

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

PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE *Pinus maximinoi* COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

TESIS DE GRADO

STHEFAN HERNAN PAREDES RAMIREZ

CARNET 12908-11

SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ, SEPTIEMBRE DE 2017
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

PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE *Pinus maximinoi* COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

TESIS DE GRADO

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

POR
STHEFAN HERNAN PAREDES RAMIREZ

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, SEPTIEMBRE DE 2017
CAMPUS "SAN PEDRO CLAVER, S . J." DE LA VERAPAZ

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

RECTOR: P. MARCO TULIO MARTINEZ SALAZAR, S. J.
VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO
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
SECRETARIO: MGTR. LUIS MOISES PEÑATE MUNGUÍA
DIRECTOR DE CARRERA: MGTR. JOSÉ MANUEL BENAVENTE MEJÍA

NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

MGTR. CARLOS ERNESTO ARCHILA CARDONA

TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN

MGTR. EDWIN ESTUARDO VAIDES LÓPEZ
ING. ROBERTO WALDEMAR MOYA FERNÁNDEZ
ING. ULICER CLEOTILDE LÓPEZ ARMAS

Cobán, Alta Verapaz, septiembre 28 de 2017

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 Sthefan Hernán Paredes Ramírez, carné 1290811, titulado: **“Propiedades físicas y mecánicas de la especie *Pinus maximinoi* como material de construcción”**, el cual considero que cumple con los requisitos establecidos por la facultad para ser aprobado, previo a su autorización de impresión.

Atentamente,



Ing. MSc. Carlos Ernesto Archila Cardona

Colegiado no. 1682

Cod. URL. 6413



Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado del estudiante STHEFAN HERNAN PAREDES RAMIREZ, Carnet 12908-11 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. 06144-2017 de fecha 23 de octubre de 2017, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE *Pinus maximinoi* COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

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 28 días del mes de septiembre del año 2017.



MGTR. LUIS MOISES PEÑATE MUNGUÍA, SECRETARIO
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
Universidad Rafael Landívar

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la fuerza, las ganas de sobresalir, la sabiduría y no dejarme en el camino hasta lograr lo que yo quería.

A mis Padres Rafael Hernán y Lesbia Maribel por ser ejemplo para mí y así querer sobresalir y luchar por ser alguien en la vida.

A mi familia en especial mis hermanas Michelle y Kelly que son la inspiración para mí, y por quienes quise lograr graduarme.

A mi asesor de tesis Mgtr. Carlos Ernesto Archila Cardona por confiar en mí en todo momento de este proceso y por su asesoría debida.

Al Ing. Francisco Del Cid Reyes que me apoyo en las pruebas mecánicas en el laboratorio del campus central, al igual que el Mgtr. José Manuel Benavente Mejía que me apoyo en todo mi proceso de tesis.

A mis compañeros Iván Guzmán, Allan Winter, Elvis Hernández, Dennis Villatoro, Francisco Arriaza y Belfi Pérez quienes me apoyaron e incentivaron siempre a graduarme y ser ingeniero.

DEDICATORIA

A Dios

Por darme fortaleza y sabiduría para seguir en cada día de mi vida, además de no dejarme solo en todo el proceso de mi formación.

Mi Padre y Madre

Rafael Paredes y Maribel Ramírez por confiar en mí y darme el ejemplo a seguir todos los días, además de su apoyo incondicional.

Mis hermanas

Michelle y Kelly Paredes por darme amor y ánimo para cumplir todo lo que me propongo.

Mi novia

Dulce Sierra por estar conmigo en todo momento, apoyarme y darme la madurez en mis decisiones.

Mis compañeros

Iván Guzmán, Allan Winter, Elvis Hernández, Dennis Villatoro, Francisco Arriaza y Belfi Pérez por apoyarme en toda la carrera y por la amistad brindada.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 MARCO TEÓRICO	3
2.1 PINO CANDELILLO (<i>Pinus maximinoi</i> H.E. Moore)	3
2.1.1 Clasificación taxonómica.....	3
2.1.2 Descripción de la especie	3
2.1.3 Distribución	4
2.1.4 Propagación.....	4
2.1.5 Usos.....	4
2.1.6 Importancia económica.....	4
2.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA.....	5
2.2.1 Propiedades físicas.....	5
2.2.2 Propiedades mecánicas de la madera	5
2.3 ANÁLISIS BENEFICIO-COSTO	6
2.4 ANTECEDENTES	8
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	16
3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	16
3.2 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	17
4 OBJETIVOS	18
4.1 GENERAL	18
4.2 ESPECÍFICOS	18
5 HIPÓTESIS.....	19
5.1 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	19
6 METODOLOGÍA.....	20
6.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE DONDE SE OBTUVO EL MATERIAL EXPERIMENTAL (MAPA)	20
6.2 CLIMA Y ZONA DE VIDA.....	21
6.3 SUELOS.....	21
6.4 METODOLOGÍA EN BASE A LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22

6.4.1	Objetivo específico no. 1	22
6.4.2	Objetivo específico no. 2	22
6.4.3	Objetivo específico no. 3	22
6.5	MATERIAL EXPERIMENTAL	23
6.6	FACTORES ESTUDIADOS	24
6.6.1	Propiedades físicas	24
6.6.2	Propiedades mecánicas	33
6.7	DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS	44
6.8	DISEÑO EXPERIMENTAL	47
6.9	MÓDELO ESTADÍSTICO	48
6.10	UNIDAD EXPERIMENTAL	48
6.11	CROQUIS DE CAMPO	48
6.12	MANEJO DEL EXPERIMENTO	49
6.12.1	Selección y corte de materia prima	49
6.12.2	Elaboración de probetas y almacenaje	50
6.12.3	Realización de pruebas físicas	50
6.12.4	Realización de pruebas mecánicas	50
6.13	VARIABLES RESPUESTA	50
6.13.1	Densidad húmeda y seca (g/cm^3)	51
6.13.2	Porcentaje de humedad (%)	51
6.13.3	Contracción volumétrica (%)	51
6.13.4	Flexión estática (kg/cm^2)	52
6.14	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	53
6.15	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	53
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
7.1	PROPIEDADES FÍSICAS EVALUADAS	54
7.1.1	Densidad	54
7.1.2	Humedad	58
7.1.3	Contracción volumétrica	61
7.2	PROPIEDADES MECÁNICAS EVALUADAS	63
7.2.1	Compresión perpendicular a la fibra	63
7.2.2	Compresión paralela a la fibra	65
7.2.3	Flexión estática	67
7.2.4	Módulo de ruptura	70

7.2.4	Módulo de elasticidad	72
7.2	RESUMEN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.....	74
7.3	CLASIFICACIÓN DE USO SEGÚN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS	76
7.3.1	Propiedades físicas.....	76
7.3.2	Propiedades mecánicas.....	79
7.4	ANÁLISIS BENEFICIO-COSTO DE LA UTILIZACIÓN DE MADERA DE <i>Pinus maximinoi</i> H. E. Moore EN EL MERCADO DE LA CONSTRUCCIÓN	84
7.4.1	Raleos.....	84
8	CONCLUSIONES.....	89
9	RECOMENDACIONES.....	91
10	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
11	ANEXOS.....	97

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Descripción de los Tratamientos. ²	44
Cuadro 2. Dimensiones de Probetas y normas utilizadas para ensayos de Propiedades Físicas y Mecánicas.	47
Cuadro 3. Análisis de varianza para la variable densidad húmeda. (F crítico = 4.46) ..	54
Cuadro 4. Densidad Húmeda Resultados Comparación Múltiple de Medias según criterio Tukey.	55
Cuadro 5. Análisis de varianza para la variable densidad seca. (F crítico = 4.46).	56
Cuadro 6. Densidad Seca Resultados Comparación Múltiple de Medias según criterio Tukey. ⁷	57
Cuadro 7. Análisis de varianza para la variable humedad. (F crítico = 4.46). ⁸	59
Cuadro 8. Humedad Resultados Comparación Múltiple de Medias según criterio Tukey. ⁹	59
Cuadro 9. Análisis de varianza para la variable contracción volumétrica (F crítico = 4.46). ¹⁰	61
Cuadro 10. Análisis de varianza para la variable compresión perpendicular. (F crítico = 4.46). ¹¹	63
Cuadro 11. Compresión Perpendicular a la Fibra Resultados Comparación Múltiple de Medias según criterio Tukey. ¹²	64
(F crítico = 4.46). ¹³	65
Cuadro 13. Compresión Paralela a la Fibra Resultados Comparación Múltiple de Medias según criterio Tukey. ¹⁴	66
Cuadro 14. Análisis de varianza para la variable flexión estática.(F crítico = 4.46). ¹⁵ ...	68

