de  $53414.808 \text{ kg/cm}^2$  en estado verde y  $75183.44 \text{ kg/cm}^2$  en estado seco. Para la madera de corta final, se obtuvieron valores promedio de  $121401.46 \text{ kg/cm}^2$  en estado verde y  $96551.913 \text{ kg/cm}^2$  para el estado seco.

Según estos valores, la madera de raleo en estado verde y seco se clasifica como madera con MOE en flexión muy bajo. La madera corta final en estado verde se

clasifica como madera con MOE en flexión medio, mientras que en estado seco se clasifica como madera con MOE en flexión muy bajo.

El Análisis de Varianza del módulo de elasticidad para la prueba de flexión estática en madera de corta final (Cuadro 71 - Anexos), indica que no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en ninguna de las fuentes de variación del análisis para la madera de corta final.

La comparación múltiple de medias del Cuadro 72 (Anexos), representado en la figura 65, indica que no existe diferencia significativa entre las medias de los estados de la madera de corta final para el Módulo de Elasticidad en flexión estática, obteniéndose una media de 121401  $\text{kg/cm}^2$  para el estado verde y para el estado seco un valor promedio de 96552  $\text{kg/cm}^2$ .

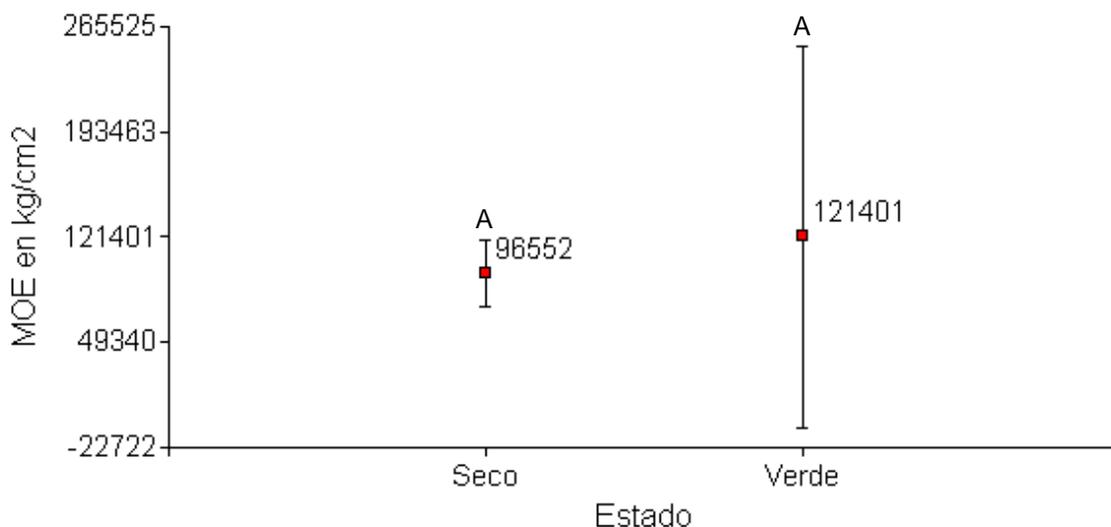


Figura 65. Análisis del Módulo de Elasticidad MOE de la madera de corta final para la prueba de flexión estática según su estado

Esto significa que la madera de corta final en estado verde posee una mayor resistencia a la flexión estática, debido a que sus fibras no se rompen.

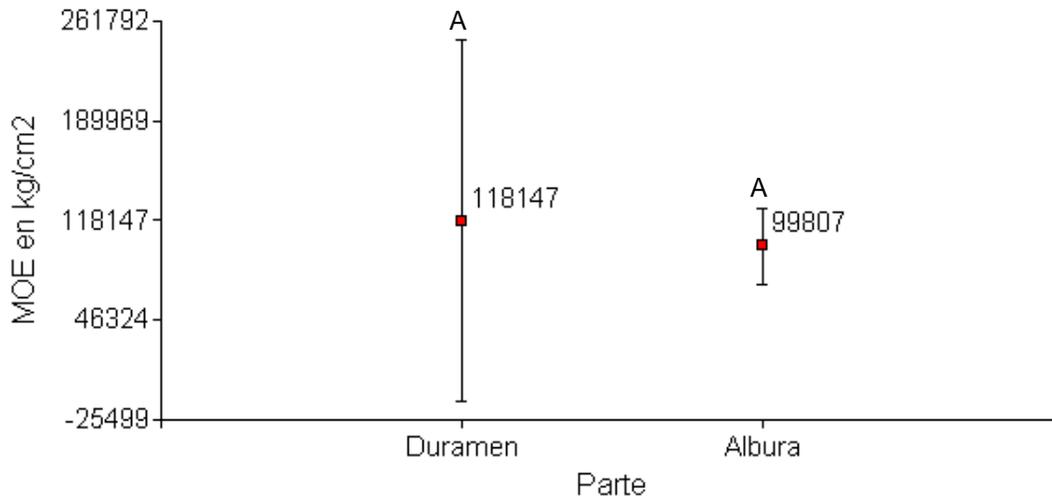


Figura 66. Análisis de la parte de la madera de corta final para el Módulo de Elasticidad en la prueba de flexión estática

Según la figura 66, la comparación múltiple de medias no muestra diferencias significativas entre las dos zonas de la madera, presentando para el Módulo de Elasticidad la zona del duramen una media de 118147 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que la zona la albura presenta una media de 99807 kg/cm<sup>2</sup> (Cuadro 73 - Anexos).

La comparación múltiple de medias representada en la figura 67, indica que no existe diferencia significativa entre las medias de las distintas interacciones del estado por la parte de la madera (Cuadro 74 - Anexos). Esto indica que las secciones de la madera en cualquiera de los estados, son homogéneas en lo que se refiere a la resistencia a la flexión estática que pueden soportar.

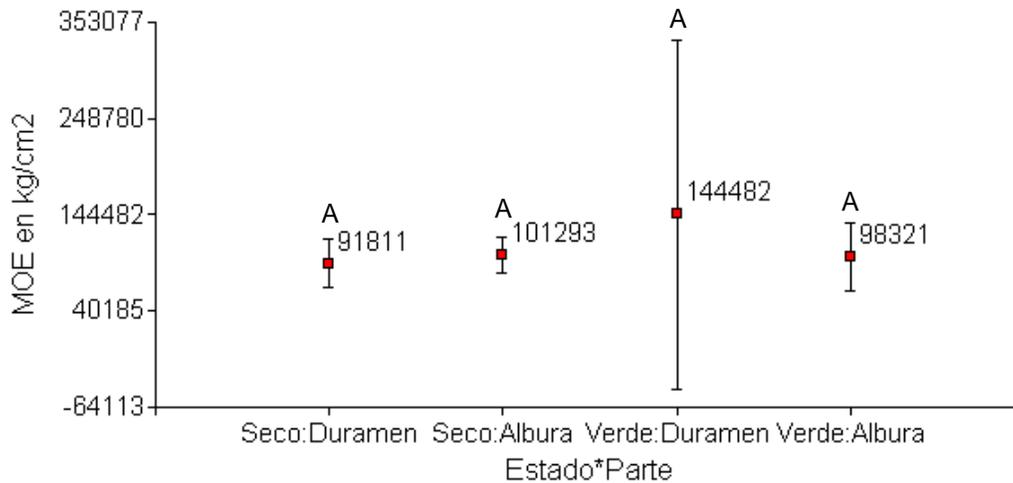


Figura 67. Análisis de la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para el módulo de elasticidad en la prueba de flexión estática

En estado verde, el duramen obtuvo el mayor valor del MOE, con 144482 kg/cm<sup>2</sup>, y la albura un valor de 98321 kg/cm<sup>2</sup>. En estado seco, la albura presentó una media de 101293 kg/cm<sup>2</sup> y el duramen 91811 kg/cm<sup>2</sup>.

El Cuadro del Análisis de Varianza del Módulo de Elasticidad para la prueba de flexión estática en madera de raleo (Cuadro 99 - Anexos), indica que no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en ninguna de las fuentes de variación del análisis para la madera de raleo.

La figura 68, muestra la comparación múltiple de medias, la cual indica que no existe diferencia significativa entre las medias de los estados de la madera de raleo, obteniéndose una media de mayor valor para el estado seco con 75183 kg/cm<sup>2</sup> y para el estado verde 53415 kg/cm<sup>2</sup> (Cuadro 100 - Anexos).

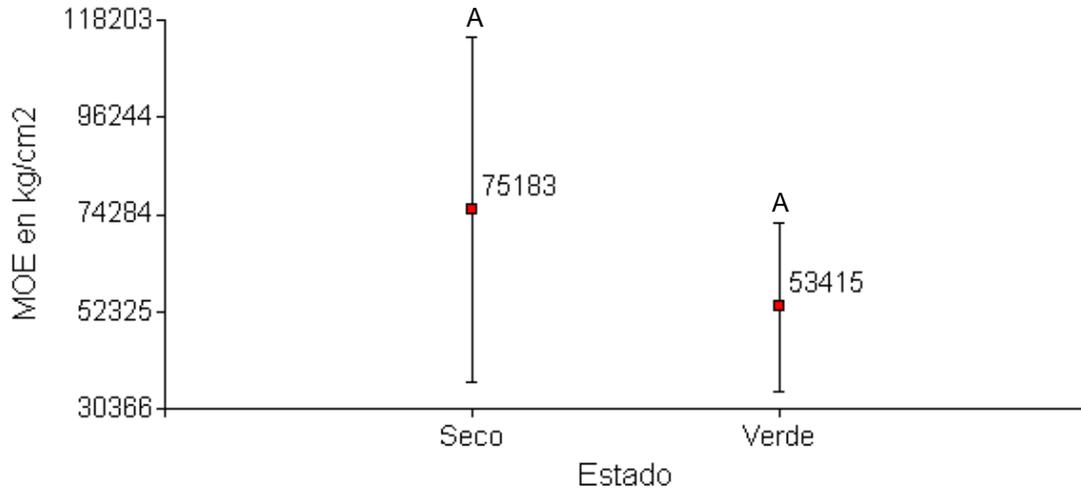


Figura 68. Análisis del Módulo de Elasticidad MOE según el estado de la madera de raleo para la prueba de flexión estática

La comparación múltiple de medias mostrada en la figura 69, indica que existen diferencias significativas entre las dos zonas de la madera, presentando para el Módulo de Elasticidad la zona central una media de 52356 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que la zona de la periferia presenta una media de 76242 kg/cm<sup>2</sup> (Cuadro101 - Anexos).

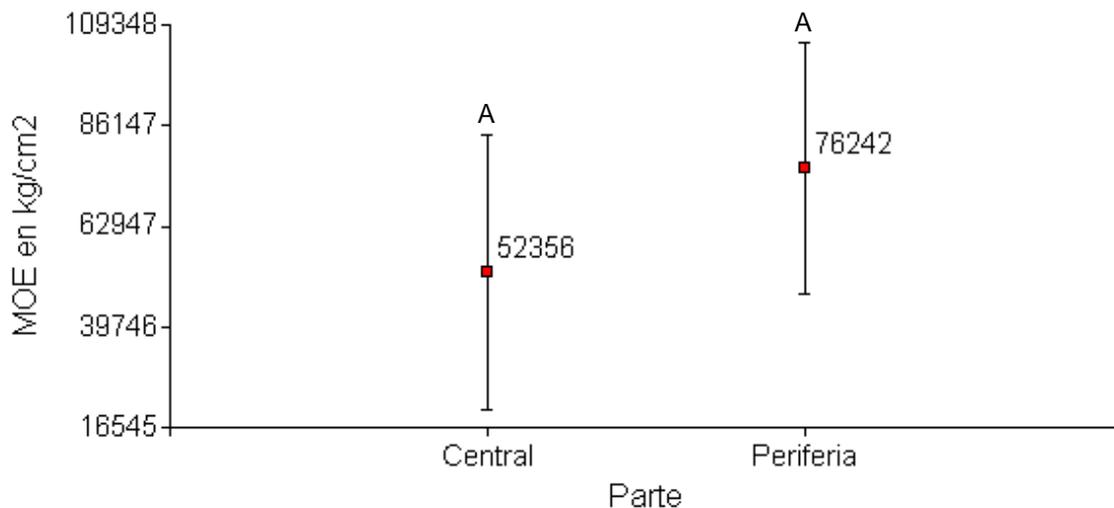


Figura 69. Análisis de la parte de la madera de raleo en el Módulo de Elasticidad para la prueba de flexión estática

La comparación múltiple de medias mostradas en la figura 70, indica que no existe diferencia significativa entre las medias de las distintas interacciones entre el estado y

la parte de la madera (Cuadro 102 - Anexos). Esto demuestra que las partes de la madera en cualquiera de los estados, son homogéneas en lo que se refiere al Módulo de Elasticidad en flexión estática.

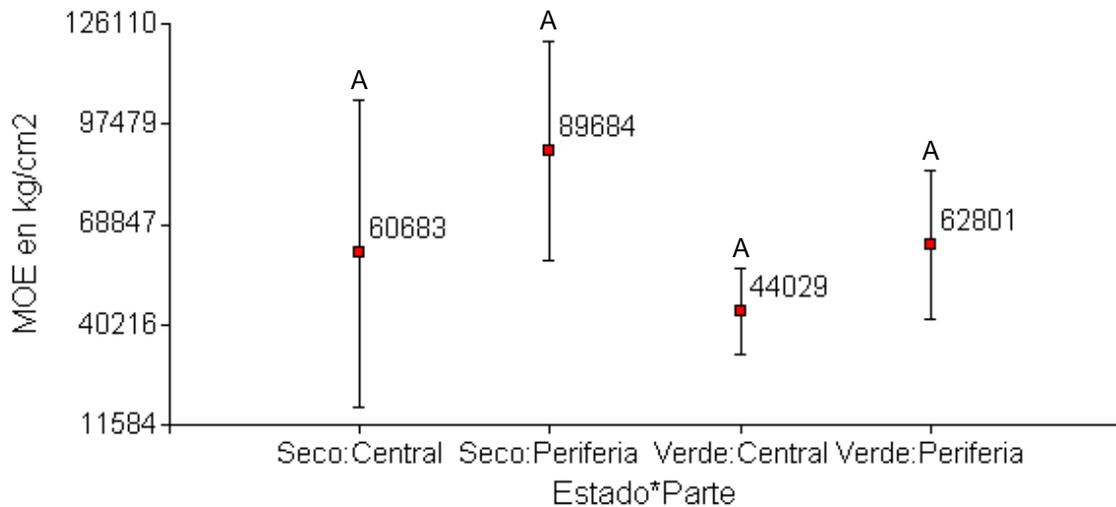


Figura 70. Análisis de la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en el Módulo de Elasticidad para la prueba de flexión estática

En este análisis, la madera de la zona de la periferia presentó los valores medios más altos, siendo para el estado seco de 89683.63 kg/cm<sup>2</sup> y en estado verde de 62800.97 kg/cm<sup>2</sup>, la zona central en estado seco obtuvo un valor medio de 60683.25 kg/cm<sup>2</sup>, y en estado verde presentó una media de 44028.64 kg/cm<sup>2</sup>.

El Cuadro 75 (Anexos), contiene el análisis de la varianza del módulo de ruptura para la prueba de flexión estática en madera de corta final, el cual indica que se encontraron diferencias significativas en sus fuentes de variación.

El Cuadro 76 (Anexos), muestra la comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco del módulo de ruptura de la madera de corta final para la prueba de flexión estática, el cual indica que no existe diferencia significativa entre los estados de la madera. Según la figura 71, se obtuvo un valor promedio de 434 kg/cm<sup>2</sup> para la madera en estado seco, y un valor promedio de 422 kg/cm<sup>2</sup> para la madera en estado verde.

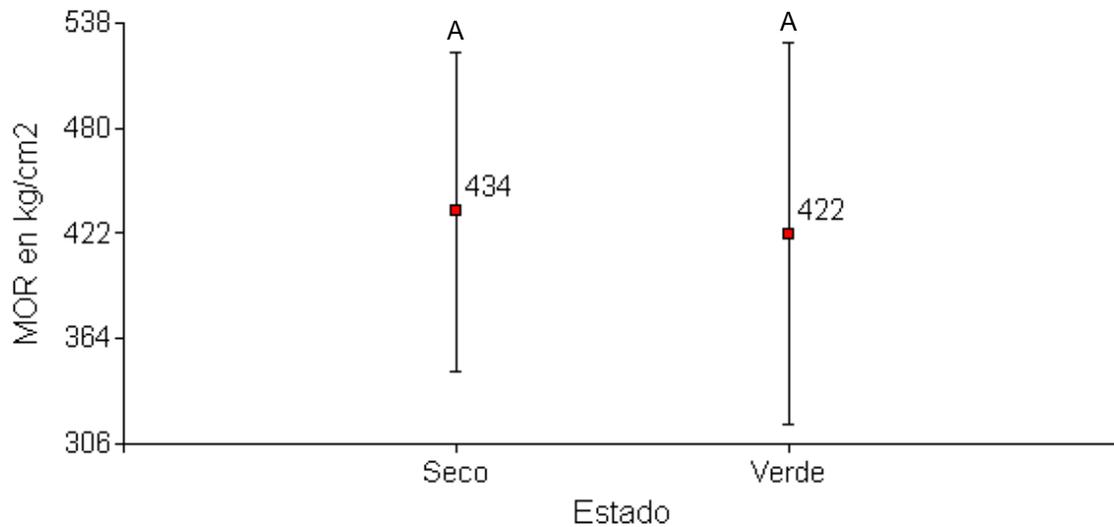


Figura 71. Análisis del Módulo de Ruptura MOR según el estado de la madera de corta final para la prueba de flexión estática

El Cuadro 77 (Anexos), contiene la comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de corta final para el módulo de ruptura en la prueba de flexión estática, el cual indica que existe diferencia significativa entre las partes de la madera.

La figura 72 indica que la madera de la zona de la albura obtuvo un valor promedio de 490 kg/cm<sup>2</sup> y para la madera de duramen se obtuvo un valor promedio de 365 kg/cm<sup>2</sup>.

El Cuadro 78 (Anexos), contiene la comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para el módulo de ruptura en la prueba de flexión estática.

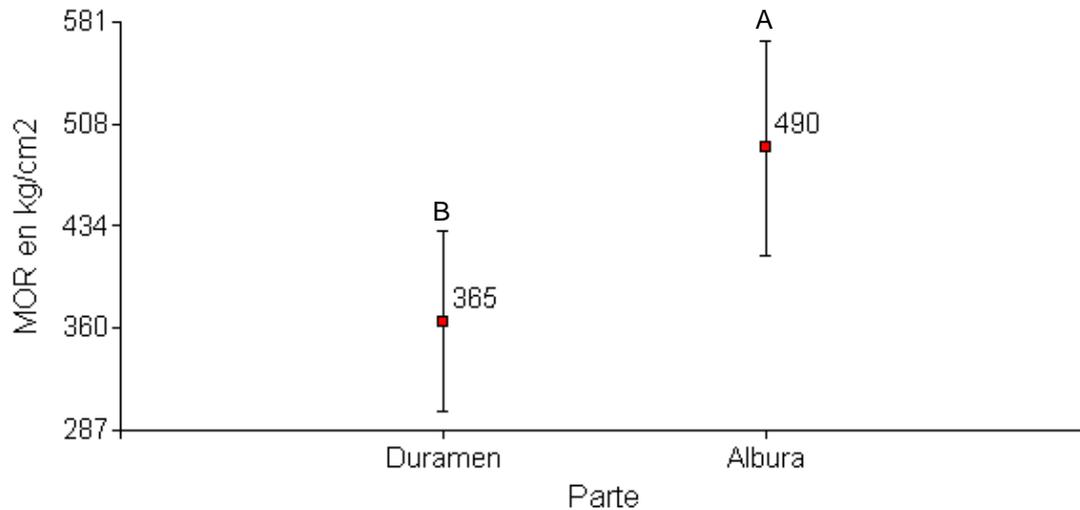


Figura 72. Análisis del Módulo de Ruptura MOR según la parte de la madera de corta final para la prueba de flexión estática

La diferencia significativa existente entre las interacciones, se debe a la diferencia que existe entre las partes de la madera evaluadas. La figura 73 muestra que se obtuvieron valores promedio para la madera de albura en estado verde de 491kg/cm<sup>2</sup> y en estado seco de 490 kg/cm<sup>2</sup>. Para la madera de duramen, se obtuvieron valores promedio de 378 kg/cm<sup>2</sup> en estado seco, y de 353 kg/cm<sup>2</sup> en estado verde.