Cuadro 15. Flexión Estática Resultados Comparación Múltiple de Medias según criterio Tukey. ¹⁶	68
Cuadro 16. Análisis de varianza para la variable módulo de ruptura. ¹⁷	70
Cuadro 17. Módulo de Ruptura Resultados Comparación Múltiple de Medias según criterio Tukey. ¹⁸	71
Cuadro 18. Análisis de varianza para el módulo de elasticidad. (F crítico = 4.46). ¹⁹	72
Cuadro 19. Resumen de valores obtenidos de las propiedades físicas de cada sección del fuste evaluado. ²⁰	74
Cuadro 20. Resumen de valores obtenidos de las propiedades mecánicas de cada sección del fuste evaluado. ²¹	75
Cuadro 21. Clasificación de la madera según su densidad. ²²	76
Cuadro 22. Equilibrio de Humedad. ²³	77
Cuadro 23. Clasificación de la madera según su contracción volumétrica. ²⁴	78
Cuadro 24. Clasificación de la madera según su esfuerzo a compresión perpendicular a la fibra. ²⁵	79
Cuadro 25. Clasificación de la madera según su esfuerzo a compresión paralela a la fibra. ²⁶	80
Cuadro 26. Clasificación de la madera según el módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE) a partir del ensayo a flexión estática. ²⁷	81
Cuadro 27. Resumen de clasificación de uso de <i>P. maximinoi</i>	82
Cuadro 28. Costos unitarios de actividades en un raleo. ²⁸	84
Cuadro 29. Tabla de rendimiento volumen comercial <i>Pinus maximinoi</i> H. E. Moore. ²⁹	86
Cuadro 30. Análisis beneficio costo de la utilización de madera de <i>Pinus maximinoi</i> H. E. Moore en el mercado de la construcción. ³⁰	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de la finca donde se extrajo el material experimental <i>Pinus maximinoi</i> H.E. Moore.	20
Figura 2. Probetas para determinar Densidad de cada tratamiento del experimento. (Denotadas A=Sección Apical, M=Sección Media, B=Sección Basal).	25
Figura 3. Parafina para cubrir las piezas o probetas. Se puede observar cómo se está calentando dicha sustancia.	26
Figura 4. Probetas para la determinación de porcentaje de Humedad.	28
Figura 5. Determinación del peso (gramos) de cada una de las probetas del porcentaje de Humedad.	29
Figura 6. Horno en el cual se introdujeron las piezas o probetas.	29
Figura 7. Probetas después de 24 horas de secado y listas para determinar su peso seco.	30
Figura 8. Pieza dentro de probeta para determinar el nivel desplazado en mililitros. ...	32
Figura 9. Maquina Universal Instron para ensayos mecánicos.	34
Figura 10. Fecha de la última calibración, no debe pasar un año sin el mantenimiento. (Fecha de ensayos 11 de enero de 2017).	34
Figura 11. Ensayo de flexión estática, 70 cm de luz entre apoyos y 3 cm del apoyo hacia el extremo.	35
Figura 12. Falla de la probeta en ensayo a flexión estática.	36
Figura 13. Tipos de falla ensayo de flexión estática. (ASTM D 143-94 00, 2000).	37
Figura 14. Grafica posición carga aplicada generada por maquina universal Instron.	37
Figura 15. Ensayo de compresión paralela a la fibra en la maquina universal.	38

Figura 16. Gráfica posición-carga generada en el ensayo de compresión paralela a fibra. ¹⁷	39
Figura 17. Tipos de falla ensayo de compresión paralela a la fibra. (ASTM D 143-94 00, 2000). ¹⁸	40
Figura 18. Ensayo de Compresión perpendicular a la fibra en la maquina universal. ¹⁹	41
Figura 19. Gráfica posición-carga generada en el ensayo de compresión perpendicular a la fibra. ²⁰	42
Figura 20. Secciones del fuste de un árbol experimentadas las propiedades físicas y mecánicas de <i>Pinus maximinoi</i> H.E. Moore. ²¹	46
Figura 21. Croquis de campo aleatorización de las 15 unidades experimentales (total de tratamientos) que conforman el ensayo. ²²	49
Figura 22. Densidad (Medias) según tratamientos de propiedades físicas de <i>Pinus maximinoi</i> H.E. Moore. ²³	57
Figura 23. Humedad (Medias) según tratamientos de propiedades físicas de <i>Pinus maximinoi</i> H.E. Moore. ²⁴	60
Figura 24. Contracción Volumétrica (Medias) según tratamientos de propiedades físicas de <i>Pinus maximinoi</i> H.E. Moore. ²⁵	62
Figura 25. Compresión Perpendicular (Medias) según tratamientos de propiedades físicas de <i>Pinus maximinoi</i> H.E. Moore. ²⁶	64
Figura 26. Compresión Paralela (Medias) según tratamientos de propiedades físicas de <i>Pinus maximinoi</i> H.E. Moore. ²⁷	67
Figura 27. Flexión Estática (Medias) según tratamientos de propiedades físicas de <i>Pinus maximinoi</i> H.E. Moore. ²⁸	69

Figura 28. Módulo de Ruptura (Medias) según tratamientos de propiedades físicas de *Pinus maximinoi* H.E. Moore. ²⁹ 71

Figura 29. Módulo de Elasticidad (Medias) según tratamientos de propiedades físicas de *Pinus maximinoi* H.E. Moore. ³⁰ 73

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA ESPECIE
***Pinus maximinoi* H. E. Moore COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN en**
SAN CRISTÓBAL VERAPAZ

RESUMEN

La investigación se realizó en la finca Santa Gabrielita Chisiram, ubicada en el municipio de San Cristóbal, Alta Verapaz. El objetivo general fue determinar las propiedades físicas y mecánicas de la especie *Pinus maximinoi* H. E. Moore para su aplicación y beneficio económico como material de construcción. Se implementó un diseño experimental de bloques completos al azar con 3 tratamientos y 5 repeticiones. Las variables evaluadas fueron densidad, humedad, contracción volumétrica, compresión paralela y perpendicular a la fibra, flexión estática y los módulos de ruptura y elasticidad. Los datos obtenidos se tabularon y procesaron con el software InfoStat®. Se realizó un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95% y se utilizó la prueba de Tukey para determinar el mejor tratamiento. En base al análisis estadístico los tratamientos mostraron diferencias significativas siendo la sección Basal el mejor tratamiento en 7 de 9 variables respuesta evaluadas, en las otras 2 no existieron diferencias significativas estadísticamente. Los resultados obtenidos en medias generales fueron: densidad húmeda de 0.64 g/cm³, densidad seca 0.59 g/cm³, porcentaje de humedad 18.48%, contracción volumétrica 6.68%, compresión paralela 223.54 kg/cm², compresión perpendicular 84.81 kg/cm², flexión 30.16 kg/cm², MOR 633.32 kg/cm² y MOE 48,271.24 kg/cm². En base a resultados se clasificó entre semipesada y semiligera, la humedad bajo del máximo permisible, en madera de poca contracción y en alta compresión perpendicular. Según el análisis beneficio costo la mejor utilidad como material de construcción son parales, con una relación b/c de 1.4.

1 INTRODUCCIÓN

La especie de *Pinus maximinoi* H. E. Moore es una de las más abundantes y conocidas en la región, por lo que su estudio e investigación son de interés para el país en especial en el ámbito forestal. Esta especie provee una gran cantidad de madera para el mercado en el país, por lo que su uso es de importancia. Por la cantidad que se extrae de esta especie en bosques naturales y en plantaciones los consumidores demandan otros usos que no sean solo como material de combustión (leña) o el comercio de la misma. Según el INAB (2017) registró un área hasta el 2016 de 12,225.86 hectáreas de *P. maximinoi* en la región de Alta Verapaz.

Un uso que esta especie de madera aplica, es en obra civil, como material de construcción, por ejemplo para la instalación de losas o entrepisos se utilizan parales de madera. En muchos aprovechamientos forestales o raleos, hay recursos los cuales no se aprovechan y que pueden ser útiles en otros casos como lo es en construcción. Debido al crecimiento de la población y al avance del casco urbano, la necesidad de obras como viviendas es prioridad, por lo tanto la implementación de un material de construcción que sea factible en economía, tiempo y calidad, es de importancia para la región.

Utilizando este recurso forestal de otra forma, para darle un valor agregado en el mercado, se necesita mejorar su producción en la región y darle un manejo sustentable a este recurso renovable. Motivos para utilizar la madera como material de construcción existen como lo son el plazo de obra, prefabricación del material, clima habitable entre otros. Empresas como Lignum, Profigsa en Guatemala se dedican a la construcción de viviendas, pisos, techos y pergolas con diferentes tipos de madera incluidas el *P. maximinoi* que es una de las más utilizadas con los cuidados respectivos para garantizar la vida útil y rendimiento de este recurso como material de construcción.

La cultura en la utilización de este material es muy antigua, hay que actualizar el uso de este recurso en este ámbito como material de construcción. Se busca un uso diferente del recurso madera para apoyar al sector forestal y mejorar las condiciones de muchos productores que por intermediarios no están obteniendo el valor adecuado y teniendo el riesgo mayor.

Para determinar la factibilidad de la especie *P. maximinoi*, como material de construcción es de importancia determinar las propiedades físicas y mecánicas para clasificar el uso de la misma. Es necesario emplear un normativo el cual específicamente es la norma ASTM D-143-94 para realizar las pruebas necesarias para determinar cada propiedad de esta especie que nos dé resultados los cuales se van a interpretar para su aplicación en la industria como material de construcción. En esta especie se han realizado investigaciones sobre las propiedades físico-mecánicas pero no le han dado la utilidad debida o una finalidad a la investigación. En esta investigación se buscó determinar y mostrar que esta especie es funcional y/o una alternativa como material de construcción.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 PINO CANDELILLO (*Pinus maximinoi* H.E. Moore)

2.1.1 Clasificación taxonómica

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

Reino:	Plantae
Subreino:	Embrionta
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 y Pinabete.
Origen:	De México y Centro América.

2.1.2 Descripción de la especie

En un estudio reciente UFM (2017), esta especie era conocida antes como *Pinus tenuifolia*, pero esto no se consideró válido, porque hay otro pino en el Himalaya con el mismo nombre, un árbol de 30 a 40 m de alto. Tiene la corteza gruesa, de color café grisáceo. Hojas en forma de agujas, agrupadas en un fascículo con cinco acículas, pendulares, de 20 a 35 cm de largo. Conos (o piñas) de color café, solitarios o en pares.

Tienen un pedúnculo que se cae con ellos. Los conos tienen de 120 a 160 escamas, y las semillas, aladas, son de color café claro.

2.1.3 Distribución

Del sur de México al noroeste de Nicaragua. En Guatemala vive de los 1500 a los 2800 msnm. (INAB, 2016).

2.1.4 Propagación

Según el Arboretum de la universidad Francisco Marroquín en 2017, por lo regular hay 40 semillas por piña o cono y el árbol puede producir hasta 120 piñas al año. Las semillas son recolectadas de los conos maduros. Se pueden recolectar de diciembre a febrero, pero la época varía de acuerdo con las condiciones climáticas de cada lugar. Recolectadas las semillas, se secan al sol durante cinco horas y se almacenan en bolsas a temperaturas de 3-4 ° C, con una humedad de 6-8%. Las semillas pueden permanecer viables de 5 a 10 años. Cuando se pretende sembrarlas, deben remojarse durante un lapso de 12 a 18 horas. En los almácigos se enterrarán dos semillas por bolsa. No debe hacerse el trasplante antes de que las plantitas alcancen una altura de 5 cm.

2.1.5 Usos

La madera es ampliamente usada para con artesanales o en construcción. También se emplea como leña. (Fuentes, 2014).

2.1.6 Importancia económica

En Guatemala, la importancia económica de los pinos radica en que la mayoría de la población indígena rural los utiliza como fuente de leña y de ocote. La madera de pino es ampliamente usada por ser más barata que la del ciprés o la del cedro, pero es de inferior

calidad. En artesanía, el pino se aprovecha para fabricar adornos, juguetes y muebles. (UFM, 2017).

2.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA

2.2.1 Propiedades físicas

Según 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, 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).

2.2.2 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 et al. (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.

Ademas Spavento et al. (2008) menciona que 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.).

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. (Spavento et al.,2008).

2.3 ANÁLISIS BENEFICIO-COSTO

Según Carrasco (2017) análisis costo-beneficio es una herramienta financiera que mide la relación entre los costos y beneficios asociados a un proyecto de inversión con el fin de evaluar su rentabilidad, entendiéndose por proyecto de inversión no solo como la creación de un nuevo negocio, sino también, como inversiones que se pueden hacer en un negocio en marcha tales como el desarrollo de nuevo producto o la adquisición de nueva maquinaria.

Mientras que la relación costo-beneficio (B/C), también conocida como índice neto de rentabilidad, es un cociente que se obtiene al dividir el Valor Actual de los Ingresos totales netos o beneficios netos (VAI) entre el Valor Actual de los Costos de inversión o costos totales (VAC) de un proyecto. (Carrasco, 2017).

$$B/C = VAI / VAC$$

Según el análisis costo-beneficio, un proyecto o negocio será rentable cuando la relación costo-beneficio es mayor que la unidad.

$$B/C > 1 \rightarrow \text{el proyecto es rentable}$$

Los pasos necesarios para hallar y analizar la relación costo-beneficio son los siguientes: (Carrasco, 2017).

1. Hallar costos y beneficios: en primer lugar hallamos la proyección de los costos de inversión o costos totales y los ingresos totales netos o beneficios netos del proyecto o negocio para un periodo de tiempo determinado.
2. Convertir costos y beneficios a un valor actual: debido a que los montos que hemos proyectado no toman en cuenta el valor del dinero en el tiempo (hoy en día tendrían otro valor), debemos actualizarlos a través de una tasa de descuento.
3. Hallar relación costo-beneficio: dividimos el valor actual de los beneficios entre el valor actual de los costos del proyecto.
4. Analizar relación costo-beneficio: si el valor resultante es mayor que 1 el proyecto es rentable, pero si es igual o menor que 1 el proyecto no es viable pues significa que los beneficios serán iguales o menores que los costos de inversión o costos totales.
5. Comparar con otros proyectos: si tendríamos que elegir entre varios proyectos de inversión, teniendo en cuenta el análisis costo-beneficio, elegiríamos aquél que tenga la mayor relación costo-beneficio.

2.4 ANTECEDENTES

Las investigaciones realizadas sobre las propiedades físico-mecánicas de la madera en Guatemala han sido escasas, por la falta de laboratorios para las pruebas de las propiedades y el alto costo que estas pruebas implican. En este caso se cuenta con los laboratorios del campus central de la Universidad Rafael Landívar los cuales estuvieron a la altura al momento de realizarse las pruebas de las propiedades mecánicas. Se consideran a continuación investigaciones relativas al tema.

Campos (2015), realizó una investigación sobre las propiedades físico-mecánicas de la especie *Pinus maximinoi* H. E. Moore en Cobán Alta Verapaz, realizó estas pruebas en madera de segundo raleo de una plantación de 11 años y de una corta final de una plantación forestal de 30 años localizadas en la finca Choval, Cobán Alta Verapaz. Enfocándose como variables de respuesta 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 entre ellos utilizar esta madera como material de construcción.

Este autor 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.

Castellanos (2008), realizó una investigación de las características mecánicas de la madera y su aplicación en la industria de la construcción, en donde concluye que funciona mecánicamente como un sólido elástico y macroscópicamente homogéneo que obedece a las leyes de la resistencia de materiales y que, dentro de ciertos límites de calidad y

variabilidad, puede ser un material confiable para su incorporación en el proceso constructivo.

Establece que la relación entre las propiedades físicas y mecánicas de cada madera en particular, se encuentran delimitadas por las variables físicas de referencia para la especie y las condiciones durante la determinación de la cota mecánica: densidad, contenido de humedad y temperatura y, sobre todo, las condiciones reales de servicio de la madera. Además, la industria de la construcción requiere de información confiable y estandarizada sobre la calidad tecnológica de la madera, para así poder incorporar este material al proceso de edificación. Esta conclusión implica a su vez proponer que la investigación del comportamiento mecánico de la madera debe orientarse hacia las necesidades propias de la industria.

Además Castellanos (2008), en esta investigación determinó resultados de las propiedades mecánicas de la madera en general estableciendo diferencias entre cada tipo de madera, y como este recurso natural es aplicado en la industria de la construcción y además plantea que para determinar si una especie pueda funcionar como material de construcción se tiene que determinar propiedades físicas como mecánicas de la especie a investigar, ya que se encuentran directamente relacionadas.

Rodríguez y Vergara (2008), en este estudio se evaluó las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus canarienses* de 46 años crecido en el secano de la Región del Maule, Chile. La madera se acondicionó a 12% de humedad, y los ensayos físicos y mecánicos se efectuaron de acuerdo a las normas chilenas. La densidad básica alcanzó $0,503 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$. Con relación al *Pinus radiata* crecido en el país, las determinaciones estuvieron dentro del rango o sobre su límite superior, con excepción de la resistencia a la tracción perpendicular.

Su durabilidad natural es excelente y puede clasificarse entre las mejores calidades de madera de pino. Las clases de pino en el mundo son explotadas de gran manera y las

propiedades físico-mecánicas han sido un parámetro para comparar las especies de madera que se producen para diferentes usos pero entre ellos el beneficio de este recurso como material de construcción. (Rodríguez & Vergara, 2008).

Sosa (2004) en el presente estudio se enfocó a determinar las propiedades físicas y mecánicas de su madera por sección longitudinal del fuste, puesto que se desconocen las aptitudes, resistencia y calidad de su madera. Para lograr estos objetivos, se realizaron ensayos de flexión estática, compresión paralela y perpendicular a la fibra dura, corte paralelo de fibra, clivaje, tensión paralela y perpendicular a la fibra, densidad, contracción y humedad, para lo cual se usaron las normas y metodología de la American Society for Testing and Materials (ASTM).

La metodología utilizada en el estudio de Sosa (2004) fue analizar las propiedades físico-mecánicas en las diferentes secciones del árbol, y el autor concluye que varían los resultados en cada sección del fuste, por lo cual sus propiedades de igual manera. De manera general y de acuerdo a los resultados obtenidos en casi todos los ensayos, las probetas provenientes de la primera troza o sección basal soportaron un mayor esfuerzo, éstas presentaron un promedio aritmético más alto y un coeficiente de variación más bajo que las probetas provenientes de las alturas del fuste media y apical.