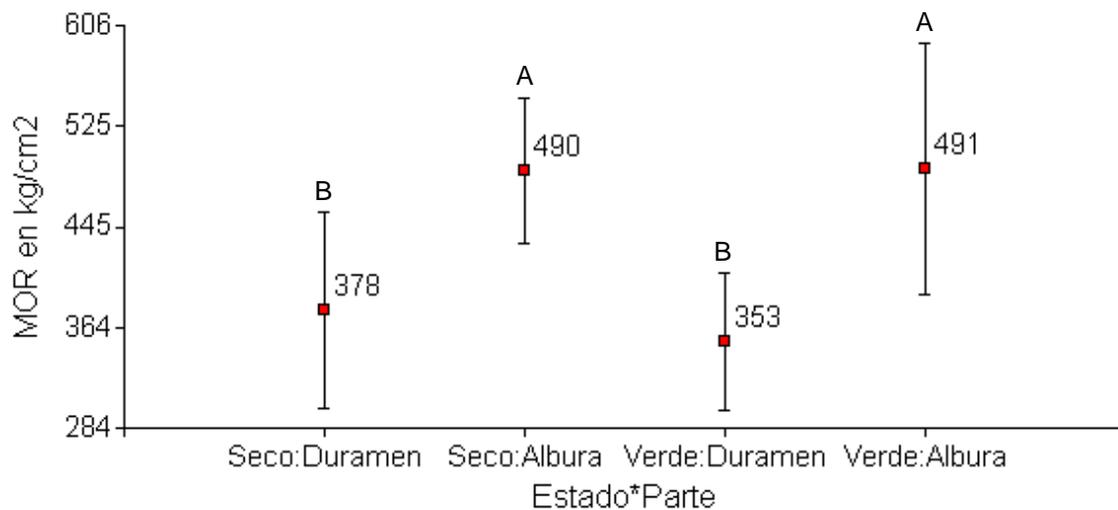


Figura 73. Análisis del Módulo de Ruptura MOR según la interacción del estado por la parte de la madera de corta final para la prueba de flexión estática

El Cuadro 103 (Anexos), contiene el análisis de la varianza del módulo de ruptura para la prueba de flexión estática en madera de raleo, el cual indica que existe diferencia significativa en una de sus fuentes de variación.

El Cuadro 104 (Anexos), contiene la comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de raleo en el módulo de ruptura para la prueba de flexión estática. La figura 74 indica que no existe diferencia significativa entre los estados de la madera. Se obtuvieron valores promedio de 290 kg/cm<sup>2</sup> para el estado seco y 283 kg/cm<sup>2</sup> para el estado verde.

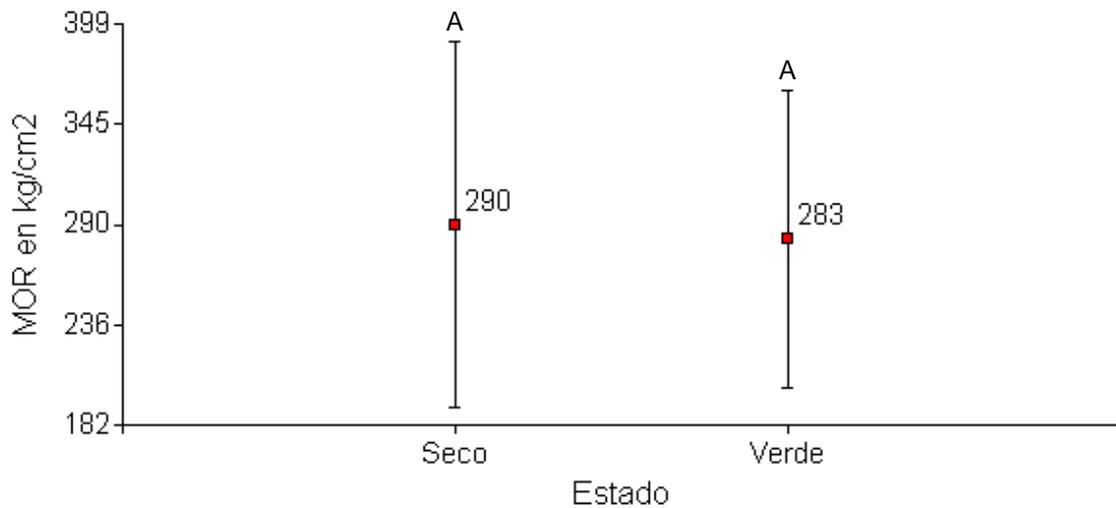


Figura 74. Análisis del Módulo de Ruptura MOR según el estado de la madera de raleo para la prueba de flexión estática

El Cuadro 105 (Anexos), contiene la comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de raleo en el módulo de ruptura para la prueba de flexión estática, el cual indica que existe diferencia significativa entre las partes de la madera.

Según la figura 75, se obtuvieron valores promedio de 346 kg/cm<sup>2</sup> para la madera de la zona de la periferia y 227 kg/cm<sup>2</sup> para la zona central del tronco.

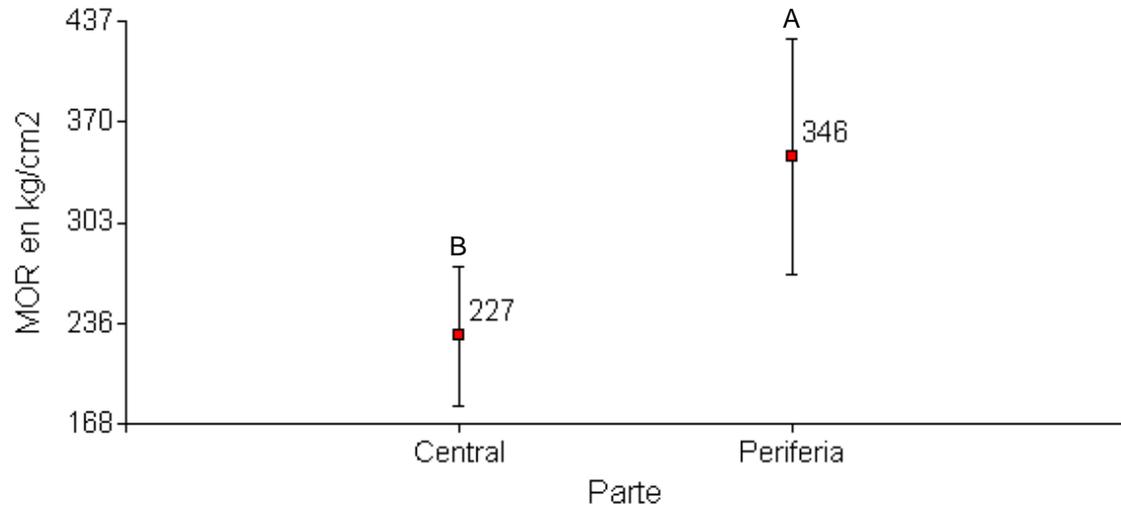


Figura 75. Análisis del Módulo de Ruptura MOR según la parte de la madera de raleo para la prueba de flexión estática

El Cuadro 106 (Anexos), contiene la comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en el módulo de elasticidad para la prueba de flexión estática, el cual indica que no existe diferencia significativa entre las distintas interacciones (Figura 76).

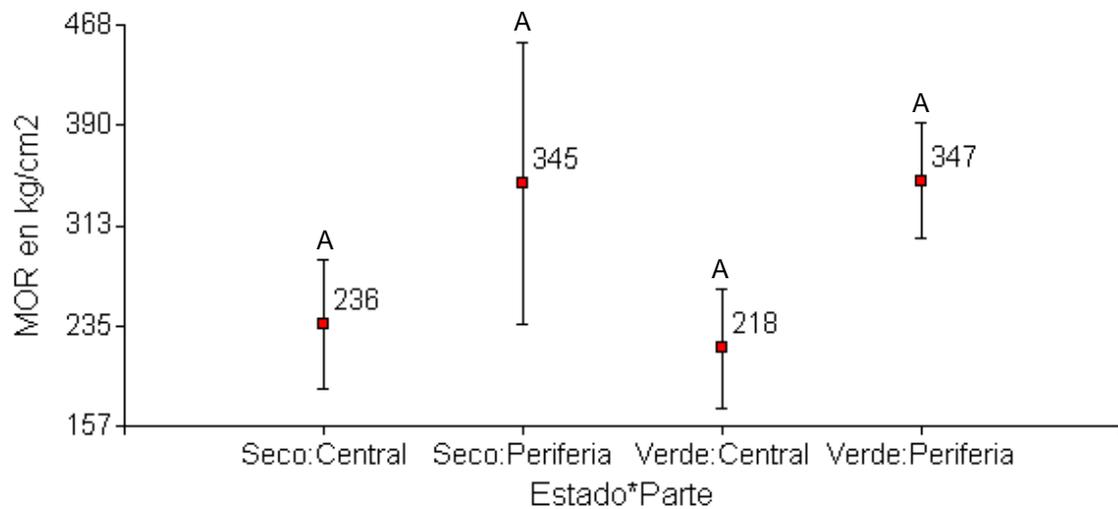


Figura 76. Análisis de la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en el Módulo de Ruptura para la prueba de flexión estática

### 7.2.5 Prueba de compresión perpendicular a la fibra

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.

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.

#### 7.2.5.1 Prueba de Compresión Perpendicular a la Fibra en Madera Verde

El Cuadro 53 (Anexos) contiene los datos obtenidos en la prueba de compresión perpendicular a la fibra en madera de raleo y de corta final en estado verde. La figura 77, muestra que la madera proveniente del raleo presentó los valores más altos de esfuerzo de compresión, siendo la madera de la periferia del tronco la que tuvo un valor de 52.332 kg/cm<sup>2</sup> y la de la zona central un valor de 45.105 kg/cm<sup>2</sup>.

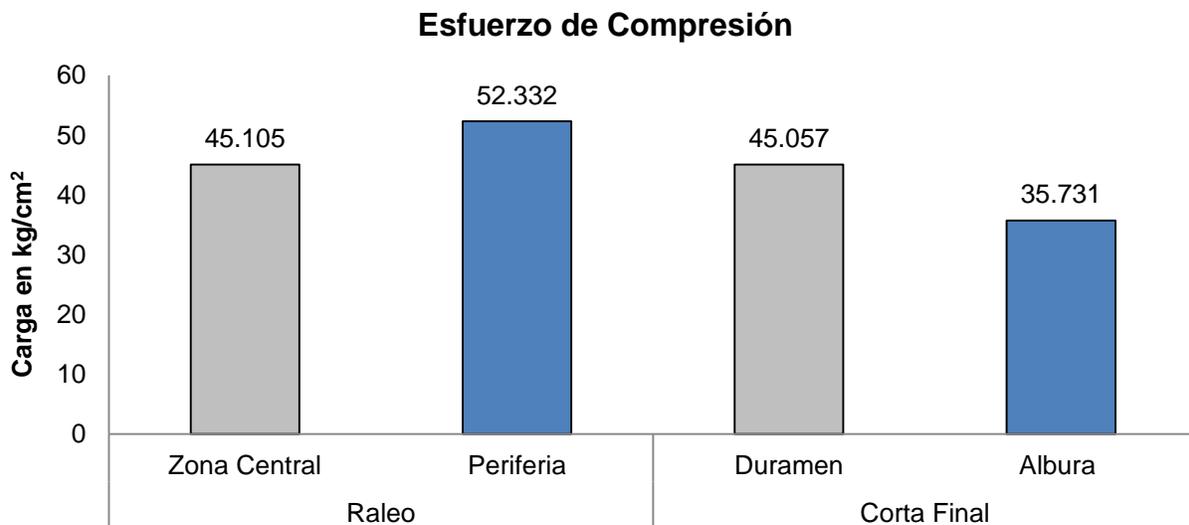


Figura 77. Esfuerzo de compresión de la prueba de compresión perpendicular a la fibra en madera de raleo y de corta final en estado verde

Para la madera de corta final, la madera del duramen presentó un valor de 45.057 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que la de la albura tuvo un valor de 35.731 kg/cm<sup>2</sup>. Todas las muestras presentaron un CH > 30%.

Bajo esta condición de Contenido de Humedad, la madera proveniente del raleo mostró mejor resistencia al esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra.

#### **7.2.5.2 Prueba de Compresión Perpendicular a la Fibra en Madera Seca**

Según el Cuadro 54 (Anexos), los resultados obtenidos en esta prueba bajo la condición del Contenido de Humedad cercano al 12% fueron más altos en comparación a los obtenidos con la madera en estado verde (CH >30%).

La figura 78 muestra que en estado seco (CH aproximado de 12%) la madera proveniente de la corta final presentó los mayores valores al esfuerzo de compresión, siendo la de la albura la mayor, con 93.985 kg/cm<sup>2</sup> y la del duramen 73.560 kg/cm<sup>2</sup>.

Para la madera de raleo, la zona central del tronco, presentó un valor de 45.395 kg/cm<sup>2</sup> y la de la zona de la periferia 43.358 kg/cm<sup>2</sup>. Se observa que la madera de corta final presenta mejor resistencia al esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra en estado seco (CH aprox. 12%).

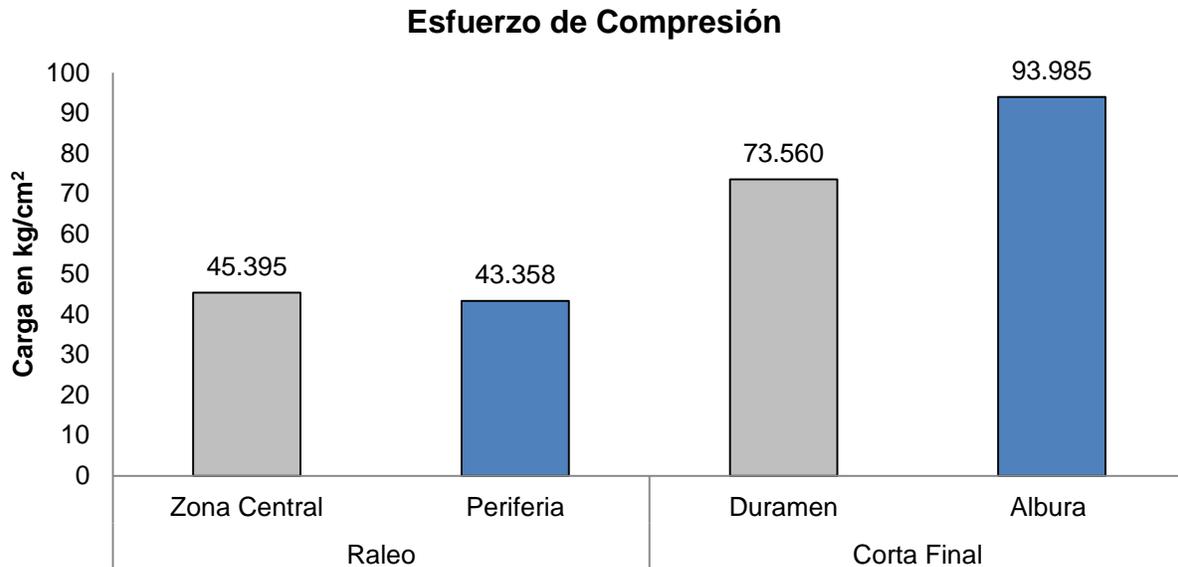


Figura 78. Esfuerzo de compresión de la prueba de compresión perpendicular a la fibra en madera de raleo y de corta final en estado seco

Se obtuvieron valores promedio para el esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra para la madera de raleo, obteniéndose un valor de 48.718 kg/cm<sup>2</sup> en estado verde y 44.376 kg/cm<sup>2</sup> en estado seco. Para la madera de corta final se obtuvo un valor de 40.39 kg/cm<sup>2</sup> en estado verde y 83.772 kg/cm<sup>2</sup> en estado seco.

En base a la clasificación propuesta por Rivero (2004), citado por Spavento et al., (2008) y según el esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra, la madera de raleo y de corta final en estado verde se clasifican como madera con baja resistencia al esfuerzo de compresión.

En estado seco, la madera de raleo se clasifica como madera con baja resistencia al esfuerzo de compresión y la madera de corta final como madera con resistencia alta al esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra.

El Análisis de Varianza para la prueba de compresión perpendicular a la fibra en madera de corta final (Cuadro 79 - Anexos), indica que se encontró diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en el estado de la madera de corta final (Cuadro 80 - Anexos), y en la interacción estado por parte en las fuentes de variación (Cuadro 82 - Anexos). El

análisis realizado indica que no existen diferencias significativas entre la albura y el duramen de la madera de corta final en la prueba de compresión perpendicular a la fibra (Cuadro 81 - Anexos).

La figura 79 indica que existe diferencia significativa entre las medias de los estados de la madera de corta final en la prueba de compresión perpendicular a la fibra, obteniéndose una media de mayor valor para el estado seco ( $84 \text{ kg/cm}^2$ ) que para el estado verde ( $40 \text{ kg/cm}^2$ ). Esto significa que la madera de corta final en estado seco posee una mayor resistencia al esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra.

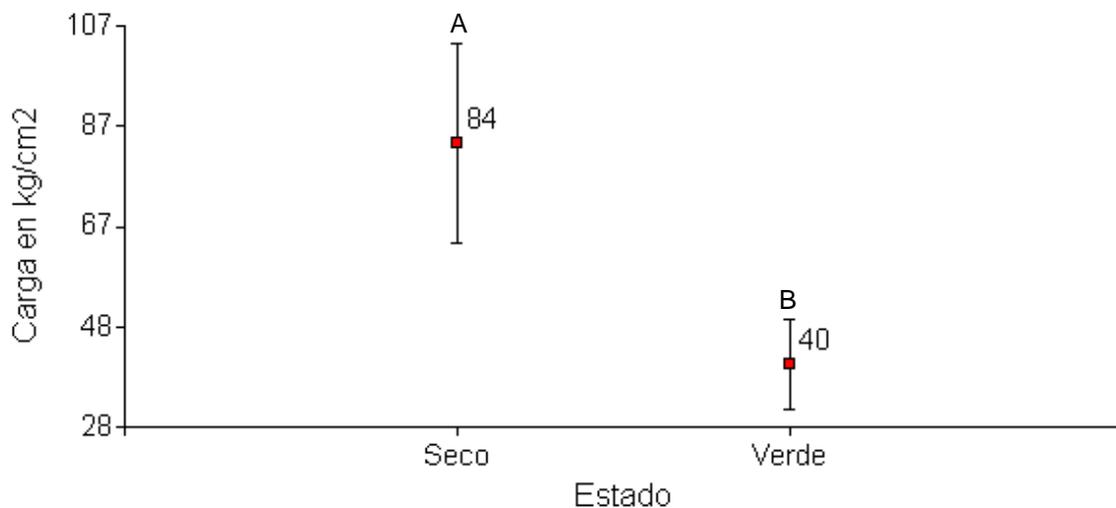


Figura 79. Comparación múltiple de medias del estado de la madera de corta final para la prueba de compresión perpendicular a la fibra

La comparación múltiple de medias de la figura 80 no muestra diferencias significativas entre las dos zonas de la madera, presentando la zona de la albura una media de  $65 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que la zona del duramen presenta una media de  $59 \text{ kg/cm}^2$ . Por lo tanto, la zona del duramen y la albura son homogéneas en el esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra en la madera de corta final.

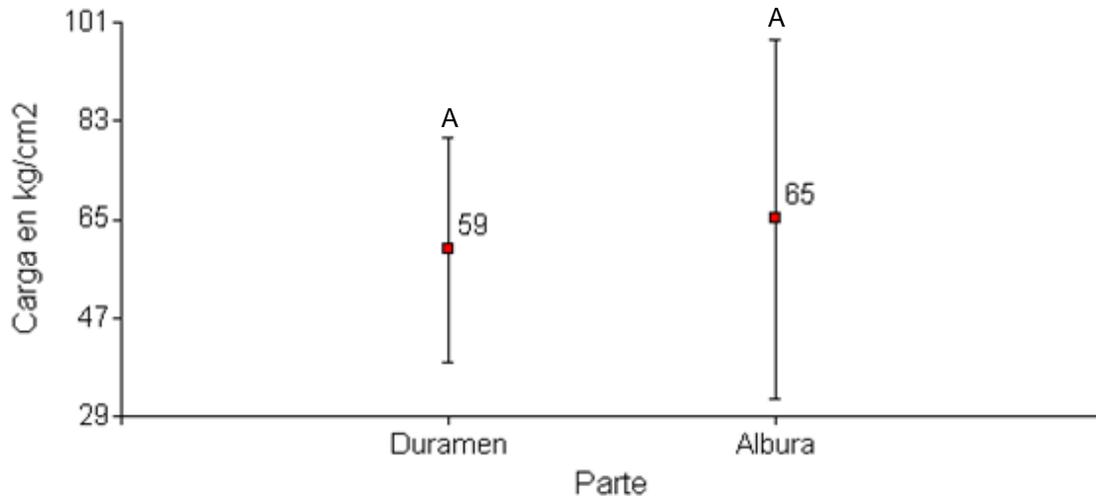


Figura 80. Análisis de la parte de la madera de corta final para la prueba de compresión perpendicular a la fibra

La figura 81 muestra la comparación múltiple de medias de la interacción entre el estado y la parte de la madera, indicando que existe diferencia significativa entre la media de la albura en estado seco con la media del duramen en estado seco. Además, existe diferencia significativa entre los dos estados de la madera.