Moreno (2006) realizó un investigación con madera proveniente de plantaciones experimentales de *Tectona grandis* Linn. F. (teca) de 8 años de edad, ubicadas en Bolivia. Referente a las propiedades físicas, se determinó que la densidad al 12% de contenido de humedad fue de 0.58 g/cm³, el peso específico básico registrado fue de 0.50; las contracciones en general fueron bajas: 5.33%. Referente a las propiedades mecánicas se obtuvieron los siguientes valores: en flexión estática, el módulo de ruptura (MOR) registrado fue de 963.60 kg/cm² y el módulo de elasticidad de 105313.21 kg/cm²; en compresión paralela se obtuvo un MOR de 460.59 kg/cm², en compresión perpendicular, se registró un esfuerzo en el límite proporcional de 70.92 kg/cm².

En términos generales, se puede concluir que la madera de teca de 8 años de edad creciendo en Bolivia, presenta propiedades físico-mecánicas ligeramente inferiores a las reportadas por otros autores en otras regiones del mundo, producto de que fueron utilizados árboles de muy corta edad jóvenes.

Otro estudio realizado por Castañeda (2013) en base a propiedades físico mecánicas (corte y flexión) de la especie de madera tropical teca en el sistema de laminado pegado estructura en Colombia.

Que por sus características físicas, presenta ventajas en comparación a las especies de coníferas que habitualmente se utilizan por la industria; por esto, con ensayos mecánicos de corte en teca se verificaron que no existen problemas con la utilización de adhesivos estructurales utilizados para los laminados en madera, y por medio de pruebas de flexión se obtuvieron valores por encima de las resistencias admisibles de la normativa internacional, lo cual avalaría un posible uso de la teca en este sistema constructivo, lo que ampliaría las posibilidades, para que arquitectos y constructores colombianos utilicen la madera tropical, no solamente para usos decorativos, si no que pueden ser elementos importantes dentro de las estructuras de edificaciones.

Además de las coníferas, latifoliadas como la teca han sido estudiadas para su posterior aprovechamiento en términos de explorar su mercado como el de la construcción por los resultados en base a las pruebas físico-mecánicas, los cuales son un comparativo entre especies de madera y usos en base a normativos internacionales de calidad.

Valero et al. (2005) realizaron una investigación en el contexto del sector forestal y de la construcción venezolana, difundir las principales fortalezas y debilidades que pueda presentar el bambú *Bambusa vulgaris* como material constructivo confiable y seguro estructuralmente. Para alcanzar este objetivo se lograron determinar sus propiedades físicas y mecánicas, entre otras: sus esfuerzos de diseño; su variación de espesor; su

estabilidad dimensional; y su densidad en condición de humedad seca al aire. Así, al final de la línea de producción se podrán obtener productos de excelente calidad.

Se concluye al final de la investigación que este bambú a su corta edad es un material lignocelulósico que puede ser utilizado con bastante confiabilidad por los ingenieros y arquitectos venezolanos, para la construcción de viviendas, edificaciones y muebles, considerándose previamente el proceso de conservación y secado a fin de garantizar, una vez puesto en servicio, una mayor vida útil.

El fundamento de estudio para realizar las investigaciones de las propiedades físico-mecánicas es que son una de las principales características que determinan los usos más convenientes que deben darse a cada una de ellas. (Aróstegui, 2010).

Además Aróstegui (2010) hace una investigación de las propiedades de dos especies de *Podocarpus* en donde concluye que la parte terminal del fuste si es tratada y seleccionada se puede utilizar en postes su tronco recto y cilíndrico. Establece usos probables de acuerdo a los requisitos que deben reunir las maderas según sus usos, por ejemplo el Romerillo macho puede utilizarse en muebles, en construcción estructural inferior y en obras inferiores como en carpintería por su buen comportamiento al trabajo con máquinas, por su textura fina y fácil de trabajar. En la otra especie forestal que es *Podocarpus montanus* establece usos como que la madera de esta especie puede emplearse en construcciones estructurales, carrocerías, encofrados, cubiertas de naves y buques, obras exteriores e interiores como pisos.

Prades (2000) realizó un trabajo sobre las propiedades del *Pinus pinaster* Ait., procedente de los Montes del Marquesado Granada, seleccionado por ser una de las coníferas más representativas de las masas forestales y su madera una de las más utilizadas en la industria de carpintería y mueble en la Comunidad andaluza. La caracterización se ha realizado con probetas de pequeñas dimensiones libres de defectos que proporcionan los valores máximos de una determinada propiedad de la madera. Se determinan y

analizan seis características morfológicas, quince características físicas y trece propiedades mecánicas.

De los resultados de los ensayos de las propiedades mecánicas se desprenden valores próximos a los obtenidos en trabajos similares con esta especie, si bien algo inferiores. Los resultados en resistencia a flexión estática, dinámica son bajos y su resistencia a compresión axial mediana. En cuanto a las propiedades físicas, resulta una madera semipesada, poco nerviosa y semidura, con unos valores de densidad algo superiores a los medios de la especie. (Prades, 2000).

Fernandez et al. (1995) determinó variabilidad en las propiedades físico - mecánicas de la madera, en que coeficientes de variación del 30 % para una propiedad pueden considerarse frecuentes aconsejan estudiar las propiedades de una madera para cada zona de procedencia, determinando su calidad y sus aplicaciones más adecuadas, en particular, en un contexto, en Andalucía, en que se encuentra muy extendida la idea de que la madera procedente de los montes repoblados de la Comunidad, no satisface los requerimientos de calidad de la industria de carpintería y mueble, destinándose fundamentalmente a embalaje.

Suirezs (2005) realizó un trabajo para estudiar el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus taeda* L. impregnada por vacío-presión con preservador (CrO₃; CuO; As₂O₅) con tres retenciones, 5, 10 y 15 kg/m³. Las propiedades mecánicas de resistencia a la flexión estática, compresión paralela a las fibras, tracción perpendicular a las fibras, disminuyen levemente sus valores promedios con respecto a la madera sin impregnar, pero estas diferencias no son estadísticamente significativas, para 95 % de confianza. La impregnación ha producido un efecto positivo en la dureza y en el corte paralelo a las fibras tangencial siendo estas diferencias estadísticamente significativas.

Además de los estudios de las propiedades físico-mecánicas de la especie *P. maximinoi* se toma en cuenta el uso que pretende darle esta investigación a la especie como material de construcción y a continuación se presentan algunas investigaciones relacionadas.

Se realizó una recopilación de información, antecedentes sobre las aplicaciones de la madera en la construcción en Guatemala. Entre los usos como material de construcción concluye que la madera se utiliza para cielos falsos que cumplen esa función además de ser decorativos, como tabiques que son elementos de construcción que separa ambientes, puertas es una forma de construcción, pisos de madera, hasta la elaboración de una vivienda hecha por elementos estructurales de madera como las viguetas para piso, viguetas para cielo raso (cielo falso), columnas de sección rectangular y circular, postes y cubiertas por parte de Burrión (2004).

Para elaboración de una vivienda o una estructura elaborada solo por madera se tienen que tomar en cuenta especificaciones establecidas por las normas técnicas de COGUANOR y ASTM (2000).

Ortiz (2010), realizó una evaluación sobre la especie *P. maximinoi* como elemento de construcción, en donde concluye que su estudio el uso de la madera juvenil (diámetros menores) de esta clase de pino trabaja como elemento estructural de carácter principal otorgándole de esta manera un valor agregado al uso de esta especie. A través de la construcción de vigas de sección compuesta por madera juvenil de *P. maximinoi* de esta manera desarrolló el diseño en donde evaluó propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de diámetros menores (10 a 20 cm) de esta especie. En esta investigación se puede constatar la relación de las propiedades físico-mecánicas para el estudio de esta especie como material de construcción.

Mansilla (1996), realizó una investigación sobre la ingeniería de la madera, en donde concluye que este material es de abastecimiento inagotable, siempre y cuando esto ocurra como resultado de inteligentes programas de reforestación, como amplia potencialidad de diverso rango en los campo de la construcción. Al final concluye que el trabajo con la madera está relacionado con las características y propiedades físicas-mecánicas para el uso, selección, clasificación y diseño estructural de las especies maderables.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En el panorama forestal y ambiental de Guatemala, cada vez son más las áreas con plantaciones de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, los propietarios y productores de estas plantaciones evitan el manejo forestal en las mismas como lo son raleos y podas, debido al costo que esto implica. Además la falta de estas prácticas silviculturales traen como consecuencia no obtener un retorno económico intermedio de la venta del producto del raleo y la disminución de la producción comercial final al no concentrar el crecimiento del volumen en pocos pero mejores árboles.

La situación en el país es de importancia, un manejo sostenible de los bosques, de los recursos naturales, del valor económico de los mismos buscando aplicaciones para darles otro uso, es esencial para la conservación de los suelos contra la erosión, cobertura forestal y la protección del medio ambiente.