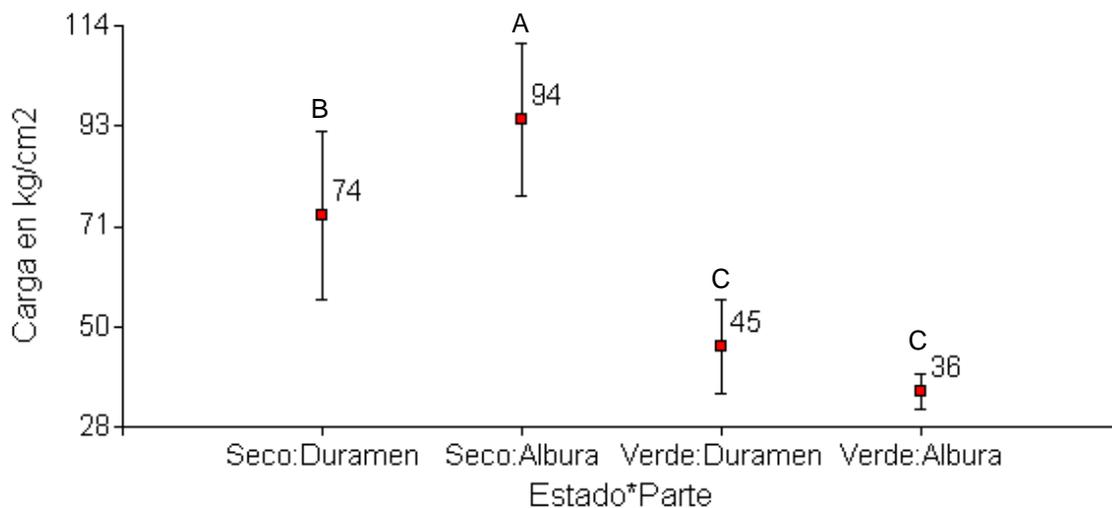


Figura 81. Interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para la prueba de compresión perpendicular a la fibra

No se observan diferencias significativas entre las medias del duramen y la albura en estado verde, lo que demuestra que son homogéneas en cuanto al esfuerzo de

compresión perpendicular a la fibra.

En estado seco para la madera de corta final, la albura presentó una media de 94 kg/cm<sup>2</sup>, el duramen una media de 74 kg/cm<sup>2</sup>; mientras que en estado verde, el duramen presentó una media de 45 kg/cm<sup>2</sup> y la albura una media de 36 kg/cm<sup>2</sup>.

El Análisis de Varianza para la prueba de compresión perpendicular a la fibra en madera de raleo (Cuadro 107 - Anexos), indica que no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) ninguna de las fuentes de variación.

La figura 82 indica que no existe diferencia significativa entre las medias de los estados de la madera de raleo (Cuadro 108 - Anexos), obteniéndose para el estado verde la media de mayor valor con 49 kg/cm<sup>2</sup> y para el estado seco una media de 44 kg/cm<sup>2</sup>.

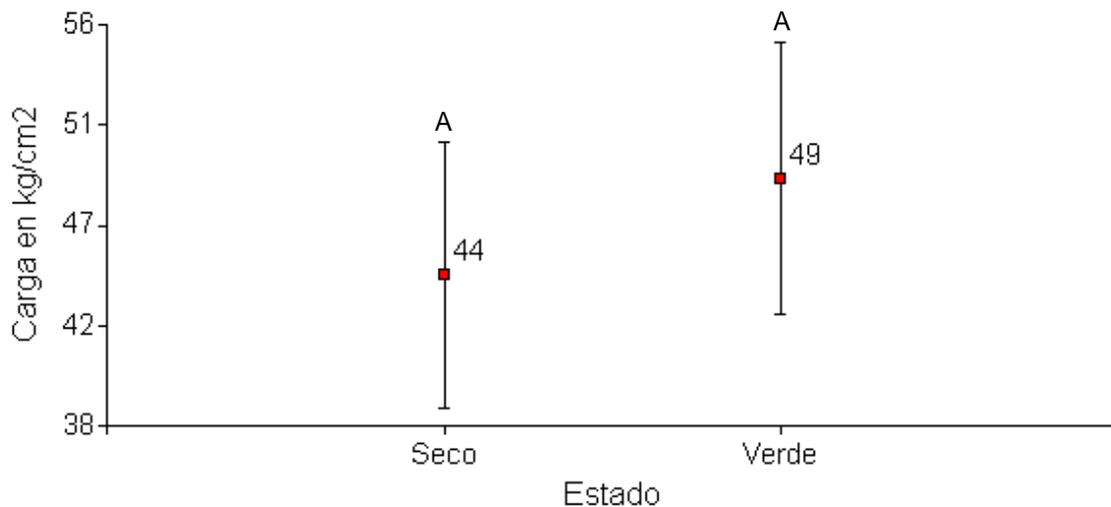


Figura 82. Análisis del estado de la madera de raleo para la prueba de compresión perpendicular a la fibra

Esto significa que la madera de raleo en estado verde posee una mayor resistencia al esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra.

La figura 83 indica que no existen diferencias significativas entre las dos zonas de la madera de raleo (Cuadro 109 - Anexos), presentando la zona de la periferia una media

de 48 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que la zona central del tronco presenta una media de 45 kg/cm<sup>2</sup>.

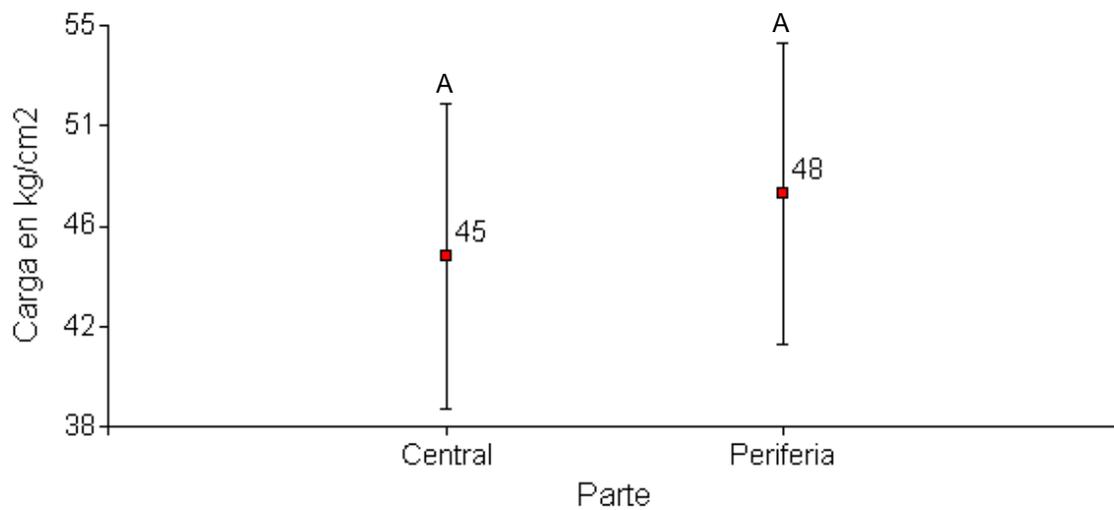


Figura 83. Análisis de la parte de la madera de raleo para la prueba de compresión perpendicular a la fibra

La figura 84 indica que no existe diferencia significativa entre las medias de las distintas interacciones del estado y la parte de la madera de raleo (Cuadro 110 - Anexos), lo que demuestra que son homogéneas en cuanto al esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra.

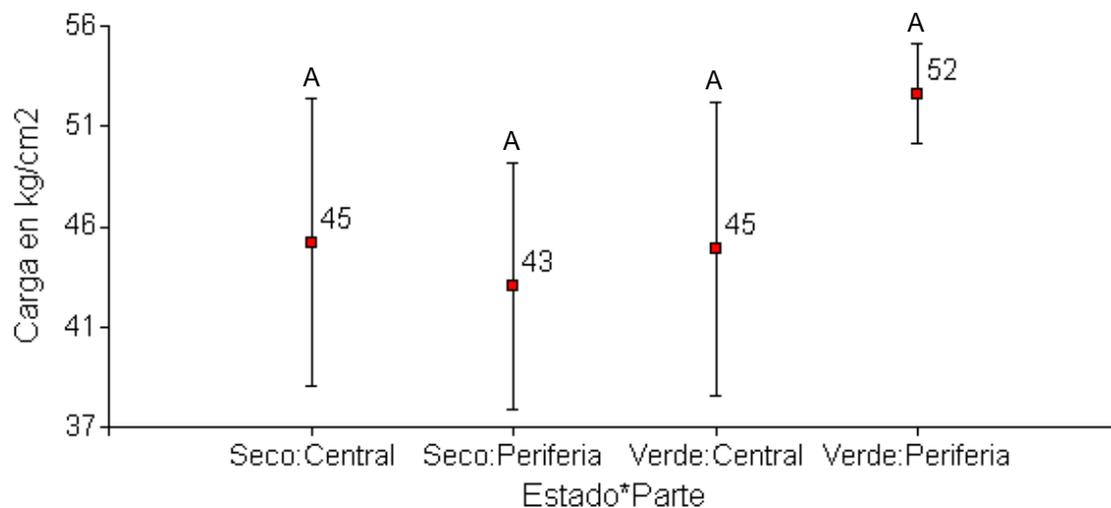


Figura 84. Interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo para la prueba de compresión perpendicular a la fibra

En estado verde la madera de la periferia presentó una media de 52 kg/cm<sup>2</sup>, y la zona central una media de 45 kg/cm<sup>2</sup>; mientras que en estado seco, la zona central presentó una media de 45 kg/cm<sup>2</sup> y la madera de la periferia una media de 43 kg/cm<sup>2</sup>.

### **7.2.6 Prueba de compresión paralela a la fibra**

La compresión paralela a la fibra es la aplicación de una fuerza de compresión a una pieza de madera que actúa en dirección paralela a la fibra. La resistencia de la madera ensayada a compresión es máxima cuando se realiza en la dirección paralela a la fibra y va disminuyendo a medida que se aleja de dicha dirección.

En la dirección axial, se tienen los valores máximos de resistencia a compresión, pues los haces fibrosos resistentes actúan al igual que una columna.

Al someter una probeta a un ensayo, se observa que primero las fibras se separan en haces, produciendo grietas longitudinales, haciendo que la madera se quiebre por pandeo, deslizándose, en general en un plano oblicuo.

#### **7.2.6.1 Prueba de compresión paralela a la fibra en madera verde**

El Cuadro 55 (Anexos), contiene la información obtenida en la prueba de compresión paralela a la fibra en madera de raleo y de corta final en estado verde.

La figura 85 muestra que en estado verde, la madera proveniente de la corta final presentó valores más altos, siendo la madera de la albura la que mostró 249.432 kg/cm<sup>2</sup>, y la del duramen 205.548 kg/cm<sup>2</sup>. La madera proveniente del raleo mostró para zona central un valor de 135.004 kg/cm<sup>2</sup> y para la zona de la periferia 138.827 kg/cm<sup>2</sup>. En estado verde (CH > 30%), la madera de corta final presentó mejor resistencia al esfuerzo de compresión paralela a la fibra.

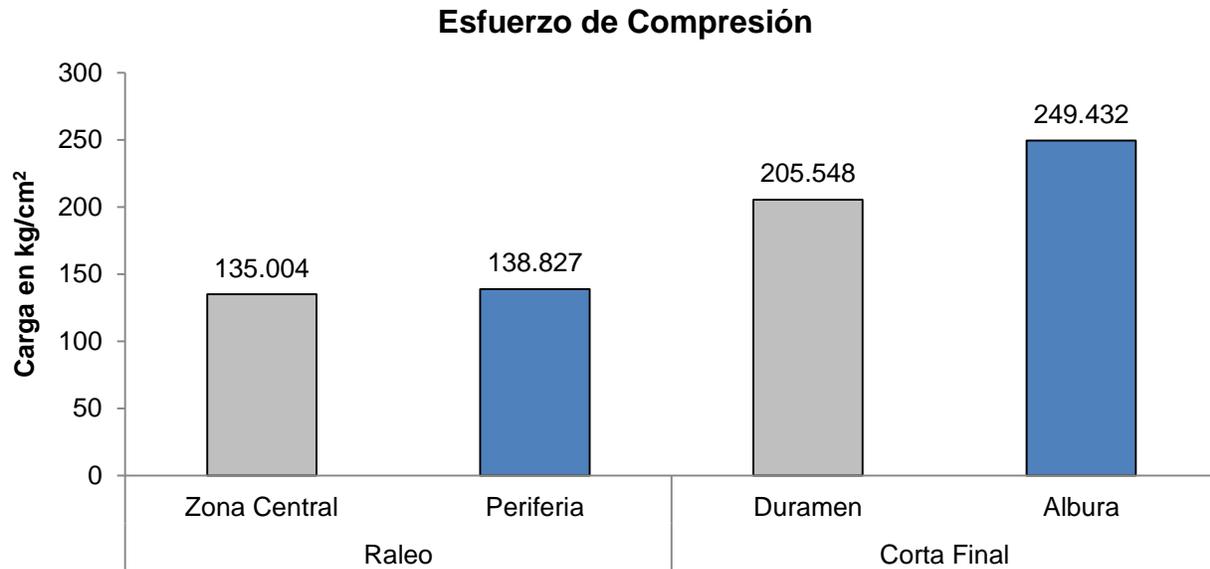


Figura 85. Esfuerzo de compresión de la prueba de compresión paralela a la fibra en madera de raleo y de corta final en estado verde

#### 7.2.6.2 Prueba de Compresión Paralela a la Fibra en Madera Seca

El Cuadro 56 (Anexos) contiene la información obtenida en la prueba de compresión paralela a la fibra en madera de raleo y de corta final en estado seco.

La figura 86 indica que en estado seco, la madera proveniente de la corta final presentó los valores más altos, siendo la de la albura la que mostró un valor de 331.197 kg/cm<sup>2</sup>, y la del duramen 217.868 kg/cm<sup>2</sup>. La madera proveniente del raleo mostró para zona central un valor de 117.284 kg/cm<sup>2</sup> y para la zona de la periferia 160.538 kg/cm<sup>2</sup>. En estado seco (CH aprox. 12%), la madera de corta final presentó mejor resistencia al esfuerzo de compresión paralela a la fibra.

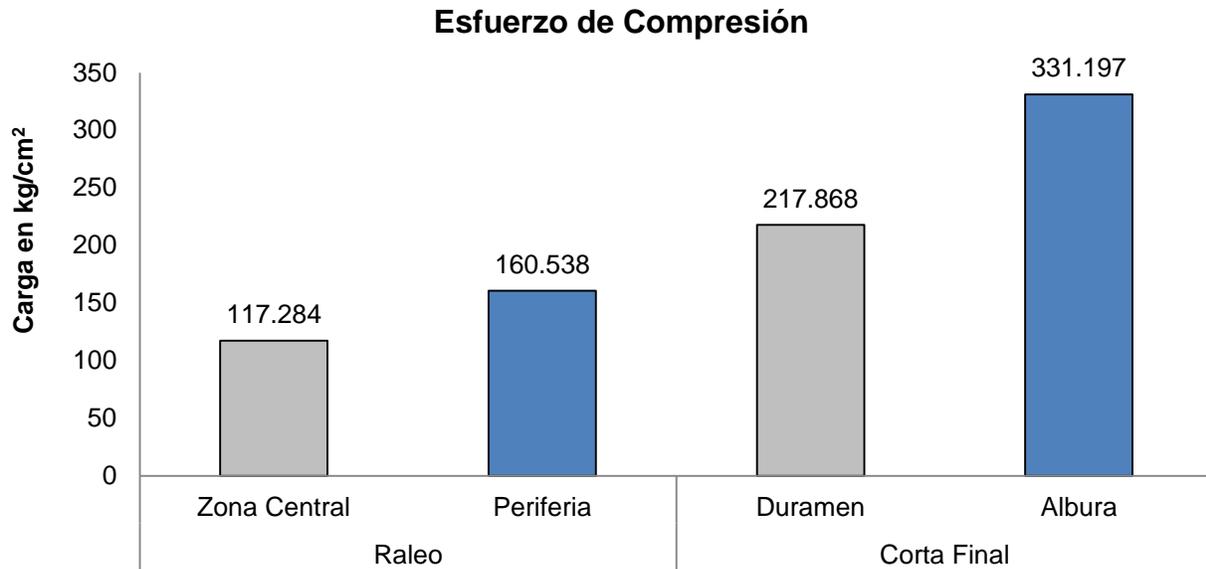


Figura 86. Esfuerzo de compresión de la prueba de compresión paralela a la fibra en madera de raleo y de corta final en estado seco

Se obtuvieron valores promedio para el esfuerzo de compresión paralela a la fibra para la madera de raleo de 136.915 kg/cm<sup>2</sup> en estado verde y de 138.91 kg/cm<sup>2</sup> en estado seco. Para la madera de corta final se obtuvo un valor de 227.49 kg/cm<sup>2</sup> en estado verde y 274.532 kg/cm<sup>2</sup> en estado seco.

Según la clasificación propuesta por Rivero (2004), citado por Spavento et al. (2008), para la prueba de compresión paralela a la fibra y en base al esfuerzo de compresión, la madera de raleo en estado verde y seco se clasifica como madera con muy baja resistencia al esfuerzo de compresión, mientras que la madera de corta final se clasifica como madera con baja resistencia al esfuerzo de compresión en estado verde y seco.

El Análisis de Varianza para la prueba de compresión paralela a la fibra en madera de corta final (Cuadro 83 - Anexos), indica que existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en el estado de la madera de corta final (Cuadro 84 - Anexos), en la parte de la madera (Cuadro 85 - Anexos) y en la interacción del estado por parte de la madera en las fuentes de variación (Cuadro 86 - Anexos).

La figura 87 indica que existe diferencia significativa entre las medias de los estados de la madera, obteniéndose una media para el estado seco de 275 kg/cm<sup>2</sup> y para el estado verde una media de 227 kg/cm<sup>2</sup>. Esto significa que la madera de corta final en estado seco posee una mayor resistencia al esfuerzo de compresión paralela a la fibra.

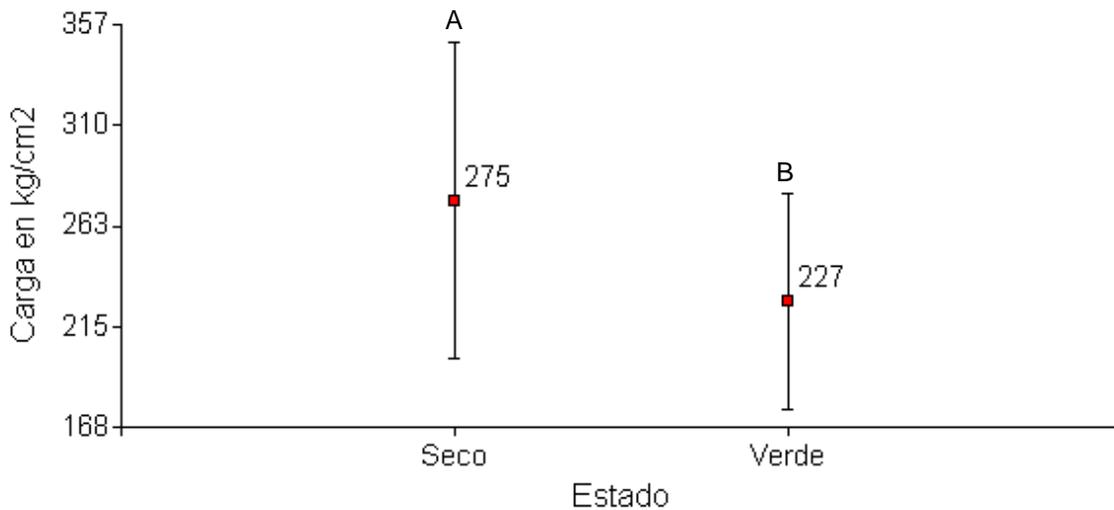


Figura87. Análisis del estado de la madera de corta final para la prueba de compresión paralela a la fibra

La figura 88 indica que existe diferencia significativa entre las medias de las zonas o partes de la madera, obteniéndose una media de mayor valor para la parte de la albura (290 kg/cm<sup>2</sup>) que para la parte del duramen (212 kg/cm<sup>2</sup>).

Esto significa que la zona de la albura de la madera de corta final posee una mayor resistencia al esfuerzo de compresión paralela a la fibra.

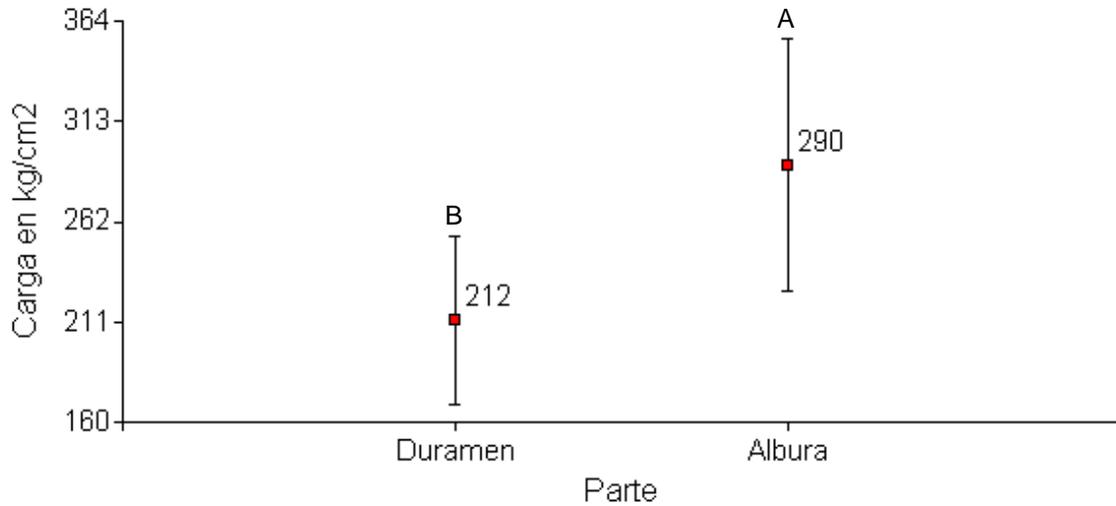


Figura 88. Análisis de la parte de la madera de corta final para la prueba de compresión paralela a la fibra

La figura 89 indica que existe diferencia significativa entre la media de la albura en estado seco con las medias de las demás interacciones entre el estado y las zonas o partes de la madera, obteniéndose una media de mayor valor para la albura en estado seco (331 kg/cm<sup>2</sup>) seguida por la albura en estado verde (249 kg/cm<sup>2</sup>).

La zona del duramen mostró su mayor valor en estado seco (218 kg/cm<sup>2</sup>) y en el estado verde el menor valor (206 kg/cm<sup>2</sup>).

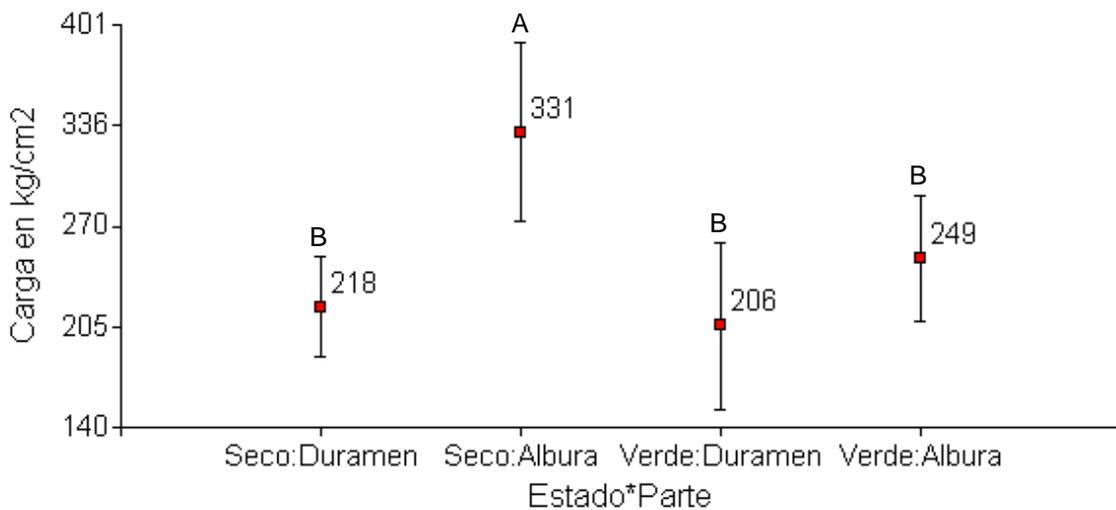


Figura 89. Análisis de la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para la prueba de compresión paralela a la fibra

Nuevamente se afirma que la zona de la albura de la madera de corta final posee una mayor resistencia al esfuerzo de compresión paralela a la fibra en los dos estados de contenido de humedad en comparación a la del duramen.

El Análisis de Varianza para la prueba de compresión paralela a la fibra en madera de raleo (Cuadro 111 - Anexos), indica que no existen diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en el estado de la madera de raleo (Cuadro 112 - Anexos), en la parte de la madera (Cuadro 113 - Anexos) y en la interacción del estado por la parte de la madera en las fuentes de variación (Cuadro 114 - Anexos).

La figura 90 indica que no existe diferencia significativa entre las medias de los estados de la madera, obteniéndose una media para el estado seco de  $139 \text{ kg/cm}^2$  y para el estado verde una media de  $137 \text{ kg/cm}^2$ .

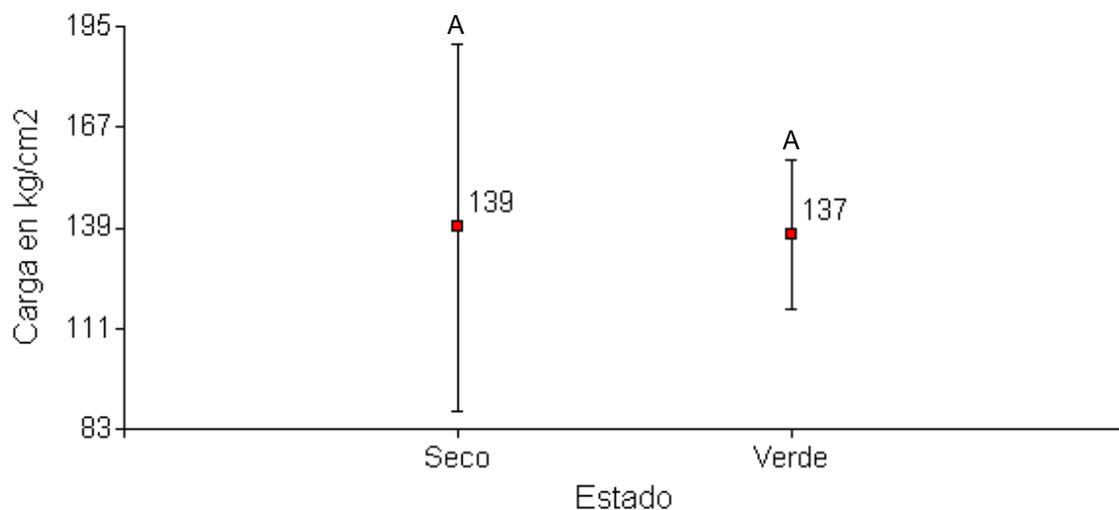


Figura 90. Análisis del estado de la madera de raleo para la prueba de compresión paralela a la fibra

Esto significa que la madera de raleo en estado seco o verde posee la misma resistencia al esfuerzo de compresión paralela a la fibra. La figura 91 muestra que no existe diferencia significativa entre las medias de las zonas o partes de la madera, obteniéndose una media de mayor valor para la parte de la periferia de  $150 \text{ kg/cm}^2$  y

para la parte central del tronco 126 kg/cm<sup>2</sup>.

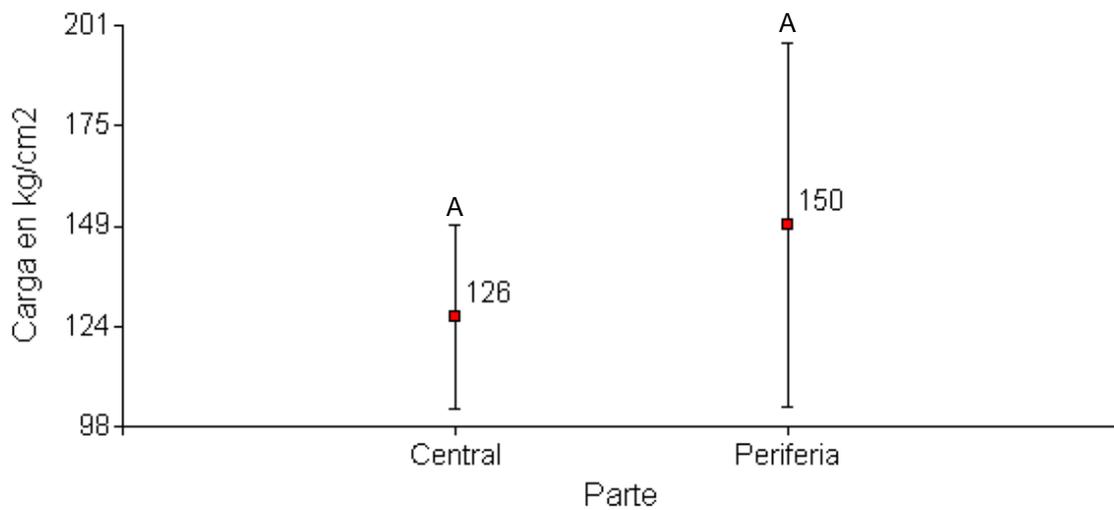


Figura 91. Análisis de la parte de la madera de raleo para la prueba de compresión paralela a la fibra

La figura 92 indica que no existe diferencia significativa entre las medias de las interacciones entre el estado y la parte de la madera de raleo analizadas en la prueba de compresión perpendicular a la fibra.

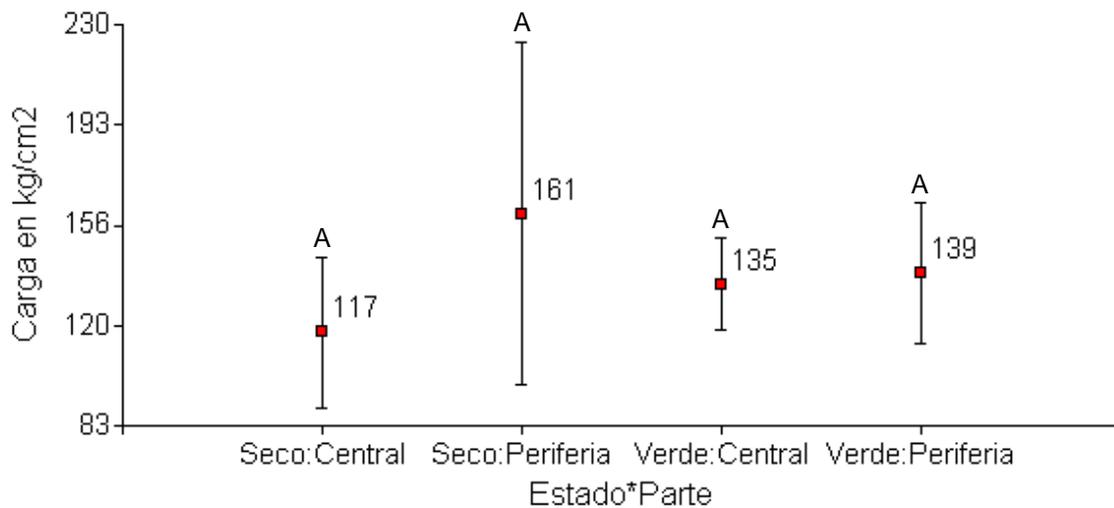


Figura 92. Interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo para la prueba de compresión perpendicular a la fibra

Se obtuvo una media de mayor valor para la madera de la periferia en estado seco de 161 kg/cm<sup>2</sup>, seguida por la madera de la periferia en estado verde con 139 kg/cm<sup>2</sup>. La

zona central mostró su mayor valor en estado seco con 117 kg/cm<sup>2</sup> y en el estado verde con 135 kg/cm<sup>2</sup>.

La madera de raleo presentó el mismo comportamiento de la madera de corta final, en la cual la albura presentó valores más altos en la resistencia al esfuerzo de compresión paralela a la fibra, en los dos estados de contenido de humedad.

### 7.3 RESUMEN DE LAS PROPIEDADES FISICAS

En el Cuadro 13 se resumen los valores de las propiedades físicas determinadas para la madera de corta final y de raleo.

Cuadro 13. Valores obtenidos para las propiedades físicas de la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore.

Prueba	Madera de corta final			Madera de raleo		
	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio
Inclinación de la fibra (%) *	14	3	7	12	4	7
Densidad seca al aire (g/cm <sup>3</sup> ) **	0.804	0.538	0.680	0.594	0.405	0.500
Contracción dimensional Relación <sub>T/R</sub>	2.2	1.5	1.9	2.6	0.8	1.7
Contracción volumétrica (%)	9	5	7	9	7	8

\* Los valores máximos para la inclinación de la fibra fueron encontrados en la zona central del fuste, mientras que los valores mínimos pertenecen a la madera de la zona de la periferia del fuste. La tendencia de la inclinación de la fibra es a disminuir al alejarse de la zona central hacia la periferia del fuste.

\*\* Los valores máximos para la densidad seca al aire fueron encontrados en la zona de la periferia del fuste, mientras que los valores mínimos se localizaron en la zona central del fuste. La tendencia de la densidad es a aumentar a medida que se aleja de la zona central del fuste.

## 7.4 RESUMEN DE LAS PROPIEDADES MECANICAS

En el Cuadro 14 se resumen los valores de las propiedades mecánicas de la madera de corta final de *Pinus maximinoi* H. E. Moore obtenidos a través de las pruebas de laboratorio, para los dos estados de contenido de humedad y considerando la zona o sección del fuste.

Cuadro 14. Resumen de las propiedades mecánicas de la madera de corta final de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, según el contenido de humedad y la zona de fuste

Prueba	Estado verde		Estado seco	
	Duramen	Albura	Duramen	Albura
Dureza Janka (kg)	369	350	410	533
Resistencia a la extracción de clavos (kg)	75	99	68	80
Corte Paralelo a la Fibra (kg)	67	57	56	54
Módulo de Elasticidad en flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	144482	98321	91811	101293
Módulo de Ruptura en flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	353	491	378	490
Compresión perpendicular a la fibra (kg/cm <sup>2</sup> )	45	36	74	94
Compresión paralela a la fibra (kg/cm <sup>2</sup> )	206	249	218	331

En el Cuadro 15 se resumen los valores de las propiedades mecánicas de la madera de raleo de *Pinus maximinoi* H. E. Moore obtenidos a través de las pruebas de laboratorio, para los dos estados de contenido de humedad y considerando la zona o sección del fuste.

Cuadro 15. Resumen de las propiedades mecánicas de la madera de raleo de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, según el contenido de humedad y la zona de fuste

Prueba	Estado verde		Estado seco	
	Zona Central	Periferia	Zona Central	Periferia
Dureza Janka (kg)	196	272	223	297
Resistencia a la extracción de clavos (kg)	63	67	55	72
Corte Paralelo a la Fibra (kg)	44	46	35	34
Módulo de Elasticidad en flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	44029	62801	60683	89684
Módulo de Ruptura en flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	218	347	236	345
Compresión perpendicular a la fibra (kg/cm <sup>2</sup> )	45	52	45	43
Compresión paralela a la fibra (kg/cm <sup>2</sup> )	135	139	117	161

En el Cuadro 16 se resumen los valores de las propiedades mecánicas de la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore obtenidos a través de las pruebas de laboratorio, para la madera de corta final y de raleo, considerando únicamente el estado del contenido de humedad de la madera, los valores son un promedio de la zona central o duramen y la zona de la albura o periferia.

Cuadro 16. Resumen de las propiedades mecánicas de la madera de corta final y de raleo de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, según el contenido de humedad

Prueba	Corta final		Raleo	
	Estado verde	Estado seco	Estado verde	Estado seco
Dureza Janka (kg)	360	472	234	260
Resistencia a la extracción de clavos (kg)	87	74	65	64
Corte Paralelo a la Fibra (kg)	62	55	45	35
Módulo de Elasticidad en flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	121402	96552	53415	75184
Módulo de Ruptura en flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	422	434	283	291

Compresión perpendicular a la fibra (kg/cm <sup>2</sup> )	41	84	49	44
Compresión paralela a la fibra (kg/cm <sup>2</sup> )	228	275	137	139

## 7.5 CLASIFICACION DE LA MADERA SEGUN SUS PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS

### 7.5.1 Clasificación de las propiedades físicas de *Pinus maximinoi* H. E. Moore

En base a los resultados obtenidos y a las clasificaciones propuestas por varios autores, en el cuadro 17 se resumen las clasificaciones para cada propiedad física de la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore.

Cuadro 17. Resumen de las clasificaciones de las propiedades físicas de la madera de corta final y de raleo de *Pinus maximinoi* H. E. Moore

Prueba	Corta final	Raleo
Inclinación de la fibra		Poco inclinada
Densidad seca al aire	Pesada	Ligera
Contracción dimensional Relación <sub>T/R</sub>		Baja o estable
Contracción volumétrica		Pequeña contracción

Según las propiedades físicas de la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, por tener una fibra poco inclinada y de contracción dimensional baja y pequeña contracción volumétrica, es una madera que puede ser empleada en trabajos de carpintería y ebanistería. Por su densidad, es una madera fácil de trabajar con formones, sierras, cepillos, etc., además, es una madera que se puede secar antes de su aserrado o elaboración.

### 7.5.2 Clasificación de las propiedades mecánicas de *Pinus maximinoi* H. E. Moore

En base a los resultados obtenidos y a las clasificaciones propuestas por varios autores, en el cuadro 18 se resumen las clasificaciones para cada propiedad mecánica de la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore. La clasificación se basa en los resultados contenidos en el Cuadro 16, ya que actualmente en el país en el proceso de transformación primaria no se realiza la clasificación de la madera según la zona o sección del fuste en madera de duramen o madera de albura. Únicamente se considera el contenido de humedad en la madera.

Cuadro 18. Resumen de las clasificaciones de las propiedades mecánicas de la madera de corta final y de raleo de *Pinus maximinoi* H. E. Moore según el contenido de humedad

Prueba	Corta final		Raleo	
	Estado verde	Estado seco	Estado verde	Estado seco
Dureza Janka	Blanda		Muy blanda	
Corte paralelo	Bajo		Bajo	Muy bajo
Módulo de elasticidad en flexión	Medio	Muy bajo	Muy bajo	
Módulo de ruptura en flexión	Muy bajo		Muy bajo	
Esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra	Bajo	Alto	Bajo	
Esfuerzo de compresión paralela a la fibra	Bajo		Muy bajo	

Según Vaca (1998), las propiedades físico mecánicas de la madera no sólo pueden determinar el uso más apropiado de la madera, sino también son un instrumento valioso para determinar la durabilidad natural y la aptitud de la tratabilidad de las diferentes especies forestales, así como el comportamiento de las mismas frente a diferentes sistemas de preservación.

En la actualidad, el uso de la madera para hacer muebles y en la construcción de casas es muy conveniente, pues su producción requiere poca energía en comparación con la de otros materiales, lo que reduce daños al medio ambiente. Sin embargo, para mejorar

la durabilidad de la madera, es necesario aplicar medidas de protección. Normalmente la permanencia de la sustancia en la madera es de uno a tres años, por lo que deben repetirse las aplicaciones para garantizar el buen estado de la madera (Cruz, 2010).

De acuerdo con Godínez (1996), la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore proveniente de los raleos, por ser una madera con una contracción dimensional baja y de pequeña contracción volumétrica, puede ser utilizada como material para la elaboración de cielos falsos, tabiques, forro para paredes, machihembres, como material para elaboración de closets, puertas, ventanas, zócalos, molduras, gabinetes, muebles y todos los usos en los que no se le requiera un esfuerzo muy alto,

La madera de corta final de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, aparte de los mismos usos de la madera de raleo, puede ser utilizada como material estructural, siempre y cuando se verifiquen otras singularidades aparte de las propiedades mecánicas, tales como la presencia y tamaño de nudos en las piezas de madera, bolsas de resina, desviación de la fibra, presencia de madera de reacción, exactitud en las dimensiones en el proceso de aserrado y las alteraciones de la madera por el ataque de hongos, insectos y por plantas parásitas (UNE 56544, 2006).