La necesidad de utilizar el recurso forestal con un valor agregado, en especial un valor económico en el mercado forestal, es lo que lleva a buscar aplicaciones para la madera en especial especies del área y que su producción cumpla con la demanda del uso alternativo que se le quiera dar. El uso desproporcionado de los recursos naturales en el país debido a la necesidad de los habitantes implica la búsqueda de estos recursos, como lo es la madera. Y en esta especie *P. maximinoi* que hay en gran cantidad, su manejo es de importancia, ya que se está desaprovechando y devaluando con la mala utilidad que se le da. Esta especie, es una de las especies más utilizadas en las reforestaciones con fines comerciales; se encuentra plantada en el altiplano central y principalmente en la zona norte del país, en la región de las Verapaces.

3.2 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

En respuesta al problema de la deforestación del país, el uso y aplicación de esta especie es un incentivo para establecer plantaciones de *P. maximinoi*. En el departamento de Alta Verapaz, esta especie se maneja, se produce y está creciendo en los bosques y plantaciones de forma que no hay otra especie dominante en la región, por lo que radica la importancia del uso que se le pueda dar. El Instituto Nacional de Bosques INAB, registra en 2016, 12,225.86 hectareas de *P. maximinoi* y en el país un total de 21,674.08.

Un incentivo sería darle un uso o aplicación a la madera que se extrae en raleos. Y a la vez se le daría un mejor manejo sostenible y producción de esta especie. La madera se utiliza como material de construcción bajo ciertas normas que establecen una resistencia para ser usadas en la construcción, por lo cual se tienen que determinar las propiedades físicas y mecánicas para qué califique esta madera de *P. maximinoi* como material de construcción. De esta forma hacer un nicho para el comercio de esta madera en la industria forestal y que sea un incentivo para los propietarios a ralear sus plantaciones forestales.

El uso de la madera en la construcción permitiría ordenar un sistema de comercialización de la madera que no vaya en detrimento de los bosques, así mismo al generar demanda sobre este recurso, la madera de esta especie tomaría valor y actividades como la reforestación y el manejo sostenible se desarrollarían adecuadamente.

La madera de raleos no tiene valor económico significativo para los productores, por lo cual la actividad de manejo de raleo no se aplica en plantaciones de esta especie. Por lo tanto a través del estudio de sus propiedades físico-mecánicas se puede determinar otro uso a esta madera, y es aquí donde se puede aumentar el valor económico de este recurso y fomentar así los raleos en las plantaciones forestales. Además de obtener información sobre esta especie con ensayos normados y en un laboratorio.

4 OBJETIVOS

4.1 GENERAL

Determinar las propiedades físicas y mecánicas de la especie *Pinus maximinoi* H. E. Moore para su aplicación y beneficio económico como material de construcción.

4.2 ESPECÍFICOS

Determinar las propiedades físicas y mecánicas de la madera *Pinus maximinoi* H. E. Moore de 12 años de edad.

Establecer de acuerdo a las pruebas físicas y mecánicas realizadas si la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore de 12 años de edad, puede utilizarse como material estructural en la industria de la construcción.

Realizar un análisis de beneficio-costos de la utilización de madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore en el mercado de la construcción.

5 HIPÓTESIS

5.1 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

La madera de la especie *Pinus maximinoi* H. E. Moore a través de los resultados de las propiedades físico mecánicas, de su clasificación de uso y beneficio económico es de utilidad como material de construcción.

6 METODOLOGÍA

6.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE DONDE SE OBTUVO EL MATERIAL EXPERIMENTAL (MAPA)

La finca donde se obtuvo la madera de la investigación se encuentra en San Cristóbal Verapaz, A.V. El nombre de la finca es Santa Gabrielita Chisiram la cual se estableció en 2003 una plantación de *Pinus maximinoi* H. E. Moore con una densidad inicial de 1,111 árboles por hectárea. En la figura 1, se muestra de manera gráfica, la ubicación de la finca.

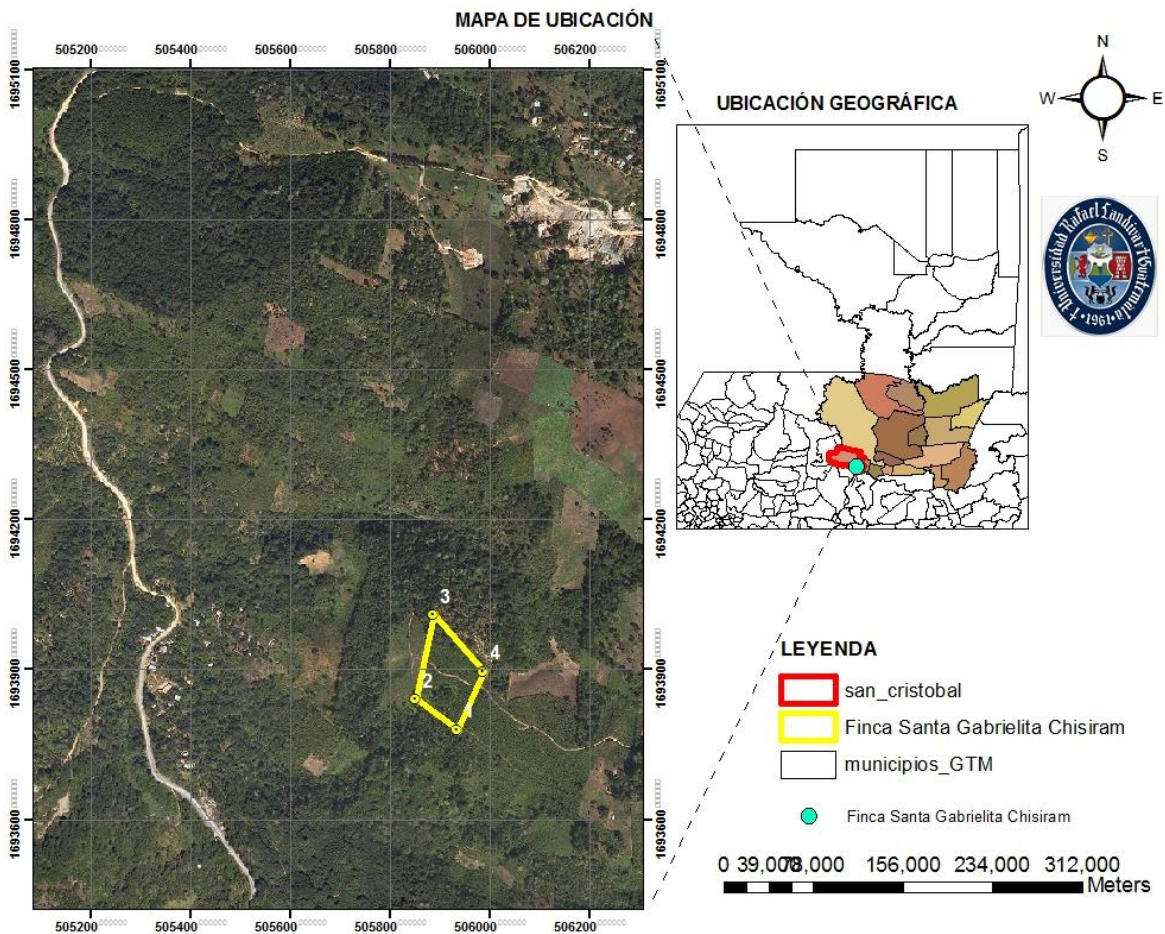


Figura 1. Ubicación geográfica de la finca donde se extrajo el material experimental *Pinus maximinoi*.

Además la finca donde se obtuvo la madera de *P. maximinoi* se encontró en su segundo raleo al momento de la extracción, y en justo momento para proceder con esta investigación. El primer raleo el cual se realizó a los 7 años de haberse implementado esta especie en la finca, tuvo una intensidad del 45%, se copilaron datos dasométricos antes de proceder a la extracción del segundo raleo, con una edad de 12 años: pendiente entre 16 a 32%, diámetro promedio 24 cm., altura promedio 16 m, densidad 612 árboles/ha, área Basal: 28.44 m²/ha, un volumen: 176.44 m³/ y un estrato C3. Estos datos fueron por parte del propietario de la finca Esteban Flores, quien tenía parcelas permanentes para la toma de datos.

6.2 CLIMA Y ZONA DE VIDA

La finca se encuentra según el sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge se encuentra dentro del Bosque muy húmedo subtropical frío (BmH-sf). (MAGA, 2010).

Según URL, ONU (2012), el clima de Alta Verapaz se define como semicálido muy húmedo sin estación seca definida. Las temperaturas anuales promedio van de los 17°C a los 21°C y con una precipitación promedio superior a los 2,000 mm anuales y una humedad relativa promedio del 88%.

6.3 SUELOS

Los suelos de la finca pertenecen al grupo de las Tierras Altas Sedimentarias, se recopiló que la plantación actual hay suelos con una pendiente 16 al 32%. (MAGA, 2010).