Tanto la madera de corta final como la de raleo, debe ser tratada a través de procesos químicos, para aumentar su resistencia al ataque de hongos, insectos y de las condiciones medioambientales a las que sea expuesta durante su servicio. De igual forma, con el transcurso del tiempo es necesario que se realice un mantenimiento preventivo, consistente en la aplicación de tratamientos preservantes y de control de insectos.

De acuerdo con Cruz (2010), la protección química es un complemento de la protección por diseño constructivo y se debe utilizar cuando se hayan agotado todas sus posibles formas de protección, a través de la durabilidad natural de la madera o del carácter constructivo o estructural de la misma, el cual garantiza que la madera se encuentre en aplicaciones favorables para su conservación.

## VIII. CONCLUSIONES

1. Los tejidos de la albura y el duramen en la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore fueron diferenciados únicamente en la madera de corta final, con una relación inversamente proporcional a la altura. Se observó una mayor proporción a 20 centímetros de altura (24.47 %) que a 2 metros de altura (18.67 %). Por otra parte, en la madera proveniente del raleo, el proceso de duraminización aún no había iniciado, en consecuencia, la madera de raleo es una madera fácil de tratar por productos químicos para preservarla y garantizar su resistencia al ataque de hongos, insectos y de las condiciones medioambientales.
2. La madera de raleo y de corta final se clasifica como madera con fibra poco inclinada; con una inclinación promedio de 7 %. En relación a la densidad, la madera de raleo se clasifica como ligera ( $0.497 \text{ g/cm}^3$ ) y la de corta final como pesada ( $0.682 \text{ g/cm}^3$ ). Respecto a la contracción, la madera de raleo y de corta final se clasifican como de contracción dimensional baja ( $T/R < 2$ ), y de pequeña contracción volumétrica ( $< 10 \%$ ).
3. En relación a la dureza, la madera de raleo en estado verde y seco se clasifica como muy blanda ( $< 300 \text{ kg/cm}^2$ ). Por otra parte, la madera de corta final en estado verde y seco se clasifica como blanda ( $301 - 500 \text{ kg/cm}^2$ ).
4. En flexión estática, la madera de raleo y de corta final en estado verde y seco se clasifica como madera con Módulo de Ruptura en flexión muy bajo ( $MOR < 500 \text{ kg/cm}^2$ ). Para el Módulo de Elasticidad, la madera de raleo en estado verde y seco se clasifica como madera con MOE en flexión muy bajo ( $MOE < 100000 \text{ kg/cm}^2$ ), mientras que la madera de corta final en estado verde se clasifica como madera con MOE en flexión medio ( $121000 - 150000 \text{ kg/cm}^2$ ), y en estado seco como madera con MOE en flexión muy bajo ( $< 100000 \text{ kg/cm}^2$ ).
5. La madera de raleo en estado verde y seco se clasifica como de baja resistencia al esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra ( $26 - 50 \text{ kg/cm}^2$ ). La de corta final en estado verde, se clasifica como de baja resistencia al esfuerzo de compresión

(26 - 50 kg/cm<sup>2</sup>) y en estado seco como de alta resistencia al esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra (76 - 100 kg/cm<sup>2</sup>). La madera de raleo en estado verde y seco se clasifica como de muy baja resistencia al esfuerzo de compresión paralela a la fibra (< 200 kg/cm<sup>2</sup>), y la madera de corta final en estado verde y en estado seco, se clasifica como de baja resistencia al esfuerzo de compresión paralela a la fibra (201 - 300 kg/cm<sup>2</sup>).

6. En la madera de raleo el contenido de humedad en la madera solamente influyó en la prueba de corte paralelo a la fibra. Diferencias significativas se observaron entre las secciones del tronco de la madera para las pruebas de dureza Janka y para el Módulo de Ruptura MOR en flexión. En las otras pruebas no se mostraron diferencias significativas para la sección o parte de la madera.
7. En la madera de corta final, el contenido de humedad en la madera influyó en las pruebas de dureza Janka, extracción de clavos, compresión perpendicular y compresión paralela a la fibra. La sección del tronco de la madera (albura y duramen) mostró diferencias significativas en las pruebas de extracción de clavos, Módulo de Ruptura MOR en flexión y en la compresión paralela a la fibra. En las otras pruebas no se mostraron diferencias significativas.
8. Con base en el análisis estadístico se concluye que la madera proveniente del duramen y de la albura no presentan el mismo comportamiento en sus propiedades físicas y mecánicas en estado verde y en estado seco, siendo esta última la que muestra mayores valores de las propiedades físicas y mecánicas evaluadas.

## IX. RECOMENDACIONES

Para determinar el inicio del proceso de duraminización de la madera de *Pinus maximinoi* H.E. Moore, se recomienda realizar las pruebas a distintas edades, y observar el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas.

Realizar pruebas de resistencia de la madera con tratamientos de preservación y conservación, para evaluar sus efectos en las propiedades mecánicas de la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore con el transcurso del tiempo.

Determinar las propiedades físicas y mecánicas de las distintas especies forestales comerciales del país, para elaborar tablas que reúnan la mayor cantidad posible de información técnica, para los usos de diseño estructural en madera.

Facilitar el acceso a laboratorios de la Universidad y al uso de reactivos químicos, ya que las pruebas mecánicas poseen un alto valor económico, lo cual limita el uso de una mayor cantidad de muestras.

Que la Facultad de Ciencias Agrícolas y Ambientales de la Universidad Rafael Landívar realice convenios para el financiamiento de investigaciones de los estudiantes con las distintas universidades del país y con organizaciones gubernamentales, para incentivar el desarrollo de investigaciones en plantaciones forestales y bosques naturales en distintas especies.

A nivel de laboratorio, tratar de emplear probetas de madera limpia de defectos, ya que se observó, que la presencia de nudos es un factor que incide en la resistencia de las pruebas, principalmente en la de la flexión estática, donde las probetas tienen una longitud mayor, ya que los resultados de los Módulos de Ruptura y de Elasticidad fueron muy bajos.

Para obtener madera estructural se recomienda la implementación de prácticas silvícolas, principalmente el desrame, ya que a través de su correcta aplicación, se garantiza la ausencia de nudos en la madera aserrada, pues éstos tienen una influencia considerable en los distintos esfuerzos a los que es sometida la madera.

## X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña, L. & Casado, M. 2005. Material de apoyo del curso Tecnología de la madera (en línea). Universidad de Valladolid. España. 35 p. Consultado en 10 ago. 2010. Disponible en: [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)
- American Society Test of Materials. 2000. Designation: D 143 – 94 (Reapproved 2000) Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. 31 p.
- American Society Test of Materials. 2002. Designation: D 245-00 (Reapproved 2002) Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. 16 p.
- American Society Test of Materials. 2002. Designation: D 2395-02 Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. 8 p.
- Calderón, A. s. f. Secado de la madera (en línea). Cuadernos de Dasonomía. Serie Didáctica No. 13. Departamento de Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Argentina. Consultado 4 feb. 2015. Disponible en: [http://campus.fca.uncu.edu.ar:8010/pluginfile.php/9335/mod\\_resource/content/0/SECADO\\_DE\\_LA\\_MADERA.pdf](http://campus.fca.uncu.edu.ar:8010/pluginfile.php/9335/mod_resource/content/0/SECADO_DE_LA_MADERA.pdf)
- Comisión Nacional Forestal, CONAFOR. (s. f.) Paquetes tecnológicos: Ficha técnica del Pinus Maximinoi H.E. Moore (en línea). Consultado 10 ago. 2010. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/970Pinus%20maximinoi.pdf>
- Cruz, J. 2010. Manual para la protección contra el deterioro de la madera. Comisión Nacional Forestal CONAFOR. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 94 pp.
- Díaz, P. 2005. Evaluación de Propiedades Físicas y Mecánicas de madera de Nothofagus glauca (Hualo) proveniente de la zona de Cauquenes. Tesis. Ing. en Industrias de la Madera. Facultad de Ciencias Forestales. Escuela de Ingeniería en Industrias de la Madera. Universidad de Talca, Chile.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., González L., Tablada M. & Robledo C.W. Programa de Análisis Estadístico para computadora InfoStat. 2010. Argentina.

- Domínguez, W. 2006. Análisis comparativo de la influencia del secado en las propiedades físicas y mecánicas del pino colorado. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 125 pp.
- Escobar, E. 2005. Caracterización química de la madera del primer raleo de Pino caribe (*Pinus caribaea* Morelet var. *Hondurensis* (barret y golfari)) A nivel laboratorio, proveniente de la finca Semuc 6, El estor, Izabal. Tesis Ing. Química. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 99 pp.
- Fernández, J., Díez, M. y Gutiérrez, A. 1998. Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural, clasificada visualmente de acuerdo con la norma UNE 56544. Centro de Investigación Forestal CIFOR. España.
- Fonseca, M. 2006. Determinación de la composición química de la madera de pino candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore) procedente de la finca Río Frío, Tactic, Alta Verapaz. Tesis Ing. Química. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 125 pp.
- Forest Products Laboratory. 1999. Wood handbook - Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 p.
- 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.
- García, C. s. f. Propiedades mecánicas (en línea). Ciencia de los materiales. Universidad Nacional de Colombia. Escuela de Física. Consultado 10 oct. 2010. Disponible en: <http://www.unalmed.edu.co/~cpgarcia/mecanicas.PDF>
- Giménez, A., Ríos, N. & Moglia, G., 2000. Relación albura-duramen en tres especies arbóreas de la Región Chaqueña Seca. Revista de Ciencias Forestales – Quebracho N° 8 – Diciembre 2000. Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Av. Belgrano (S) 1912, 4200 Santiago del Estero, Argentina.
- Giordano, G. (1981). Tecnología del legno. Volumen 1. Varia. Architettura Segunda Edición. Unione Tipografico-Editrice Torinese. Italia. 1256 pp.
- Godínez, W. 1996. Ingeniería de la madera en Guatemala. Tesis. Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 123 pp.
- Gonzales, M. 2005. Determinación de la composición química de la madera del pino ocote (*Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl) procedente de plantación en finca

Cucanjá, Tukurú, Alta Verapaz. Tesis Ing. Química. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 111 pp.

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.

Hernandez, R. 2005. Improved Utilization of Small-Diameter Ponderosa Pine in Glued-Laminated Timber. USDA. Forest Products Laboratory. Res. Pap. FPL-RP-625. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 38 p.

Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. IARNA. 2006. Perfil Ambiental de Guatemala: tendencias y reflexiones sobre la gestión ambiental. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, Universidad Rafael Landívar y Asociación Instituto de Incidencia Ambiental. Guatemala. 250 pp.

Instituto Nacional de Bosques. INAB. 2005. Boletín de estadística forestal 2005. Instituto Nacional de Bosques. Guatemala. 24 pp.

Instituto Nacional de Bosques. INAB. 2012. Crecimiento y Productividad de Plantaciones Forestales de Pino Candelillo. Guatemala. 24 pp.

Infomadera. s. f. a Procedimientos para diferenciar la albura del duramen (en línea). Consultado 10 sept. 2010. Disponible en: <http://www.infomadera.net/images/16833.pdf>

Infomadera. s. f. b Propiedades mecánicas de la madera estructural (en línea). Consultado 1 oct. 2010. Disponible en: <http://infomadera.net/empresa/producto/886/info/14220>

Kollmann, F. 1959. Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Segunda Edición. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, Servicio Nacional de la Madera. España.

MAGA. 2002 (a). Mapa de zonas de vida de Holdridge para la República de Guatemala. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. Programa de Emergencia por Desastres Naturales (PEDN). Laboratorio de Información Geográfica. Escala 1:250,000.

MAGA. 2002 (b). Mapa de fisiográfico - geomorfológico para la República de Guatemala. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. Programa de Emergencia por Desastres Naturales (PEDN). Laboratorio de Información Geográfica. Escala 1:250,000.

- McMillen, J. y Wengert, E. 1978. Drying eastern hardwood lumber. Agriculture Handbook No. 528. United States Department of Agriculture USDA. Wisconsin. 110 p.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 1997. Norma Ecuatoriana de Construcción. NEC 10 Parte 7. Estructuras de madera. Ecuador.
- Montgomery, D. 2004. Diseño y Análisis de Experimentos. 2ª Ed. México, D.F.: Limusa. 686 p.
- Ortiz, M. (2010). Caracterización y evaluación de la madera de diámetros menores de *Pinus maximinoi* para la fabricación de secciones compuestas como elemento de construcción. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología. Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología. Universidad del Valle de Guatemala. Guatemala, Guatemala. 96 p.
- Pérez, V. 1983. Manual de propiedades físicas y mecánicas de maderas chilenas. Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile. 451 pp.
- Ramírez, G. 2003. Evaluación de las propiedades mecánicas de tres especies de madera latifoliada. Tesis Ing. Civil Administrativa. Guatemala, Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ingeniería. 47 pp.
- Record, S. 1914. The mechanical properties of wood (en línea). First Edition. Forest Products. Yale University. 117 p. Consultado 10 oct. 2010. Disponible en: <http://www.gutenberg.org/files/12299/12299-h/12299-h.htm#fig22>
- Reyes, E., Valero, S., y Garayse, D. 2003. Estudio preliminar de las propiedades físicas de la especie *Azadirachta indica* (Neem), procedente del Estado Falcón, Venezuela. Revista Forest 47(2) 2003. Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Laboratorio Nacional de Productos Forestales (L.N.P.F.). Sección de Ensayos 1 y 2. Sección de Aglomerado.3 Mérida - Venezuela. p 23 – 29.
- Rietz, R. 1978. Storage of Lumber. Forest Products Laboratory. Forest Service. United States Department of Agriculture USDA. Agriculture Handbook No. 531. Madison, Wis. 68 p.
- Rivas, C. y Joachin, J. 2006. Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de cuatro especies de madera del Petén. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 99 pp.
- Rodríguez, L. 2005. Determinación de los componentes químicos de la madera de pino blanco (*Pinus pseudostrobus* Lindl) proveniente de la finca Las Victorias, Patzún, Chimaltenango. Tesis Ing. Química. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 90 p.

- Salazar, R., Soihet, C. y Méndez, J. 2000. Manejo de semillas de 100 especies forestales de América Latina. Volumen I. Manual Técnico No. 41. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE. Proyecto de Semillas Forestales PROSEFOR. Turrialba, Costa Rica.
- Spavento, E., Keil, G., Monteoliva, S. 2008. Propiedades mecánicas de la madera. Curso de Xilotecología. Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata.
- Simpson, W. 1998. Equilibrium moisture content of Wood in outdoor locations in the United States and Worldwide. United States Department of Agriculture USDA. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 11 p.
- Torelli, N. (1982). Estudio promocional de 43 especies forestales tropicales mexicanas. Programa de cooperación científica y técnica México-Yugoslavia. SARH. SFF., Distrito Federal. 73 pp.
- UNE. 2006. UNE 56544 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural: Madera de coníferas. España. 22 pp.
- United States Department of Agriculture USDA. 2000. Forest Products Laboratory Research Program on Small-Diameter Material. United States Department of Agriculture. USDA. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-110 (Rev.). Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 31 p.
- Vaca, R. 1998. Técnicas para la preservación de maderas. Documento Técnico 65/1998. Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Bolivia. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible BOLFOR. 59 pp.
- Vargas, J. 1987. Manual del técnico forestal: Anatomía y tecnología de la madera. Universidad Mayor de San Simón. Escuela Técnica Superior Forestal. Misión Forestal Alemana. Cochabamba. 119 pp.
- Vignote, S. y Martínez, I. 2006. Tecnología de la madera. Ediciones Mundi-Prensa. 3a. Edición. Madrid.
- Winandy, J. 1994. Wood Properties. USDA-Forest Service, Forest Products Laboratory. Encyclopedia of Agricultural. Science. Orlando, FL: Academic Press: 549-561. Vol. 4. October 1994.
- Zeledón, D. 2005. Utilización del azul bromofenol para la determinación de la albura y el duramen en *Gmelina arborea* (Roxb). Kurú Revista Forestal 2 (5), 2005. Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 2 pp.

## XI. ANEXOS

Cuadro 19. Contenido de humedad de madera en equilibrio a una temperatura determinada y humedad relativa

Temperatura		Contenido de humedad (%) a varios valores de humedad relativa																		
°C	°F	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
-1.1	30	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.4	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
4.4	40	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.3	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
10.0	50	1.4	2.6	3.6	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.4	14.8	16.4	18.4	20.9	24.3
15.6	60	1.3	2.5	3.6	4.6	5.4	6.2	7.0	7.8	8.6	9.4	10.2	11.1	12.1	13.3	14.6	16.2	18.2	20.7	24.1
21.1	70	1.3	2.5	3.5	4.5	5.4	6.2	6.9	7.7	8.5	9.2	10.1	11.0	12.0	13.1	14.4	16.0	17.9	20.5	23.9
26.7	80	1.3	2.4	3.5	4.4	5.3	6.1	6.8	7.6	8.3	9.1	9.9	10.8	11.7	12.9	14.2	15.7	17.7	20.2	23.6
32.2	90	1.2	2.3	3.4	4.3	5.1	5.9	6.7	7.4	8.1	8.9	9.7	10.5	11.5	12.6	13.9	15.4	17.3	19.8	23.3
37.8	100	1.2	2.3	3.3	4.2	5.0	5.8	6.5	7.2	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.6	15.1	17.0	19.5	22.9
43.3	110	1.1	2.2	3.2	4.0	4.9	5.6	6.3	7.0	7.7	8.4	9.2	10.0	11.0	12.0	13.2	14.7	16.6	19.1	22.4
48.9	120	1.1	2.1	3.0	3.9	4.7	5.4	6.1	6.8	7.5	8.2	8.9	9.7	10.6	11.7	12.9	14.4	16.2	18.6	22.0
54.4	130	1.0	2.0	2.9	3.7	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	7.9	8.7	9.4	10.3	11.3	12.5	14.0	15.8	18.2	21.5
60.0	140	0.9	1.9	2.8	3.6	4.3	5.0	5.7	6.3	7.0	7.7	8.4	9.1	10.0	11.0	12.1	13.6	15.3	17.7	21.0
65.6	150	0.9	1.8	2.6	3.4	4.1	4.8	5.5	6.1	6.7	7.4	8.1	8.8	9.7	10.6	11.8	13.1	14.9	17.2	20.4
71.1	160	0.8	1.6	2.4	3.2	3.9	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.5	9.3	10.3	11.4	12.7	14.4	16.7	19.9
76.7	170	0.7	1.5	2.3	3.0	3.7	4.3	4.9	5.6	6.2	6.8	7.4	8.2	9.0	9.9	11.0	12.3	14.0	16.2	19.3
82.2	180	0.7	1.4	2.1	2.8	3.5	4.1	4.7	5.3	5.9	6.5	7.1	7.8	8.6	9.5	10.5	11.8	13.5	15.7	18.7
87.8	190	0.6	1.3	1.9	2.6	3.2	3.8	4.4	5.0	5.5	6.1	6.8	7.5	8.2	9.1	10.1	11.4	13.0	15.1	18.1
93.3	200	0.5	1.1	1.7	2.4	3.0	3.5	4.1	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.7	9.7	10.9	12.5	14.6	17.5
98.9	210	0.5	1.0	1.6	2.1	2.7	3.2	3.8	4.3	4.9	5.4	6.0	6.7	7.4	8.3	9.2	10.4	12.0	14.0	16.9
104.4	220	0.4	0.9	1.4	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.5	5.0	5.6	6.3	7.0	7.8	8.8	9.9			
110.0	230	0.3	0.8	1.2	1.6	2.1	2.6	3.1	3.6	4.2	4.7	5.3	6.0	6.7						
115.6	240	0.3	0.6	0.9	1.3	1.7	2.1	2.6	3.1	3.5	4.1	4.6								
121.1	250	0.2	0.4	0.7	1.0	1.3	1.7	2.1	2.5	2.9										
126.7	260	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.4												
132.2	270	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4													

(Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, 1999)

Cuadro 20. Valores de encogimiento expresados en porcentaje de la dimensión verde para maderas nacionales dentro de los Estados Unidos.

Maderas duras	Encogimiento (%) desde el contenido de humedad de madera verde a madera seca al horno		
	Radial	Tangencial	Volumétrico
Aliso rojo	4.4	7.3	12.6
Alamo	3.3	7.9	11.8
Tilo americano	6.6	9.3	15.8
Haya americano	5.5	11.9	17.2
Abedul amarillo	7.3	9.5	16.8
Olmo americano	4.2	9.5	14.6
Roble negro	4.4	11.1	15.1
Roble rojo	4.4	10.8	14.7
Liquidámbar	5.3	10.2	15.8
Maderas blandas			
Cedro amarillo	2.8	6.0	9.2
Abeto Douglas del norte	3.8	6.9	10.7
Abeto Douglas del oeste	4.8	7.5	11.0
Abeto rojo California	4.5	7.9	11.4
Pino ponderosa	3.9	6.2	9.7
Pino rojo	3.8	7.2	11.3
Pino Virginia	4.2	7.2	11.9
Picea negra	4.1	6.8	11.3
Alerce americano	3.7	7.4	13.6

(Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, 1999)

Cuadro 21. Encogimiento para algunas maderas importadas dentro de los Estados Unidos.