6.4 METODOLOGÍA EN BASE A LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS

6.4.1 Objetivo específico no. 1

Para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la especie *P. maximinoi* de 12 años de edad, se utilizó la normativa ASTM para elaborar las probetas a ensayar y en ella también describe los parámetros, procedimiento y manera de realizar cada prueba experimental, además de interpretar los resultados a través del análisis estadístico correspondiente. De esta manera discutir y comparar resultados con otras investigaciones para darle mayor validez a este experimento. En la sección de factores estudiados se describen específicamente paso a paso el procedimiento para realizar cada prueba experimental.

6.4.2 Objetivo específico no. 2

Para establecer de acuerdo a las pruebas físicas y mecánicas realizadas si la madera de *P. maximinoi* de 12 años de edad, puede utilizarse como material estructural en la industria de la construcción, para cumplir con este objetivo se clasificó esta madera de esta especie, por lo tanto se comparó los resultados obtenidos del objetivo específico no.1 que es una madera de raleo con parámetros en tablas de investigaciones realizadas con respecto a clasificación de madera según sus propiedades físico-mecánicas, así también se compararon con los resultados de madera de corta final de la investigación realizada por Campos (2015) quien experimento con madera de esta especie de corta final y de segundo raleo.

6.4.3 Objetivo específico no. 3

Para realizar un análisis de beneficio-costos de la utilización de madera de *P. maximinoi* en el mercado de la construcción, se analizó desde el punto en donde se enfoca este

experimento. Es un segundo raleo a una plantación de pino por lo que se abarcó todos los factores que intervienen en esta práctica silvicultural.

Se analizaron factores de costos y beneficios convirtiéndolos en las mismas dimensionales para encontrar el cociente beneficio sobre costo y a partir de este se analizó el aspecto económico de extraer madera de un segundo raleo para convertir en material en la industria de la construcción.

6.5 MATERIAL EXPERIMENTAL

La especie utilizada es *P. maximinoi* la cual en el mercado forestal está comprendida entre las más producidas en Guatemala por lo cual su fácil acceso económico es primordial en este estudio.

Las propiedades de la madera cambian respecto a su especie, pero lo que es determinante para su uso como material de construcción son las propiedades físicas y mecánicas, por ejemplo la humedad una propiedad física que entre más cantidad de agua se encuentre en la madera esta será más flexible y entre más seca se encuentre la madera será más rígida. Y una propiedad afecta a la otra como en este caso la humedad a la dureza de la madera, por lo tanto son aspectos y muestras las que se van a tomar para el material experimental.

Se extrajeron 15 árboles al azar en la finca Santa Gabrielita Chisiram, los cuales eran parte del segundo raleo de la plantación, se cortó una troza de cada árbol de una longitud de 10 metros la cual se cortó de nuevo a cada 3 metros para aplicar la metodología propuesta por Lee et, al. (1994), en donde establece dividir las trozas en tres secciones de 3 metros cada una, las cuales son sección A (sección basal), B (sección media), C (sección apical).

Posteriormente a cada troza seccionada según la metodología se extrajeron las probetas para las pruebas físicas y mecánicas, siendo las segundas las que necesitaban más materia prima para su elaboración por el largo, específicamente para la prueba de flexión estática las cuales tenía 76 cm de largo.

Se optimizó al máximo la materia prima proporcionada para la elaboración de este experimento, no hubo la necesidad de ninguna otra extracción a la finca mencionada.

6.6 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.

6.6.1 Propiedades físicas

6.6.1.1 Densidad (g/cm³)

Según la norma ASTM D 2395-0, 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. Para determinar la propiedad física de la densidad se utilizaron piezas o probetas de 1x2x8 cm (1 cm de grosor, 2 cm de ancho y 8 cm de largo) esta medida según la ASTM D 2395-0. Cabe mencionar que por cada tratamiento de este experimento se tienen que ensayar 5 probetas, cada probeta es igual a una repetición. (Figura 2)



Figura 2. Probetas para determinar densidad de cada tratamiento del experimento. (Denotadas A=sección apical, M=sección media, B=sección basal).

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

1. El primer paso fue cubrir cada probeta con una delgada capa de parafina, esto para que las piezas no absorbieran agua al momento de sumergirlas para el cálculo de volumen. (Figura 3).



Figura 3. Parafina para cubrir las piezas o probetas. Se puede observar cómo se está calentando dicha sustancia. ,

2. Se determinó y se anotó el peso en gramos (g) de cada probeta en una balanza electrónica debidamente calibrada y balanceada en cero.
3. Una vez tomado el peso de las piezas se procede a determinar el volumen de las mismas y por ello su preparación a su vez con la parafina.
4. 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 en mililitros (ml) (nivel 1).
5. Se sumergió la muestra dentro de la probeta graduada, utilizando unas pinzas para mantener las piezas dentro del agua.

6. Se determinó el nivel en mililitros (ml) del agua alcanzado al sumergir la pieza (nivel 2).
7. La diferencia entre los dos niveles (1 y 2), es igual al volumen de la muestra y es dado por:

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

8. Luego de determinar el volumen, y ya anteriormente determinado el peso, se procede a encontrar la densidad con la siguiente formula:

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

Esta propiedad física, densidad (g/ml) se encuentra dividiendo el peso de cada pieza dentro del volumen de la misma. Los resultados se expresaron en (g/cm³), 1ml=1cm³.

Cabe resaltar que este proceso para la determinación de esta propiedad física, se determinó con piezas o probetas húmedas, y piezas secadas al horno las cuales fueron de otra propiedad física descrita posteriormente (contracción volumétrica), obteniendo más resultados para el análisis correspondiente.

6.6.1.2 Porcentaje de humedad (%)

Se adopta la metodología según la norma ASTM D-143 para la determinación del contenido de humedad (CH).

Las probetas utilizadas tenían las siguientes medidas 3x3x10 cm según norma mencionada anteriormente. (Figura 4).



Figura 4. Probetas para la determinación de porcentaje de humedad. .

El procedimiento seguido fue el indicado en la norma y se detalla a continuación:

1. Ya identificadas todas las piezas, se procedió a determinar el peso de cada una de las mismas en la balanza electrónica y anotando dicho dato en la boleta de campo. (Figura 5)

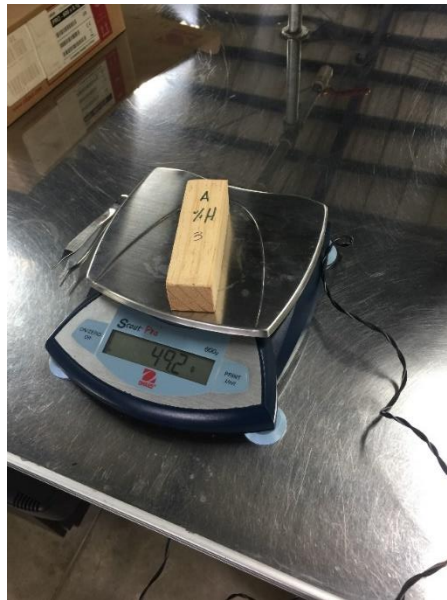


Figura 5. Determinación del peso (gramos) de cada una de las probetas del porcentaje de humedad. .

2. Posteriormente todas las piezas se introdujeron en el horno para su secado y la eliminación de partículas de agua en la misma. El horno alcanzó una temperatura de 103 grados centígrados, y este proceso duró 24 horas para poder seguir con el siguiente paso. (Figura 6). (Figura 7).

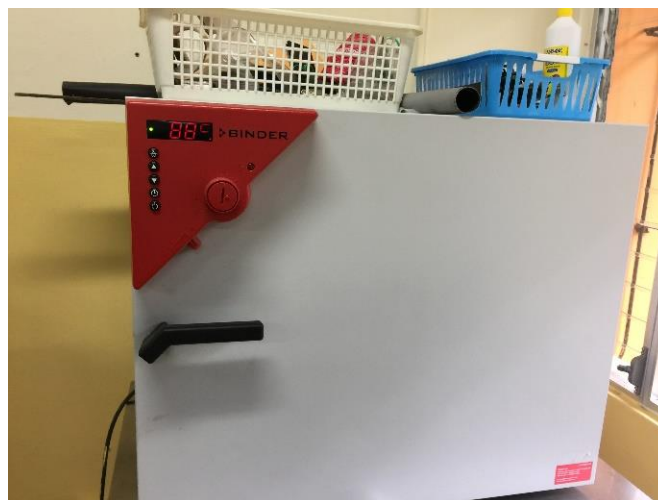


Figura 6. Horno en el cual se introdujeron las piezas o probetas. .

3. Luego de 24 horas de secado, se retiran las piezas del horno para luego tomar el peso de nuevo en la balanza electrónica. (Figura 7).



Figura 7. Probetas después de 24 horas de secado y listas para determinar su peso seco.

4. Con los dos pesos determinados anteriormente, se procedió a determinar el porcentaje de humedad en cada pieza de cada tratamiento de este experimento a través de la siguiente formula según norma ASTM D-143.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(\text{Peso húmedo}) - (\text{Peso seco})}{(\text{Peso Seco})} * 100$$

Estos resultados se expresan en porcentaje ya que la dimensional es eliminada en dicha ecuación por lo tanto se expresan en por ciento (%). Que es una variación del total inicial respecto al posterior encontrado, expresada esta variación en cuanto agua es retenida por esta especie de madera, y esta cantidad de agua tiene un peso que se refleja en el porcentaje de humedad.