Nombre	Encogimiento (%) desde el contenido de humedad de madera verde a madera seca al horno			Origen
	Radial	Tangencial	Volumétrico	
<i>Ceiba pentandra</i>	2.1	4.1	10.4	América Tropical
<i>Swietenia macrophylla</i>	3.0	4.1	7.8	América Tropical
<i>Virola</i> spp.	4.6	8.8	13.7	América Tropical
<i>Pinus caribaea</i>	6.3	7.8	12.9	América Tropical
<i>Pinus oocarpa</i>	4.6	7.5	12.3	América Tropical
<i>Ceiba pentandra</i>	2.1	4.1	10.4	América Tropical
<i>Araucaria angustifolia</i>	4.0	7.9	11.6	Asia y Oceanía
<i>Aspidosperma</i> spp.	3.8	6.4	11.6	América Tropical
<i>Gmelina arborea</i>	2.4	4.9	8.8	Asia y Oceanía
<i>Cybistax donell-smithii</i>	3.1	5.1	9.1	América Tropical
<i>Quercus</i> spp.	6.4	11.7	18.5	América Tropical
<i>Hevea brasiliensis</i>	2.3	5.1	7.4	América Tropical
<i>Cedrela</i> spp.	4.2	6.3	10.3	América Tropical
<i>Tectona grandis</i>	2.5	5.8	7.0	Asia y Oceanía

(Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, 1999)

Cuadro 22. Propiedades mecánicas de algunas maderas importadas dentro de los Estados Unidos y Canadá. Valores expresados en el Sistema Métrico Decimal.

Nombre científico de las Especies	Contenido de humedad (%)	Gravedad específica	Flexión estática		Compresión paralela al grano (kPa)	Corte paralelo al grano (kPa)	Dureza lateral (N)	Origen
			Módulo de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidad(MPa)				
<i>Araucaria augustifolia</i>	Verde 12 %	0.46 -	49,600 93,100	9,300 11,100	27,600 52,800	6,700 11,900	2,500 3,500	América Tropical
<i>Pinus caribaea</i>	Verde 12 %	0.68 -	77,200 115,100	13,00 15,400	33,800 58,900	8,100 14,400	4,400 5,500	América Tropical
<i>Pinus oocarpa</i>	Verde 12%	0.55 -	55,200 102,700	12,000 15,500	25,400 53,000	7,200 11,900	2,600 4,000	América Tropical
<i>Pinus radiata</i>	Verde 12 %	0.42 -	42,100 80,700	8,100 10,200	19,200 41,900	5,200 11,00	2,100 3,300	Asia
<i>Calophyllum brasiliense</i>	Verde 12 %	0.52 -	72,400 100,700	11,000 12,600	31,400 47,600	8,700 14,300	4,000 5,100	América Tropical
<i>Quercus spp.</i>	Verde 12 %	0.76 -	- 158,600	- 20,800	- -	- -	- 11,100	América Tropical
<i>Swietenia macrophylla</i>	Verde 12%	0.45 -	62,100 79,300	9,200 10,300	29,900 46,700	8,500 8,500	3,300 3,600	América Tropical
<i>Cupressus lusitánica</i>	Verde 12%	0.93 -	42,700 71,000	6,300 7,000	19,900 37,100	6,600 10,900	1,500 2,000	África
<i>Ceiba pentandra</i>	Verde 12 %	0.25 -	15,200 29,600	2,800 3,700	7,300 16,400	2,400 3,800	1,000 1,000	América Tropical
<i>Virola spp.</i>	Verde 12 %	0.42 -	38,600 75,200	11,300 14,100	16,500 35,400	5,000 6,800	1,400 2,300	América Tropical
<i>Cedrela spp.</i>	Verde 12 %	0.41 -	51,700 79,300	9,000 9,900	23,200 42,800	6,800 7,600	2,400 2,700	América Tropical
<i>Tectona grandis</i>	Verde 12 %	0.55 -	80,000 100,700	9,400 10,700	41,100 58,00	8,900 13,000	4,100 4,400	Asia

(Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, 1999)

Cuadro 23. Proporción de albura – duramen en madera de raleo a 0.20 m de altura (altura del tocón).

No.	Diámetro con corteza	Diámetro sin corteza	Duramen observado	Médula	% Albura	% Duramen	% Medula	% Corteza
1	378.0	345.0	0.0	21.0	85.71	0.00	5.56	8.73
2	355.0	313.0	0.0	19.0	82.82	0.00	5.35	11.83
3	333.0	304.0	0.0	16.0	86.49	0.00	4.80	8.71
4	321.0	283.0	0.0	11.0	84.74	0.00	3.43	11.84
5	308.0	274.0	0.0	15.0	84.09	0.00	4.87	11.04
	* Medidas en mm			Promedio	84.77	0.00	4.80	10.43
				Desviación Estándar	1.42	-	0.83	1.59
				Coefficiente de Variación	1.68	-	17.32	15.29

Cuadro 24. Proporción de albura – duramen en madera de raleo a 2.00 m de altura

No.	Diámetro con corteza	Diámetro sin corteza	Duramen observado	Médula	% Albura	% Duramen	% Medula	% Corteza
1	365.0	334.0	0.0	19.0	86.30	0.00	5.21	8.49
2	333.0	300.0	0.0	16.0	85.29	0.00	4.80	9.91
3	330.0	305.0	0.0	10.0	89.39	0.00	3.03	7.58
4	316.0	280.0	0.0	12.0	84.81	0.00	3.80	11.39
5	299.0	268.0	0.0	10.0	86.29	0.00	3.34	10.37
	* Medidas en mm			Promedio	86.42	0.00	4.04	9.55
				Desviación Estándar	1.79	-	0.94	1.52
				Coefficiente de Variación	2.07	-	23.19	15.89

Cuadro 25. Proporción de albura – duramen en madera de corta final a 0.20 m de altura (altura del tocón).

No.	Diámetro con corteza	Diámetro sin corteza	Duramen observado	Médula	% Albura	% Duramen	% Medula	% Corteza
1	421.0	377.0	103.0	5.0	65.08	23.28	1.19	10.45
2	373.0	330.0	135.0	6.0	52.28	34.58	1.61	11.53
3	337.0	303.0	93.0	4.0	62.31	26.41	1.19	10.09
4	328.0	289.0	75.0	5.0	65.24	21.34	1.52	11.89
5	305.0	263.0	55.0	4.0	68.20	16.72	1.31	13.77
	* Medidas en mm			Promedio	62.62	24.47	1.36	11.55
			Desviación Estándar		6.15	6.66	0.19	1.45
			Coefficiente de Variación		9.81	27.21	14.23	12.54

Cuadro 26. Proporción de albura – duramen en madera de corta final a 2.00 m de altura.

No.	Diámetro con corteza	Diámetro sin corteza	Duramen observado	Médula	% Albura	% Duramen	% Medula	% Corteza
1	409.0	367.0	75.0	3.0	71.39	17.60	0.73	10.27
2	343.0	308.0	109.0	5.0	58.02	30.32	1.46	10.20
3	328.0	278.0	74.0	4.0	62.20	21.34	1.22	15.24
4	314.0	277.0	40.0	4.0	75.48	11.46	1.27	11.78
5	285.0	255.0	39.0	3.0	75.79	12.63	1.05	10.53
	* Medidas en mm			Promedio	68.57	18.67	1.15	11.61
			Desviación Estándar		8.06	7.62	0.27	2.13
			Coefficiente de Variación		11.75	40.82	23.78	18.37

Cuadro 27. Inclinación de la fibra en % de la madera de raleo, a partir de la zona central hacia la periferia del tronco.

Repetición	Pieza												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	12.50	12.50	11.11	10.00	8.33	8.33	5.56	7.14	6.67				
2	12.50	11.11	10.00	8.33	7.35	6.67	7.14	5.56	5.26	4.35	3.33	3.16	3.16
3	12.50	11.11	9.09	8.33	7.69	7.14	6.94	6.25	5.43	5.00			
4	11.11	10.00	7.69	7.14	6.25	5.43							
5	12.50	10.00	9.62	9.09	8.33	7.14	7.14	5.56	5.26	5.26	5.00	5.00	5.00
Promedio	12.22	10.94	9.50	8.58	7.59	6.94	6.70	6.13	5.66	4.87	4.17	4.08	4.08
Desviación estándar	0.621	1.032	1.254	1.056	0.861	1.045	0.766	0.753	0.678	0.471	1.179	1.303	1.303
Coeficiente de Variación	5.082	9.4285	13.202	12.313	11.344	15.042	11.444	12.289	11.985	9.6758	28.284	31.934	31.934

Cuadro 28. Inclinación de la fibra en % de la madera de Corta Final, de la zona del duramen hacia la albura

Repetición	No. de Pieza														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	9.80	8.77	10.00	10.00	6.67	5.00	5.56	5.56	5.26	4.21	5.00				
2	10.00	10.00	10.53	11.11	12.50	7.69	7.14	6.25	5.49	5.26	5.00	3.00	3.00	3.00	
3	20.00	17.50	10.00	8.33	8.33	8.06	6.94	6.25	5.56	5.00					
4	14.29	12.50	9.09	8.33	7.69	7.14	6.67	6.25	5.56	5.26	3.16	3.00	3.00	3.00	
5	14.29	12.50	9.80	9.80	8.33	8.33	7.14	6.67	5.56	3.33	5.00	5.00	4.00	3.00	3.00
Promedio	13.675	12.254	9.884	9.516	8.705	7.247	6.690	6.194	5.485	4.614	4.539	3.667	3.333	3.000	3.000
Desviación estándar	4.161	3.348	0.518	1.189	2.228	1.333	0.664	0.400	0.127	0.836	0.921	1.155	0.577	0.000	
Coeficiente de Variación	30.425	27.324	5.245	12.499	25.596	18.394	9.921	6.460	2.310	18.116	20.290	31.492	17.321	0.000	0.000

Cuadro 29. Medidas resumen del porcentaje de inclinación de la fibra

Procedencia de la madera	Repeticiones	Valor Medio	Desviación Estándar.	E. E.	C. V.	Min	Max
Corta Final	15	6.79%	3.39	0.87	49.88	3.00	13.68
Raleo	13	7.04%	2.65	0.73	37.63	4.08	12.22

Cuadro 30. Densidad de la madera de Raleo

Pieza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Densidad g/cm <sup>3</sup>	0.4053	0.4017	0.4285	0.4710	0.4746	0.5024	0.4967	0.4970	0.5058	0.5718	0.5363	0.5762	0.5939

Desde la médula (Pieza No. 1) hacia la periferia del fuste del árbol (Pieza No. 13).

Cuadro 31. Densidad de la madera de Corta Final

Pieza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Densidad g/cm <sup>3</sup>	0.5382	0.5774	0.5382	0.5910	0.6416	0.6739	0.7154	0.7103	0.7067	0.7271	0.7389	0.7610	0.7679	0.7429	0.8040

Desde la médula (Pieza No. 1) hacia la periferia del fuste del árbol (Pieza No. 15).

Cuadro 32. Medidas resumen de la densidad de la madera.

Procedencia de la madera	n	Valor medio gr/cm <sup>3</sup>	Desviación Estándar	E. E.	C. V.	Mínimo	Máximo
Corta Final	15	0.68	0.09	0.02	12.53	0.54	0.80
Raleo	13	0.50	0.06	0.02	12.49	0.40	0.59

Cuadro 33. Contracción dimensional en madera de raleo, en la zona central del tronco.

Muestra	Dimensiones seca al aire			Dimensiones al secar al horno			Contracción Dimensional en %		
	Tangencial	Radial	Longitudinal	Tangencial	Radial	Longitudinal	Tangencial	Radial	Longitudinal
1	20.37	19.18	73.55	19.15	18.72	73.17	6.353	2.493	0.524
2	19.82	20.05	86.63	18.33	19.43	86.28	8.091	3.173	0.406
3	20.13	20.02	86.80	19.18	19.63	86.68	4.952	1.952	0.135
4	20.13	20.02	70.82	19.32	19.70	70.38	4.228	1.607	0.616
5	20.27	19.97	68.30	19.32	19.58	67.68	4.918	1.957	0.911
* Medidas en mm.						Promedio	5.708	2.237	0.518
						Desviación Estándar	1.540	0.612	0.284
						Coefficiente de variación	26.970	27.356	54.901

Cuadro 34. Contracción dimensional en madera de raleo, en la zona de la periferia del tronco.

Muestra	Dimensiones seca al aire			Dimensiones al secar al horno			Contracción Dimensional en %		
	Tangencial	Radial	Longitudinal	Tangencial	Radial	Longitudinal	Tangencial	Radial	Longitudinal
1	20.20	20.50	73.10	19.62	19.40	73.05	2.956	5.670	0.068
2	20.13	19.75	85.08	19.47	19.20	84.65	3.390	2.865	0.508
3	20.18	20.22	81.95	19.53	19.85	81.65	3.328	1.864	0.367
4	20.17	20.05	70.72	19.73	19.53	70.25	2.230	2.663	0.669
5	20.33	20.03	69.47	20.00	19.45	68.82	1.650	2.982	0.944
* Medidas en mm.						Promedio	2.711	3.209	0.511
						Desviación Estándar	0.751	1.444	0.328
						Coefficiente de variación	27.721	44.988	64.056

Cuadro 35. Contracción dimensional en madera de corta final, zona del duramen.

Muestra	Dimensiones Seca al Aire			Dimensiones Seca al Horno			Contracción Dimensional en %		
	Tangencial	Radial	Longitudinal	Tangencial	Radial	Longitudinal	Tangencial	Radial	Longitudinal
1	19.60	20.62	63.82	18.93	20.33	63.08	3.521	1.393	1.162
2	20.80	20.48	55.12	19.97	20.15	55.00	4.174	1.654	0.212
3	21.67	21.00	55.23	20.93	20.20	54.92	3.503	3.960	0.564
4	21.25	20.27	68.72	20.72	19.90	68.55	2.574	1.843	0.243
5	19.68	20.55	56.13	19.00	20.00	55.82	3.596	2.750	0.567
	* Medidas en mm.					Promedio	3.474	2.320	0.550
						Desviación Estándar	0.574	1.049	0.382
						Coefficiente de variación	16.517	45.233	69.483

Cuadro 36. Contracción dimensional en madera de corta final, zona de la albura.

Muestra	Dimensiones iniciales			Dimensiones al secar al horno			Contracción Dimensional en %		
	Tangencial	Radial	Longitudinal	Tangencial	Radial	Longitudinal	Tangencial	Radial	Longitudinal
1	20.43	20.73	77.10	19.35	20.25	77.02	5.599	2.387	0.108
2	20.85	20.82	56.43	19.53	20.15	56.30	6.741	3.309	0.237
3	21.20	20.50	57.08	19.90	19.92	56.98	6.533	2.929	0.175
4	21.35	20.65	71.77	19.97	19.92	71.62	6.928	3.682	0.209
5	19.30	20.77	57.00	18.10	20.33	56.85	6.630	2.131	0.264
	* Medidas en mm.					Promedio	6.486	2.887	0.199
						Desviación Estándar	0.517	0.639	0.060
						Coefficiente de variación	7.977	22.128	30.336

Cuadro 37. Contracción volumétrica en madera de raleo

Muestra	Zona Central			Periferia		
	Volumen en mL		Contracción volumétrica	Volumen en mL		Contracción volumétrica
	Verde	Seca al horno		Verde	Seca al horno	
1	26.00	25.00	4.000	25.00	24.00	4.167
2	34.00	32.00	6.250	24.00	23.00	4.348
3	34.00	31.00	9.677	25.00	24.00	4.167
4	26.00	24.00	8.333	31.00	24.00	29.167
5	27.00	25.00	8.000	22.00	21.00	4.762
		Promedio	7.252			9.322
		Desviación estándar	2.190			11.096
		Coefficiente de variación	30.203			119.033

Cuadro 38. Contracción volumétrica en madera de corta final

Muestra	Duramen			Albura		
	Volumen en mL		Contracción volumétrica	Volumen en mL		Contracción volumétrica
	Verde	Seca al horno		Verde	Seca al horno	
1	25.00	24.00	4.167	25.00	23.00	8.696
2	24.00	23.00	4.348	22.00	20.00	10.000
3	25.00	24.00	4.167	24.00	22.00	9.091
4	31.00	29.00	6.897	30.00	28.00	7.143
5	22.00	21.00	4.762	20.00	18.00	11.111
		Promedio	4.868			9.208
		Desviación estándar	1.160			1.482
		Coefficiente de variación	23.825			16.099

Cuadro 39. Dureza Janka en madera de raleo en estado verde.

Repetición	Radial		Tangencial		Longitudinal	
	Zona Central	Periferia	Zona Central	Periferia	Zona Central	Periferia
1	207.39	272.09	200.75	268.77	162.59	197.43
2	152.64	220.66	199.09	242.23	137.70	160.93
3	189.14	296.98	209.05	328.50	155.95	230.61
4	195.77	210.70	194.11	227.30	225.64	197.43
5	177.52	323.52	235.59	331.82	132.73	245.55
Promedio	184.49	264.79	207.72	279.72	162.92	206.39
Desviación Estándar	20.83	48.51	16.48	48.39	37.18	32.97
Coeficiente de Variación	0.11	0.18	0.08	0.17	0.23	0.16

Carga en kg

Cuadro 40. Dureza Janka en la madera de corta final en estado verde.

Repetición	Radial		Tangencial		Longitudinal	
	Duramen	Albura	Duramen	Albura	Duramen	Albura
1	512.66	454.59	507.68	398.18	320.20	331.82
2	481.82	388.84	416.59	312.48	228.18	248.29
3	353.39	383.25	292.00	393.20	111.16	267.11
4	232.27	228.95	230.61	146.00	175.86	248.86
5	330.16	436.34	328.50	361.68	290.34	346.75
Promedio	382.06	378.40	355.08	322.31	225.15	288.57
Desviación Estándar	115.07	88.92	108.68	104.30	84.73	47.21
Coeficiente de Variación	0.30	0.23	0.31	0.32	0.38	0.16

Carga en kg

Cuadro 41. Dureza Janka en la madera de raleo en estado seco.

Repetición	Radial		Tangencial		Longitudinal	
	Zona Central	Periferia	Zona Central	Periferia	Zona Central	Periferia
1	297.73	306.82	227.27	272.73	309.55	324.09
2	194.55	270.00	161.36	256.82	260.91	245.91
3	205.45	245.00	235.00	287.27	228.64	225.91
4	220.45	295.00	203.64	294.09	218.64	337.73
5	237.73	363.64	245.91	375.45	232.27	393.64
Promedio	231.18	296.09	214.64	297.27	250.00	305.45
Desviación Estándar	40.59	44.64	33.58	45.99	36.81	68.99
Coeficiente de Variación	0.18	0.15	0.16	0.15	0.15	0.23

Carga en kg.

Cuadro 42. Dureza Janka en madera de corta final en estado seco. .