6.6.1.3 Contracción volumétrica (%)

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.

Para la determinación se utilizaron probetas de 1x2x8 cm según ASTM-143-94, y el procedimiento que se hizo es el siguiente:

1. Al igual que las piezas de densidad, a cada una de estas piezas se les cubrió con una delgada capa de parafina, esto para que las probetas no absorban agua al momento de determinar el volumen.
2. Se llenó con agua una probeta graduada de 1000 mL, para facilitar la lectura del nivel del agua en la probeta, preferiblemente coincidiendo con una de las marcas en mililitros (ml) (nivel 1).
3. Se sumergió la pieza dentro de la probeta graduada, utilizando unas pinzas para mantener las piezas dentro del agua.
4. Se determinó el nivel en mililitros (ml) del agua alcanzado al sumergir la pieza (nivel 2). (Figura 8)



Figura 8. Pieza dentro de una probeta para determinar el nivel desplazado en mililitros. .

5. La diferencia entre los dos niveles (1 y 2), es igual al volumen de la muestra y es dado por:

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

6. Una vez determinado el volumen de cada pieza se introdujeron las piezas al horno, a 103 grados centígrados durante 24 horas.
7. Debido a la temperatura y a la expulsión de agua de las piezas, se debe repetir el paso 1, que es cubrir cada probeta con esto para que no absorba agua en la siguiente toma de volumen.

8. De nuevo se debe determinar el volumen de las piezas ya secas, por lo que se repiten del paso 2 al 5 respectivamente.

9. Ya con los datos de volumen húmedo y volumen seco se determina la contracción volumétrica a través de un porcentaje con la siguiente formula.

$$\text{Contracción Volumétrica} = \frac{(\text{Volumen Húmedo}) - (\text{Volumen Seco})}{(\text{Volumen Verde})} * 100$$

Se utilizaron datos en mililitros y se trasladaron a (cm³) centímetros cúbicos, que un 1ml = 1cm³, en las conversiones de unidades. Antes mencionado estas mismas piezas se utilizaron para determinar la densidad seca, ya descrita anteriormente.

6.6.2 Propiedades mecánicas

Para la realización de esta prueba se tomó como base la norma ASTM D-143 (94) que rige este tipo de experimentos y pruebas de laboratorio específicas para la resistencia de materiales como lo es la madera.

Cabe mencionar que para estas pruebas se utilizaron los laboratorios del campus central, en donde se tiene el equipo necesario, la maquina universal INSTROM calibrada para dar la velocidad correcta para la aplicación de estas fuerzas sobre las probetas con las medidas establecidas por la norma. (Figura 9).

Además para la validación de los resultados el equipo utilizado tiene que estar calibrado según norma, para que el error en este tipo de ensayos no repercuta posteriormente por

lo que la maquina universal tiene que tener la última calibración hace un año como máximo. (Figura 10).



Figura 9. Maquina Universal Instron para ensayos mecánicos. .

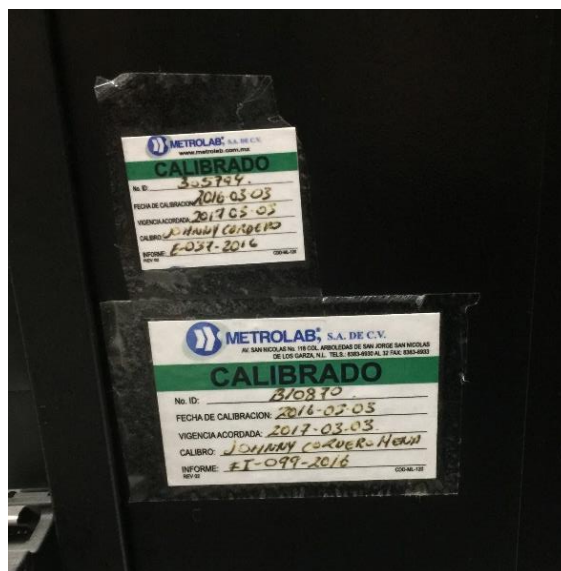


Figura 10. Fecha de la última calibración, no debe pasar un año sin el mantenimiento. (Fecha de ensayos 11 de enero de 2017). .

6.6.2.1 Flexión estática (kg/cm^2)

Según la norma ASTM D-143 (94) la muestra se colocó de manera que la carga se aplicará a través del bloque de apoyo a la superficie tangencial más cercana a la médula. La carga se aplicó al centro de cada una de las probetas, siendo la longitud libre entre los soportes de 70 cm. Las probetas son de 50x50x760 milímetros. Estas medidas según norma se dejaron 3 cm de cada lado de los soportes. (Figura 11).



Figura 11. Ensayo de flexión estática, 70 cm de luz entre apoyos y 3 cm del apoyo hacia el extremo..

En la figura 11 se puede observar una base metálica, la cual tuvo que fabricarse ya que en el laboratorio no se contaba con una base con las dimensiones que determina la norma. El procedimiento que se adoptó fue según norma ASTM D-143 (94), se colocó la probeta como se observa en la figura 11, se debe colocar la pieza centrada con el apoyo y respetando los 70 cm de luz entre apoyos. Se marcó el centro de esta luz en 35 cm en donde fue aplicada la fuerza o carga.

La carga aplicada por parte de la maquina universal Instron fue a una velocidad de 2.5 mm/min, ya que este equipo es avanzado se programa dicha velocidad. La misma maquina se ajusta al principio para aplicar la fuerza y esta para de aplicar la fuerza hasta que falle la probeta. (Figura 12).

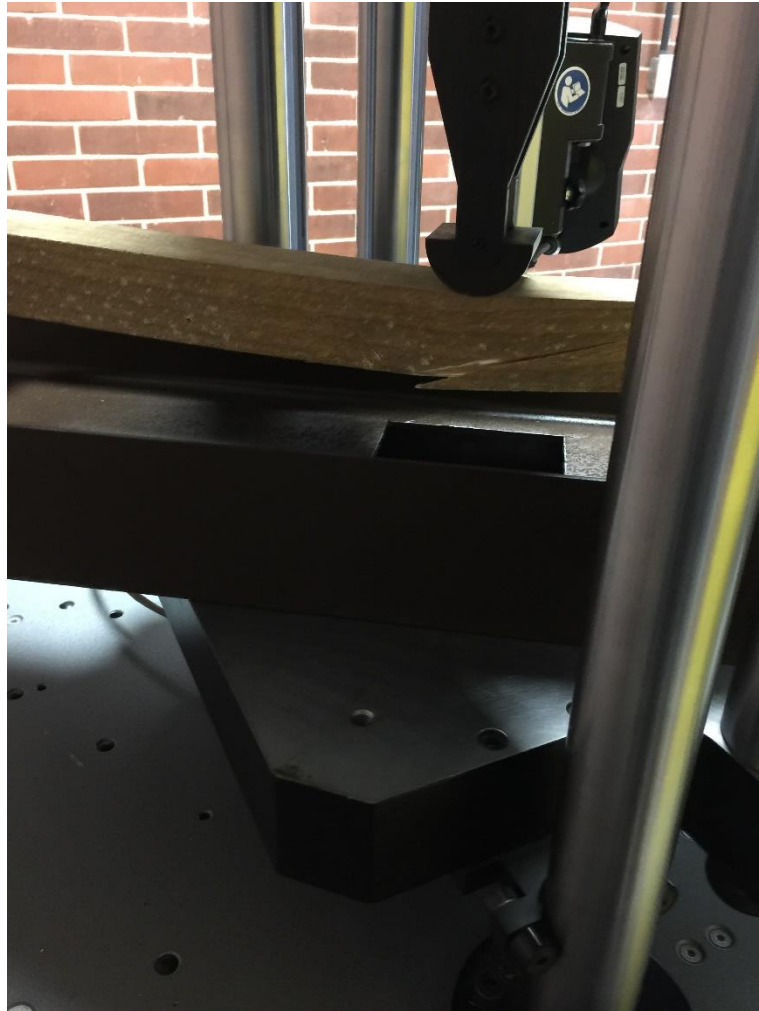


Figura 12. Falla de la probeta en ensayo a flexión estática. ¹²

Los tipos de fallas en estos ensayos se clasifican según la apariencia de la superficie fracturada y la manera como se da la falla. (Figura 13).

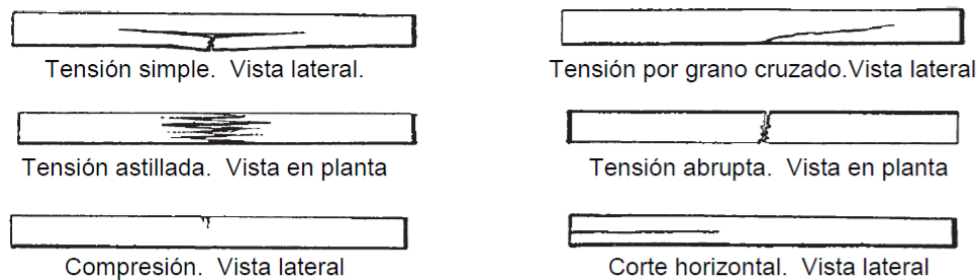


Figura 13. Tipos de falla ensayo de flexión estática. (ASTM D 143-94 00, 2000).