Repetición	Radial		Tangencial		Longitudinal	
	Duramen	Albura	Duramen	Albura	Duramen	Albura
1	568.18	660.00	567.27	713.64	501.36	687.27
2	388.64	443.18	417.27	456.82	325.00	420.00
3	370.91	555.45	452.27	640.45	352.73	540.91
4	314.09	345.91	326.82	440.91	327.27	355.45
5	325.45	489.55	364.09	586.82	348.64	512.73
Promedio	393.45	498.82	425.55	567.73	371.00	503.27
Desviación Estándar	102.45	118.06	92.73	117.61	73.92	126.64
Coeficiente de Variación	0.26	0.24	0.22	0.21	0.20	0.25

Carga en kg

Cuadro 43. Resumen de la prueba de extracción de clavos en madera de raleo en estado verde. Carga en kg

Muestra	Repetición	Zona Central			Periferia		
		Radial	Tangencial	Longitudinal	Radial	Tangencial	Longitudinal
1	1	61.36	41.36	24.09	31.82	72.73	22.73
	2	72.73	62.73	20.45	34.09	45.45	17.27
2	1	52.27	64.55	17.27	54.55	54.55	19.09
	2	52.27	65.91	19.55	36.36	54.55	16.82
3	1	68.18	77.27	15.45	94.09	82.27	30.00
	2	61.36	59.09	20.45	96.36	75.91	38.64
4	1	75.00	77.27	22.73	95.91	81.82	27.27
	2	70.45	68.18	31.82	73.64	82.27	20.45
5	1	50.00	43.18	23.64	59.55	70.45	29.55
	2	88.64	56.82	25.00	71.36	65.91	31.82
	Promedio	65.23	61.64	22.05	64.77	68.59	25.36
	Desviación Estándar	12.17	12.21	4.58	25.64	13.17	7.22
	Coficiente de Variación	0.19	0.20	0.21	0.40	0.19	0.28
	Promedio Radial-Tangencial	63.43			66.68		

Cuadro 44. Resumen de la prueba de extracción de clavos en madera de corta final en estado verde. Carga en kg

No.	Repetición	Duramen			Albura		
		Radial	Tangencial	Longitudinal	Radial	Tangencial	Longitudinal
1	1	91	64	18	86	66	48
	2	82	55	14	109	89	57
2	1	73	48	50	120	105	68
	2	50	73	39	100	127	50
3	1	100	103	25	97	123	26
	2	109	57	28	114	127	26
4	1	61	64	14	95	82	20
	2	48	45	9	100	82	29
5	1	79	89	20	82	93	32
	2	96	109	34	91	84	29
	Promedio	78.86	70.50	25.14	99.50	97.73	38.59
	Desviación Estándar	20.99	22.47	12.79	12.07	21.67	15.90
	Coefficiente de Variación	0.27	0.32	0.51	0.12	0.22	0.41
	Promedio Radial-Tangencial	74.68			98.61		

Cuadro 45. Resumen de la prueba de extracción de clavos en madera de raleo en estado seco. Carga en kg

Muestra	Repetición	Zona Central			Periferia		
		Radial	Tangencial	Longitudinal	Radial	Tangencial	Longitudinal
1	1	54.55	65.91	38.64	77.73	44.55	34.09
	2	53.18	66.82	37.27	86.36	73.64	31.82
2	1	43.18	41.82	25.00	65.91	76.36	41.82
	2	38.64	50.00	25.00	60.00	70.45	37.73
3	1	32.27	38.64	38.64	66.82	74.09	37.27
	2	47.73	47.73	35.91	54.55	57.73	30.91
4	1	50.00	59.09	29.55	79.55	74.09	39.55
	2	40.00	50.45	25.00	93.18	104.55	35.00
5	1	88.64	60.00	38.18	88.64	47.73	35.45
	2	91.82	81.36	38.64	85.00	63.64	38.64
	Promedio	54.00	56.18	33.18	75.77	68.68	36.23
	Desviación estándar	20.30	13.00	6.26	13.17	16.99	3.43
	Coeficiente de variación	0.38	0.23	0.19	0.17	0.25	0.09
Promedio Radial - Tangencial		55.09			72.23		

Cuadro 46. Resumen de la prueba de extracción de clavos en madera de corta final en estado seco. Carga en kg

Muestra	Repetición	Duramen			Albura		
		Radial	Tangencial	Longitudinal	Radial	Tangencial	Longitudinal
1	1	69.09	84.09	39.55	70.45	89.55	52.73
	2	100.00	75.91	34.09	92.73	98.64	43.18
2	1	104.55	95.45	34.09	93.18	68.18	72.73
	2	77.27	61.36	38.64	97.73	88.64	56.82
3	1	69.09	62.27	37.27	104.55	95.45	40.45
	2	73.64	69.55	19.09	93.18	96.36	44.09
4	1	47.73	63.64	10.00	89.55	56.82	43.18
	2	47.73	47.73	22.73	63.64	61.36	34.09
5	1	50.00	58.18	15.91	56.82	70.45	50.91
	2	43.18	49.55	25.00	52.27	61.36	45.45
Promedio		68.23	66.77	27.64	81.41	78.68	48.36
Desviación estándar		21.71	14.93	10.50	18.75	16.55	10.74
Coeficiente de variación		0.32	0.22	0.38	0.23	0.21	0.22
Promedio Radial - Tangencial		67.50			80.05		

Cuadro 47. Prueba de esfuerzo de corte en madera de raleo en estado verde.

No	Madera de zona central del tronco			Madera de la zona periférica del tronco		
	Área de corte en cm <sup>2</sup>	Carga en kg	Esfuerzo de corte en kg/cm <sup>2</sup>	Área de corte en cm <sup>2</sup>	Carga en kg	Esfuerzo de corte en kg/cm <sup>2</sup>
1	3.15	104.55	33.19	2.98	117.27	39.31
2	3.26	103.64	31.82	2.98	113.64	38.09
3	3.15	100.00	31.76	3.26	65.45	20.09
4	3.10	122.73	39.64	3.21	136.36	42.44
5	3.16	124.55	39.39	3.53	100.00	28.33
		Promedio	35.16			33.65
		Desviación estándar	4.02			9.24
		Coeficiente de variación	11.43			27.45

Cuadro 48. Prueba de esfuerzo de corte en madera de corta final en estado verde.

No	Madera del Duramen			Madera de la Albura		
	Área de corte en cm <sup>2</sup>	Carga en kg	Esfuerzo de corte en kg/cm <sup>2</sup>	Área de corte en cm <sup>2</sup>	Carga en kg	Esfuerzo de corte en kg/cm <sup>2</sup>
1	3.01	209.09	69.47	3.60	136.36	37.87
2	3.14	210.00	66.89	3.20	145.45	45.40
3	3.56	150.00	42.13	3.09	181.82	58.90
4	3.44	163.64	47.57	3.28	209.09	63.80
5	3.11	163.64	52.70	3.47	218.18	62.88
		Promedio	55.75			53.77
		Desviación estándar	11.98			11.54
		Coeficiente de variación	21.48			21.46

Cuadro 49. Prueba de esfuerzo de corte en madera de raleo en estado seco.

No	Madera de zona central del tronco			Madera de la zona periférica del tronco		
	Área de corte en cm <sup>2</sup>	Carga en kg	Esfuerzo de corte en kg/cm <sup>2</sup>	Área de corte en cm <sup>2</sup>	Carga en kg	Esfuerzo de corte en kg/cm <sup>2</sup>
1	2.70	107.27	39.80	2.42	94.55	39.15
2	2.78	119.09	42.83	2.60	104.55	40.25
3	2.60	118.18	45.37	2.70	113.64	42.17
4	2.42	139.09	57.43	2.39	149.09	62.45
5	2.70	92.73	34.41	2.72	122.73	45.15
		Promedio	43.97			45.83
		Desviación estándar	8.56			9.56
		Coefficiente de variación	19.47			20.87

Cuadro 50. Prueba de esfuerzo de corte en madera de corta final en estado seco.

No	Madera del Duramen			Madera de la Albura		
	Área de corte en cm <sup>2</sup>	Carga en kg	Esfuerzo de corte en kg/cm <sup>2</sup>	Área de corte en cm <sup>2</sup>	Carga en kg	Esfuerzo de corte en kg/cm <sup>2</sup>
1	2.429	162.591	66.943	2.620	192.727	73.571
2	2.492	212.364	85.215	2.640	168.182	63.705
3	2.526	192.455	76.195	3.018	162.727	53.912
4	2.741	135.455	49.413	3.115	128.182	41.150
5	2.695	155.955	57.868	2.325	123.636	53.179
		Promedio	67.127			57.103
		Desviación estándar	14.221			12.195
		Coefficiente de variación	21.186			21.356

Cuadro 51. Prueba de flexión estática en madera en estado verde.

No.	Raleo				Corta Final			
	Zona Central		Periferia		Duramen		Albura	
	Módulo de Ruptura en kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidad kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de Ruptura en kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidad kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de Ruptura en kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidad kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de Ruptura en kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidad kg/cm <sup>2</sup>
1	234.690	41126.153	358.603	62675.286	430.264	98702.768	597.672	100280.458
2	150.302	54104.505	307.020	59362.204	336.789	481245.320	525.450	75210.340
3	198.962	37456.926	298.443	42807.915	318.339	49942.567	517.301	157713.371
4	274.485	58380.273	366.257	98197.656	294.091	39093.932	325.561	62846.500
5	230.265	29075.365	406.045	50961.803	383.775	53425.984	487.254	95553.381
Promedio	217.741	44028.644	347.274	62800.973	352.652	144482.114	490.648	98320.810
Desviación Est.	46.273	12069.639	44.575	21240.612	54.430	189631.761	100.798	36508.546
CV	0.213	0.274	0.128	0.338	0.154	1.312	0.205	0.371

Cuadro 52. Prueba de flexión estática en madera en estado seco.

No.	Raleo				Corta Final			
	Zona Central		Periferia		Duramen		Albura	
	Módulo de Ruptura en kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidad kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de Ruptura en kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidad kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de Ruptura en kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidad kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de Ruptura en kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidad kg/cm <sup>2</sup>
1	293.123	106048.373	307.049	57403.718	488.482	116912.496	527.220	126661.115
2	234.702	104863.923	258.137	56803.790	355.457	85745.560	475.565	85014.550
3	177.529	8715.759	316.938	115856.859	425.144	112599.600	566.859	96513.943
4	276.761	53932.953	307.340	96313.552	318.438	91983.343	462.394	116494.767
5	197.448	29855.236	535.452	122040.237	300.569	51813.504	417.123	81780.253
Promedio	235.912	60683.249	344.983	89683.631	377.618	91810.901	489.832	101292.926
Desviación Est.	49.577	43893.278	108.930	31221.068	78.230	25975.324	58.254	19641.853
CV	0.210	0.723	0.316	0.348	0.207	0.283	0.119	0.194

Cuadro 53. Prueba de compresión perpendicular a la fibra en madera en estado verde.

No.	Raleo		Corta Final	
	Zona Central Esfuerzo de Compresión en kg/cm <sup>2</sup>	Periferia Esfuerzo de Compresión en kg/cm <sup>2</sup>	Duramen Esfuerzo de Compresión en kg/cm <sup>2</sup>	Albura Esfuerzo de Compresión en kg/cm <sup>2</sup>
1	52.609	49.206	54.274	36.783
2	34.505	51.174	47.756	36.854
3	47.219	54.995	54.274	35.911
4	48.189	52.100	32.979	29.398
5	43.003	54.184	36.004	39.710
Promedio	45.11	52.33	45.06	35.73
Desviación estándar	6.84	2.33	10.06	3.82
Coefficiente de variación	0.15	0.04	0.22	0.11

Cuadro 54. Prueba de compresión perpendicular a fibra en madera en estado seco.

No.	Raleo		Corta Final	
	Zona Central Esfuerzo de Compresión en kg/cm <sup>2</sup>	Periferia Esfuerzo de Compresión en kg/cm <sup>2</sup>	Duramen Esfuerzo de Compresión en kg/cm <sup>2</sup>	Albura Esfuerzo de Compresión en kg/cm <sup>2</sup>
1	36.476	43.417	104.200	113.636
2	54.995	34.305	70.965	92.456
3	46.311	44.596	57.176	96.154
4	46.311	44.303	63.678	68.611
5	42.882	50.171	71.780	99.068
Promedio	45.395	43.358	73.560	93.985
Desviación estándar	6.703	5.718	18.130	16.301
Coefficiente de variación	0.148	0.132	0.246	0.173

Cuadro 55. Prueba de compresión paralela a la fibra en madera en estado verde.

No.	Raleo		Corta Final	
	Zona Central Esfuerzo de Compresión en kg/cm <sup>2</sup>	Periferia Esfuerzo de Compresión en kg/cm <sup>2</sup>	Duramen Esfuerzo de Compresión en kg/cm <sup>2</sup>	Albura Esfuerzo de Compresión en kg/cm <sup>2</sup>
1	113.593	152.788	294.118	265.666
2	125.874	116.550	195.403	221.289
3	147.950	164.272	187.273	269.061
4	132.011	154.258	148.544	194.056
5	155.594	106.266	202.401	297.089
Promedio	135.004	138.827	205.548	249.432
Desviación estándar	16.899	25.676	53.714	41.166
Coefficiente de variación	0.125	0.185	0.261	0.165

Cuadro 56. Prueba de compresión paralela a la fibra en madera en estado seco.

No.	Raleo		Corta Final	
	Zona Central Esfuerzo de Compresión en kg/cm <sup>2</sup>	Periferia Esfuerzo de Compresión en kg/cm <sup>2</sup>	Duramen Esfuerzo de Compresión en kg/cm <sup>2</sup>	Albura Esfuerzo de Compresión en kg/cm <sup>2</sup>
1	105.555	132.450	273.172	359.934
2	135.242	129.380	211.785	324.711
3	105.181	137.741	206.612	412.000
4	154.710	130.984	210.363	297.203
5	85.734	272.134	187.409	262.137
Promedio	117.284	160.538	217.868	331.197
Desviación estándar	27.398	62.463	32.428	57.710
Coefficiente de variación	0.234	0.389	0.149	0.174

Cuadro 57. Arreglo de datos utilizados para el análisis estadístico con el programa Infostat. Madera de Corta Final

Tipo	Estado	Parte	Rep	Dureza	Clavos	Corte	MOE Flexión	MOR Flexión	ComPer	ComPara
CF	Seco	Duramen	1	567.727	82.272	69.470	116912.496	488.482	104.200	273.172
CF	Seco	Albura	1	686.818	87.842	37.870	126661.115	527.220	113.636	359.934
CF	Verde	Duramen	1	510.170	73.000	66.943	98702.768	430.264	54.274	294.118
CF	Verde	Albura	1	426.386	87.500	73.571	100280.458	597.450	36.783	265.666
CF	Seco	Duramen	2	402.955	84.657	66.890	85745.560	355.457	70.965	211.785
CF	Seco	Albura	2	450.000	86.932	45.400	85014.550	475.565	92.456	324.711
CF	Verde	Duramen	2	449.205	61.000	85.215	481245.320	336.789	47.756	195.403
CF	Verde	Albura	2	350.659	113.000	63.705	75210.340	525.450	36.854	221.289
CF	Seco	Duramen	3	411.591	68.637	42.130	112599.600	425.144	57.176	206.612
CF	Seco	Albura	3	597.955	97.385	58.900	96513.943	566.859	96.154	412.000
CF	Verde	Duramen	3	322.693	92.250	76.195	49942.567	318.339	54.274	187.273
CF	Verde	Albura	3	388.227	115.250	53.912	157713.371	517.301	35.911	269.061
CF	Seco	Duramen	4	320.455	51.707	47.570	91983.343	318.438	63.678	210.363
CF	Seco	Albura	4	393.409	67.842	63.800	116494.767	462.394	68.611	297.203
CF	Verde	Duramen	4	231.443	54.500	49.413	39093.932	294.091	32.979	148.544
CF	Verde	Albura	4	187.477	89.750	41.150	62846.500	325.561	29.398	194.056
CF	Seco	Duramen	5	344.773	50.227	52.700	51813.504	300.569	71.78	187.409
CF	Seco	Albura	5	538.182	60.225	62.880	81780.253	417.123	99.068	262.137
CF	Verde	Duramen	5	329.330	93.250	57.868	53425.984	383.775	36.004	202.401
CF	Verde	Albura	5	399.011	87.500	53.179	95553.381	487.254	39.710	297.089

Dónde:

CF = Madera de Corta Final

Clavos = Extracción de clavos (kg)

MOE Flexión = Modulo de Elasticidad en Flexión (kg/cm<sup>2</sup>)

ComPer = Compresión perpendicular a la fibra (kg/cm<sup>2</sup>)

Dureza = Dureza (kg)

Corte = Esfuerzo de corte en (kg/cm<sup>2</sup>)

MOR Flexión = Módulo de Ruptura en flexión (kg/cm<sup>2</sup>)

ComPara = Compresión paralela a la fibra (kg/cm<sup>2</sup>)

Cuadro 58. Arreglo de datos utilizados para el análisis estadístico con el programa Infostat. Madera de Raleo

Tipo	Estado	Parte	Rep	Dureza	Clavos	Corte	MOE Flexión	MOR Flexión	ComPer	ComPara
Raleo	Seco	Central	1	262.500	60.115	33.190	106048.373	293.123	36.476	105.555
Raleo	Seco	Periferia	1	289.773	70.570	39.310	57403.718	307.049	43.417	132.450
Raleo	Verde	Central	1	204.068	59.545	39.804	41126.153	234.690	52.609	113.593
Raleo	Verde	Periferia	1	270.432	46.023	39.149	62675.286	358.603	49.206	152.788
Raleo	Seco	Central	2	177.955	43.410	31.820	104863.923	234.702	54.995	135.242
Raleo	Seco	Periferia	2	263.409	68.180	38.090	56803.790	258.137	34.305	129.380
Raleo	Verde	Central	2	175.864	58.750	42.826	54104.505	150.302	34.505	125.874
Raleo	Verde	Periferia	2	231.443	50.003	40.250	59362.204	307.020	51.174	116.550
Raleo	Seco	Central	3	220.227	41.592	31.760	8715.759	177.529	46.311	105.181
Raleo	Seco	Periferia	3	266.136	63.297	20.090	115856.859	316.938	44.596	137.741
Raleo	Verde	Central	3	199.091	66.475	45.371	37456.926	198.962	47.219	147.950
Raleo	Verde	Periferia	3	312.739	87.158	42.166	42807.915	298.443	54.995	164.272
Raleo	Seco	Central	4	212.045	49.885	39.640	53932.953	276.761	46.311	154.710
Raleo	Seco	Periferia	4	294.545	87.842	42.440	96313.552	307.340	44.303	130.984
Raleo	Verde	Central	4	194.943	72.725	57.430	58380.273	274.485	48.189	132.011
Raleo	Verde	Periferia	4	219.000	83.410	62.449	98197.656	366.257	52.100	154.258
Raleo	Seco	Central	5	241.818	80.455	39.390	29855.236	197.448	42.882	85.734
Raleo	Seco	Periferia	5	369.545	71.252	28.330	122040.237	535.452	50.171	272.134
Raleo	Verde	Central	5	206.557	59.660	34.407	29075.365	230.265	43.003	155.594
Raleo	Verde	Periferia	5	327.670	66.818	45.152	50961.803	406.045	54.184	106.266

Dónde:

CF = Madera de Corta Final

Clavos = Extracción de clavos (kg)

MOE Flexión = Modulo de Elasticidad en Flexión (kg/cm<sup>2</sup>)

ComPer = Compresión perpendicular a la fibra (kg/cm<sup>2</sup>)

Dureza = Dureza (kg)

Corte = Esfuerzo de corte en (kg/cm<sup>2</sup>)

MOR Flexión = Módulo de Ruptura en flexión (kg/cm<sup>2</sup>)

ComPara = Compresión paralela a la fibra (kg/cm<sup>2</sup>)

Cuadro 59. Análisis de la varianza para la prueba de dureza Janka en madera de corta final

F.V.	SC	gl	CM	F	p – valor
Modelo	256653.97	11	23332.18	8.60	0.0026
Estado	62637.60	1	62637.60	23.08	0.0013
Parte	13927.69	1	13927.69	5.13	0.0533
Repetición	141522.61	4	35380.65	13.04	0.0014
Estado*Parte	25201.02	1	25201.02	9.29	0.0159
Estado*Rep	13365.05	4	3341.26	1.23	0.3704
Error	21706.78	8	2713.35		
Total	278360.76	19			

F.V. = Fuente de variación

SC = Suma de cuadrados

gl = grados de libertad

CM = Cuadrados medios

F = Valor de la estadística de F

CV = Coeficiente de variación en porcentaje

CV = 12.54 %  $R^2 = 0.92$

Cuadro 60. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado de la madera de corta final en la prueba de dureza Janka

Estado	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Seco	471.39	10	16.47	A
Verde	359.46	10	16.47	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=53.71899 Error: 2713.3477 gl: 8

Cuadro 61. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de corta final en la prueba de dureza Janka

Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Albura	441.81	10	16.47	A
Duramen	389.03	10	16.47	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )  
 Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=53.71899 Error: 2713.3477 gl: 8

Cuadro 62. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final en la prueba de dureza Janka

Estado	Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Seco	Albura	533.27	5	23.30	A
Seco	Duramen	409.50	5	23.30	B
Verde	Duramen	368.57	5	23.30	B
Verde	Albura	350.35	5	23.30	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )  
 Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=105.49984 Error: 2713.3477 gl: 8

Cuadro 63. Análisis de la varianza para la prueba de extracción de clavos en madera de corta final

F.V.	SC	gl	CM	F	p - valor
Modelo	5556.08	11	505.1	3.48	0.0438
Estado	835.59	1	835.59	5.76	0.0432
Parte	1651.22	1	1651.22	11.37	0.0097
Repetición	1903.87	4	475.97	3.28	0.0718
Estado*parte	158.34	1	158.34	1.09	0.3268
Estado*rep	1007.07	4	251.77	1.73	0.2351
Error	1161.36	8	145.17		
Total	6717.43	19			

F.V. = Fuente de variación

SC = Suma de cuadrados

gl = grados de libertad

CM = Cuadrados medios

F = Valor de la estadística de F

CV = Coeficiente de variación en porcentaje

CV = 15.02 %  $R^2 = 0.83$

Cuadro 64. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de corta final para la prueba de extracción de clavos

Estado	Medias	n	E.E:	Grupo Tukey
Verde	86.7	10	3.81	A
Seco	73.77	10	3.81	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS= 12.42547 Error: 145.1694gl: 8

Cuadro 65. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de corta final para la prueba de extracción de clavos

Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Albura	89.32	10	3.81	A
Duramen	71.15	10	3.81	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS= 12.42547 Error: 145.1694gl: 8

Cuadro 66. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para la prueba de extracción de clavos

Estado	Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Verde	Albura	98.60	5	5.39	A
Seco	Albura	80.05	5	5.39	A B
Verde	Duramen	74.80	5	5.39	A B
Seco	Duramen	67.50	5	5.39	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS= 24.40263 Error: 145.1694gl: 8

Cuadro 67. Análisis de la Varianza para la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra en madera de corta final

F.V.	SC	gl	CM	F	p – valor
Modelo	1702.01	11	154.73	0.92	0.5607
Estado	270.41	1	270.41	1.61	0.2396
Parte	180.16	1	180.16	1.08	0.3300
Repetición	505.72	4	126.43	0.75	0.5823
Estado*Parte	80.83	1	80.83	0.48	0.5069
Estado*Rep	664.89	4	166.22	0.99	0.4643
Error	1340.04	8	167.51		
Total	342.05	19			

F.V. = Fuente de variación

SC = Suma de cuadrados

gl = grados de libertad

CM = Cuadrados medios

F = Valor de la estadística de F

CV = Coeficiente de variación en porcentaje

CV = 22.15 %  $R^2 = 0.96$

Cuadro 68. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de corta final en la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra

Estado	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Verde	62.12	10	4.09	A
Seco	54.76	10	4.09	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=13.34716 Error: 167.5050 gl: 8

Cuadro 69. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de corta final en la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra

Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Duramen	61.44	10	4.09	A
Albura	55.44	10	4.09	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=13.34716 Error: 167.5050 gl: 8

Cuadro 70. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final en la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra

Estado	Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Verde	Duramen	67.13	5	5.79	A
Verde	Albura	57.10	5	5.79	A
Seco	Duramen	55.75	5	5.79	A
Seco	Albura	53.77	5	5.79	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=26.21277 Error: 167.5050 gl: 8

Cuadro 71. Análisis de la varianza del módulo de elasticidad para la prueba de flexión estática en madera de corta final

F.V.	SC	gl	CM	F	p – valor
Modelo	77269030454.29	11	7024457314.03	0.66	0.7418
Estado	3087500427.52	1	3087500427.52	0.29	0.6041
Parte	1681711903.29	1	1681711903.29	0.16	0.7008
Repetición	31132473919.49	4		0.73	0.5937
Estado*Parte	3870225105.57	1		0.37	0.5624
Estado*Rep	37497119098.42	4		0.88	0.5146
Error	84784801296.15	8			
Total	162053831750.43	19			

F.V. = Fuente de variación

SC = Suma de cuadrados

gl = grados de libertad

CM = Cuadrados medios

F = Valor de la estadística de F

CV = Coeficiente de variación en porcentaje

CV = 94.47 %  $R^2 = 0.48$

Cuadro 72. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco del módulo de elasticidad de la madera de corta final para la prueba de flexión estática

Estado	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Verde	121401.46	10	32554.72	A
Seco	96551.91	10	32554.72	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=106166.88883 Error: 10598100162.0182 gl: 8

Cuadro 73. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de corta final para el módulo de elasticidad en la prueba de flexión estática

Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Duramen	118146.51	10	32554.72	A
Albura	99806.87	10	32554.72	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )  
 Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=106166.88883 Error: 10598100162.0182 gl: 8

Cuadro 74. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para el módulo de elasticidad en la prueba de flexión estática

Estado	Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Verde	Duramen	144482.11	5	46039.33	A
Seco	Albura	101292.93	5	46039.33	A
Verde	Albura	98320.81	5	46039.33	A
Seco	Duramen	91810.90	5	46039.33	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )  
 Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=208503.36758 Error: 10598100162.0182 gl: 8

Cuadro 75. Análisis de la varianza del módulo de ruptura para la prueba de flexión estática en madera de corta final

F.V.	SC	gl	CM	F	p - valor
Modelo	156769.670	11	14251.79	8.44	0.0028
Estado	731.770	1	731.77	0.43	0.5289
Parte	78228.660	1	78228.66	46.3	0.0001
Repetición	58948.140	4	14737.04	8.72	0.0051
Estado*parte	828.020	1	828.02	0.49	0.5037
Estado*rep	18033.080	4	4508.27	2.67	0.1107
Error	13516.400	8	1689.55		
Total	170286.060	19			

F.V. = Fuente de variación

SC = Suma de cuadrados

gl = grados de libertad

CM = Cuadrados medios

F = Valor de la estadística de F

CV = Coeficiente de variación en porcentaje

CV = 9.61 %  $R^2 = 0.92$

Cuadro 76. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco del módulo de ruptura de la madera de corta final para la prueba de flexión estática

Estado	Medias	n	E.E:	Grupo Tukey
Seco	433.73	10	13	A
Verde	421.63	10	13	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS= 42.38972 Error: 1689.5494gl: 8

Cuadro 77. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de corta final para el módulo de ruptura en la prueba de flexión estática

Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Albura	490.22	10	13	A
Duramen	365.13	10	13	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS= 42.38972Error: 1689.5494gl: 8

Cuadro 78. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para el módulo de ruptura en la prueba de flexión estática

Estado	Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Verde	Albura	490.60	5	18.38	A
Seco	Albura	489.83	5	18.38	A
Seco	Duramen	377.62	5	18.38	B
Verde	Duramen	352.65	5	18.38	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS= 83.25005Error: 1689.5494gl: 8

Cuadro 79. Análisis de la Varianza para la prueba compresión perpendicular a la fibra en madera de corta final

F.V.	SC	gl	CM	F	p – valor
Modelo	12956.33	11	1177.85	17.03	0.0002
Estado	9408.30	1	9408.30	136	<0.0001
Parte	153.98	1	153.98	2.23	0.1741
Repetición	1643.53	4	410.88	5.94	0.0161
Estado*Parte	1106.43	1	1106.43	15.99	0.0040
Estado*Rep	644.09	4	161.02	2.33	0.1438
Error	553.43	8	69.18		
Total	13509.76	19			

F.V. = Fuente de variación

SC = Suma de cuadrados

gl = grados de libertad

CM = Cuadrados medios

F = Valor de la estadística de F

CV = Coeficiente de variación en porcentaje

CV = 13.40 %  $R^2 = 0.96$

Cuadro 80. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de corta final para la prueba de compresión perpendicular a la fibra

Estado	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Seco	83.77	10	2.63	A
Verde	40.39	10	2.63	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=8.57754 Error: 69.1792 gl: 8

Cuadro 81. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de corta final para la prueba de compresión perpendicular a la fibra

Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Albura	64.86	10	2.63	A
Duramen	59.31	10	2.63	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=8.57754 Error: 69.1792 gl: 8

Cuadro 82. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para la prueba de compresión perpendicular a la fibra

Estado	Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Seco	Albura	93.99	5	3.72	A
Seco	Duramen	73.56	5	3.72	B
Verde	Duramen	45.06	5	3.72	C
Verde	Albura	35.73	5	3.72	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=16.84562 Error: 69.1792 gl: 8

Cuadro 83. Análisis de la varianza para la prueba de compresión paralela a la fibra en madera de corta final

F.V.	SC	gl	CM	F	p - valor
Modelo	73361.14	11	6669.19	5.09	0.0145
Estado	11065.03	1	11065.03	8.45	0.0197
Parte	30894.99	1	30894.99	23.60	0.0013
Repetición	17495.14	4	4373.78	3.34	0.0689
Estado*parte	6028.16	1	6028.16	4.60	0.0642
Estado*rep	7877.83	4	1969.46	1.50	0.2883
Error	10474.68	8	1309.34		
Total	83835.83	19			

F.V. = Fuente de variación

SC = Suma de cuadrados

gl = grados de libertad

CM = Cuadrados medios

F = Valor de la estadística de F

CV = Coeficiente de variación en porcentaje

CV = 14.42 %  $R^2 = 0.88$

Cuadro 84. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de corta final para la prueba de compresión paralela a la fibra

Estado	Medias	n	E.E:	Grupo Tukey
Seco	274.53	10	11.44	A
Verde	227.49	10	11.44	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=37.31647 Error: 1309.3354 gl: 8

Cuadro 85. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de corta final para la prueba de compresión paralela a la fibra

Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Albura	290.31	10	11.44	A
Duramen	211.71	10	11.44	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )  
 Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=37.31647 Error: 1309.3354 gl: 8

Cuadro 86. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de corta final para la prueba de compresión paralela a la fibra

Estado	Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Seco	Albura	331.20	5	16.18	A
Verde	Albura	249.43	5	16.18	B
Seco	Duramen	217.87	5	16.18	B
Verde	Duramen	205.55	5	16.18	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )  
 Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=73.28659 Error: 1309.3354 gl: 8

Cuadro 87. Análisis de la varianza para la prueba de dureza Janka en madera de raleo

F.V.	SC	gl	CM	F	p – valor
Modelo	46303.07	11	4209.37	5.29	0.0128
Estado	3280.54	1	3280.54	4.13	0.0767
Parte	28096.81	1	28096.81	35.33	0.0003
Repetición	12601.55	4	3150.39	3.96	0.0463
Estado*Parte	7.08	1	7.08	0.01	0.9272
Estado*Rep	2317.09	4	579.27	0.73	0.5970
Error	6361.34	8	795.17		
Total	52664.40	19			

F.V. = Fuente de variación

SC = Suma de cuadrados

gl = grados de libertad

CM = Cuadrados medios

F = Valor de la estadística de F

CV = Coeficiente de variación en porcentaje

CV = 11.42 % R2 = 0.88

Cuadro 88. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de raleo en la prueba de dureza Janka

Estado	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Seco	259.80	10	8.92	A
Verde	234.18	10	8.92	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=29.08067 Error: 795.1673 gl: 8

Cuadro 89. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de raleo en la prueba de dureza Janka

Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Albura	284.47	10	8.92	A
Duramen	209.51	10	8.92	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=29.08067 Error: 795.1673 gl: 8

Cuadro 90. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en la prueba de dureza Janka

Estado	Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Seco	Albura	296.68	5	12.61	A
Verde	Albura	272.26	5	12.61	A B
Seco	Duramen	222.91	5	12.61	B C
Verde	Duramen	196.10	5	12.61	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=57.11212 Error: 795.1673 gl: 8

Cuadro 91. Análisis de la varianza para la prueba de extracción de clavos en madera de raleo

F.V.	SC	gl	CM	F	p - valor
Modelo	2653.96	11	241.27	1.88	0.1893
Estado	9.76	1	9.76	0.08	0.7896
Parte	519.60	1	519.60	4.05	0.0789
Repetición	895.79	4	223.95	1.75	0.2325
Estado*parte	241.01	1	241.01	1.88	0.2075
Estado*rep	987.81	4	246.95	1.93	0.1994
Error	1025.37	8	128.17		
Total	3679.32	19			

F.V. = Fuente de variación

SC = Suma de cuadrados

gl = grados de libertad

CM = Cuadrados medios

F = Valor de la estadística de F

CV = Coeficiente de variación en porcentaje

CV = 17.59 % R2 = 0.72

Cuadro 92. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de raleo en la prueba de extracción de clavos

Estado	Medias	n	E.E:	Grupo Tukey
Verde	65.06	10	3.58	A
Seco	63.66	10	3.58	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=11.67535 Error: 128.1710gl: 8

Cuadro 93. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de raleo en la prueba de extracción de clavos

Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Periferia	69.46	10	3.58	A
Central	59.26	10	3.58	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=11.67535 Error: 128.1710gl: 8

Cuadro 94. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en la prueba de extracción de clavos

Estado	Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Seco	Periferia	72.23	5	5.06	A
Verde	Periferia	66.68	5	5.06	A
Verde	Central	63.43	5	5.06	A
Seco	Central	55.09	5	5.06	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=11.67535 Error: 22.92946gl: 8

Cuadro 95. Análisis de la varianza para la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra en madera de raleo

F.V.	SC	gl	CM	F	p – valor
Modelo	1393.73	11	126.70	4.29	0.0242
Estado	550.66	1	550.33	18.65	0.0025
Parte	0.16	1	0.16	0.01	0.9431
Repetición	614.98	4	153.74	5.21	0.0231
Estado*Parte	14.23	1	14.23	0.48	0.5072
Estado*Rep	213.71	4	53.43	1.81	0.2203
Error	236.16	8	29.52		
Total	1629.90	19			

F.V. = Fuente de variación

SC = Suma de cuadrados

gl = grados de libertad

CM = Cuadrados medios

F = Valor de la estadística de F

CV = Coeficiente de variación en porcentaje

CV = 13.70 %  $R^2 = 0.86$

Cuadro 96. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco para la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra en madera de raleo

Estado	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Verde	44.90	10	1.72	A
Seco	34.41	10	1.72	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=5.60322 Error: 29.5206 gl: 8

Cuadro 97. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de raleo en la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra

Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Periferia	39.74	10	1.72	A
Zona Central	39.56	10	1.72	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )  
 Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=5.60322 Error: 29.5206 gl: 8

Cuadro 98. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en la prueba del esfuerzo de corte paralelo a la fibra

Estado	Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Verde	Periferia	45.83	5	2.43	A
Verde	Zona Central	43.97	5	2.43	A B
Seco	Zona Central	35.16	5	2.43	A B
Seco	Periferia	33.65	5	2.43	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )  
 Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=11.00428 Error: 29.5206 gl: 8

Cuadro 99. Análisis de la varianza del módulo de elasticidad para la prueba de flexión estática en madera de raleo

F.V.	SC	gl	CM	F	p – valor
Modelo	7812055126.73	11	710186829.70	0.49	0.8628
Estado	2369366565.15	1	2369366565.15	1.64	0.2358
Parte	2852789871.48	1	2852789871.48	1.98	0.1972
Repetición	1566394119.30	4	391598529.83	0.27	0.8883
Estado*Parte	130766360.78	1	130766360.78	0.09	0.7710
Estado*Rep	892738210.02	4	223184552.50	0.15	0.9554
Error	11533726521.05	8	1441715815.13		
Total	19345781647.78	19			

F.V. = Fuente de variación

SC = Suma de cuadrados

gl = grados de libertad

CM = Cuadrados medios

F = Valor de la estadística de F

CV = Coeficiente de variación en porcentaje

CV = 59.05 %  $R^2 = 0.40$

Cuadro 100. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de raleo en el módulo de elasticidad para la prueba de flexión estática

Estado	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Seco	75183.44	10	12007.15	A
Verde	53414.81	10	12007.15	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=39157.49599 Error: 1441715815.1318 gl: 8

Cuadro 101. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de raleo en el módulo de elasticidad para la prueba de flexión estática

Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Periferia	76242.30	10	12007.15	A
Zona Central	52355.95	10	12007.15	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=39157.49599 Error: 1441715815.1318 gl: 8

Cuadro 102. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en el módulo de elasticidad para la prueba de flexión estática

Estado	Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Seco	Periferia	89683.63	5	16980.67	A
Verde	Periferia	62800.97	5	16980.67	A
Seco	Zona Central	60683.25	5	16980.67	A
Verde	Zona Central	44028.64	5	16980.67	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=76902.22320 Error: 1441715815.1318 gl: 8

Cuadro 103. Análisis de la varianza del módulo de ruptura para la prueba de flexión estática en madera de raleo

F.V.	SC	gl	CM	F	p - valor
Modelo	105251.7	11	9568.34	1.89	0.1883
Estado	315.27	1	315.27	0.06	0.8094
Parte	71164.48	1	71164.48	14.04	0.0057
Repetición	30100.04	4	7525.01	1.48	0.2935
Estado*parte	523.38	1	523.38	0.1	0.7562
Estado*rep	3148.54	4	787.13	0.16	0.9552
Error	40558.11	8	5069.76		
Total	145809.8	19			

F.V. = Fuente de variación

SC = Suma de cuadrados

gl = grados de libertad

CM = Cuadrados medios

F = Valor de la estadística de F

CV = Coeficiente de variación en porcentaje

CV = 24.85 %  $R^2 = 0.72$

Cuadro 104. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de raleo en el módulo de ruptura para la prueba de flexión estática

Estado	Medias	n	E.E:	Grupo Tukey
Seco	290.45	10	22.52	A
Verde	282.51	10	22.52	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS = 73.42922 Error: 5069.7632 gl: 8

Cuadro 105. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de raleo en el módulo de ruptura para la prueba de flexión estática

Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Periferia	346.13	10	22.52	A
Central	226.83	10	22.52	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS = 73.42922 Error: 5069.7632 gl: 8

Cuadro 106. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en el módulo de elasticidad para la prueba de flexión estática

Estado	Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Verde	Periferia	347.27	5	31.84	A
Seco	Periferia	344.98	5	31.84	A
Seco	Central	235.91	5	31.84	A
Verde	Central	217.74	5	31.84	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS = 144.20918 Error: 5069.7632 gl: 8

Cuadro 107. Análisis de la Varianza para la prueba de compresión perpendicular a la fibra en madera de raleo

F.V.	SC	gl	CM	F	p – valor
Modelo	382.10	11	34.74	0.75	0.6813
Estado	94.25	1	94.25	2.03	0.1925
Parte	33.67	1	33.67	0.72	0.4197
Repetición	58.11	4	14.53	0.31	0.8622
Estado*Parte	107.26	1	107.26	2.30	0.1675
Estado*Rep	88.81	4	22.20	0.48	0.7524
Error	372.35	8	46.54		
Total	754.45	19			

F.V. = Fuente de variación

SC = Suma de cuadrados

gl = grados de libertad

CM = Cuadrados medios

F = Valor de la estadística de F

CV = Coeficiente de variación en porcentaje

CV = 14.66 %  $R^2 = 0.51$

Cuadro 108. Resumen de la prueba de comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco de la madera de raleo en la prueba de compresión perpendicular a la fibra

Estado	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Verde	48.72	10	2.16	A
Seco	44.38	10	2.16	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=7.03566 Error: 46.5436 gl: 8

Cuadro 109. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de raleo en la prueba de compresión perpendicular a la fibra

Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Albura	47.85	10	2.16	A
Duramen	45.25	10	2.16	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=7.03566 Error: 46.5436 gl: 8

Cuadro 110. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en la prueba de compresión perpendicular a la fibra

Estado	Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Verde	Albura	52.33	5	3.05	A
Seco	Duramen	45.40	5	3.05	A
Verde	Duramen	45.11	5	3.05	A
Seco	Albura	43.36	5	3.05	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS=13.81748 Error: 46.5436 gl: 8

Cuadro 111. Análisis de la varianza para la prueba de compresión paralela a la fibra en madera de raleo

F.V.	SC	gl	CM	F	p – valor
Modelo	10863.96	11	987.63	0.49	0.8672
Estado	19.91	1	19.91	0.01	0.9236
Parte	2770.16	1	2770.16	1.36	0.2766
Repetición	2320.71	4	580.18	0.29	0.8794
Estado*Parte	1943.50	1	1943.50	0.96	0.3568
Estado*Rep	3809.67	4	952.42	0.47	0.7579
Error	16258.09	8	2032.26		
Total	27122.04	19			

F.V. = Fuente de variación

SC = Suma de cuadrados

gl = grados de libertad

CM = Cuadrados medios

F = Valor de la estadística de F

CV = Coeficiente de variación en porcentaje

CV = 32.69 %  $R^2 = 0.40$

Cuadro 112. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para el estado verde y seco para la prueba de compresión paralela a la fibra en madera de raleo

Estado	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Seco	138.91	10	14.26	A
Verde	136.92	10	14.26	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS = 46.49057 Error: 2032.2611 gl: 8

Cuadro 113. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la parte de la madera de raleo en la prueba de compresión paralela a la fibra

Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Albura	149.68	10	14.26	A
Duramen	126.14	10	14.26	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS = 46.49057 Error: 2032.2611 gl: 8

Cuadro 114. Comparación múltiple de medias usando el criterio de Tukey para la interacción entre el estado y la parte de la madera de raleo en la prueba de compresión paralela a la fibra

Estado	Parte	Medias	n	E.E.	Grupo Tukey
Seco	Albura	160.54	5	20.16	A
Verde	Albura	138.83	5	20.16	A
Verde	Duramen	135.00	5	20.16	A
Seco	Duramen	117.28	5	20.16	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Prueba: Tukey Alfa=0.05 DMS = 91.30379 Error: 2032.2611 gl: 8