Durante todo el ensayo de flexión estática, la maquina universal genera datos que son la posición en pulgadas o deflexión que alcanza la probeta según vaya aumentando la carga aplicada el libras fuerzas, por el modelo de la maquina ya no hubo que anotar nada a mano, la misma genero los datos, resultados y la gráfica correspondiente. (Figura 14).

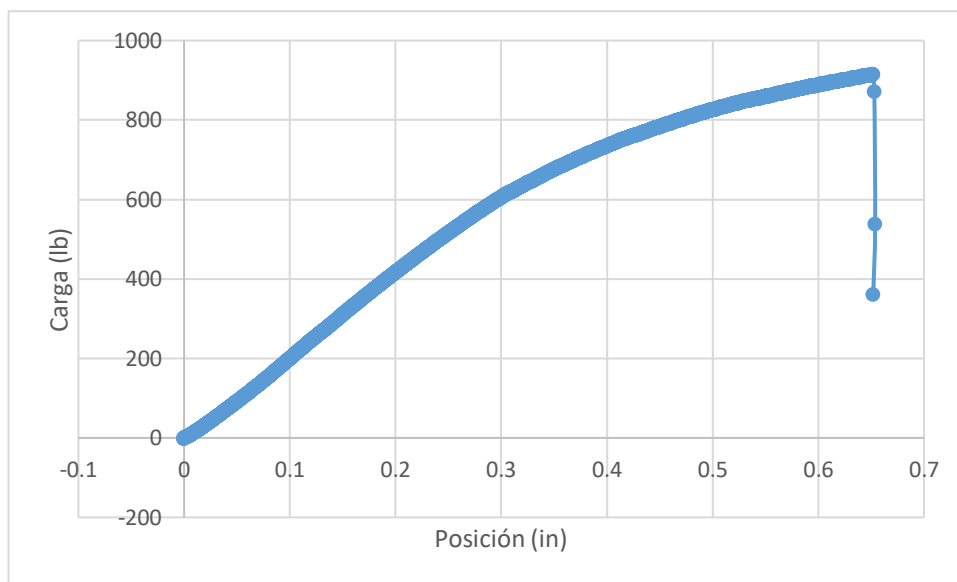


Figura 14. Grafica posición y carga aplicada generada por maquina universal Instron.

Los resultados en esta prueba se trasladaron al sistema internacional para poder usar las fórmulas que este ensayo es base para el módulo de ruptura y módulo de elasticidad que posteriormente se describirá. En este ensayo se utiliza la carga máxima aplicada antes de la ruptura y la sección de la probeta, esto para determinar el esfuerzo a flexión (kg/cm^2) que resiste esta especie de madera.

6.6.2.2 Compresión paralela a la fibra (kg/cm^2)

La prueba de compresión paralela a la fibra se utilizó muestras o piezas de 50 por 50 por 200 milímetros. Se colocaron de manera vertical en donde la fuerza o carga aplicada a estas probetas se aplicara de manera paralela a las fibras de la madera. (Figura 15).



Figura 15. Ensayo de compresión paralela a la fibra en la maquina universal. ¹⁵

La carga aplicada de manera constante fue a una velocidad de 0.03 mm/min. Como establece la norma ASTM D-143, a diferencia con la otra prueba de flexión estática, esta fue una prueba no destructiva es decir que no se llega a una falla visible. Por lo que se aplicó la carga constante hasta una posición o longitud que no excedió los 150 mm o 6 pulgadas.

En el ensayo se tiene que observar la gráfica carga aplicada contra posición generada por la maquina universal Instron y ubicar cuando la misma deja ser directamente proporcional o deja de ser continua, aquí es donde el límite de proporcionalidad es pasado y comienza una curva en donde finaliza el ensayo y en donde esto es menor a los 150 mm o 6 pulgadas como antes se mencionó, debido a que a partir de este punto la carga no aumenta considerablemente, se mantiene constante a lo largo de la posición o desplazamiento. (Figura 16).

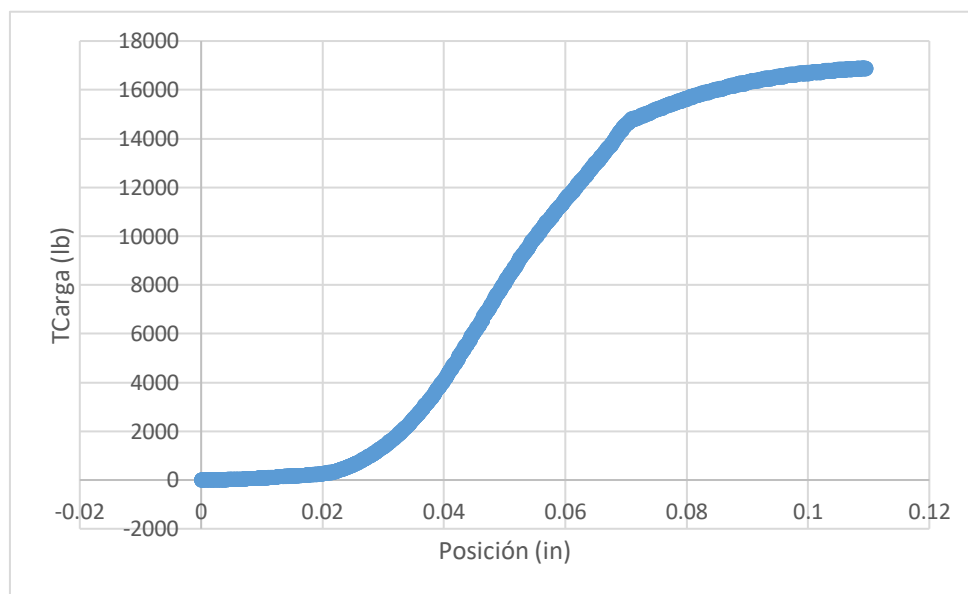


Figura 16. Gráfica posición-carga generada en el ensayo de compresión paralela a fibra. ¹⁶

Por el modelo de la maquina universal no hubo necesidad de ningún tipo deformómetro u otro aparato para estimar o graficar dichos resultados que se ven la figura 16. Antes dicho es no fue una prueba destructiva no hay una falla visible pero hay una clasificación según la norma, estas fallas pueden verse o no estar superficialmente a la vista. (Figura 17).

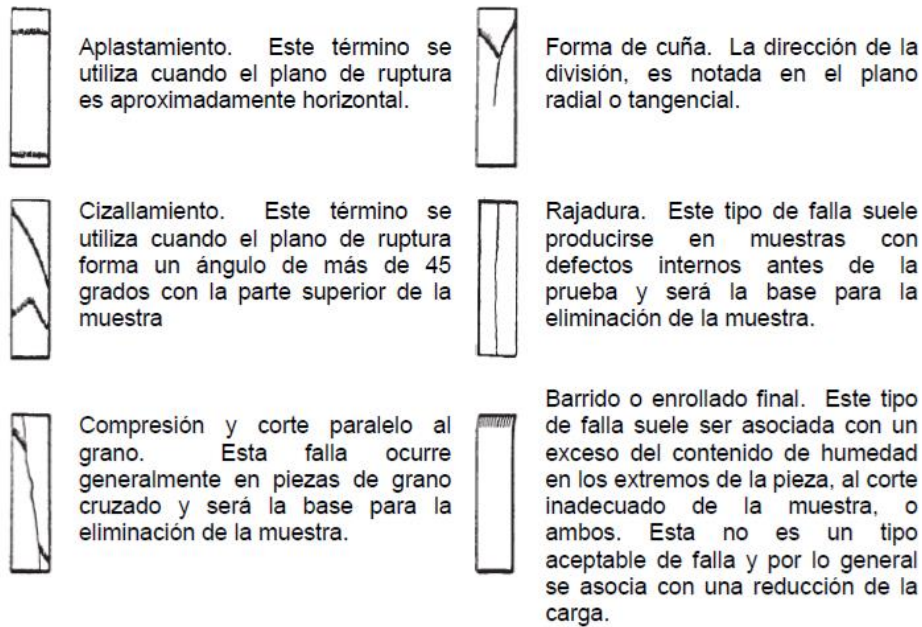


Figura 17. Tipos de falla ensayo de compresión paralela a la fibra. (ASTM D 143-94 00, 2000).

Para calcular el esfuerzo a compresión paralela, se tomó la carga máxima y se dividió dentro de la sección transversal en la cual se estaba actuando dicha fuerza que fue de 25 cm² (5cm x 5cm), de esta manera se encontró el esfuerzo a compresión para cada una de las piezas de cada uno de los tratamientos.

6.6.2.3 Compresión perpendicular a la fibra (kg/cm²)

La prueba de compresión perpendicular a la fibra se utilizó muestras o piezas de 50 por 50 por 150 milímetros. Se colocaron de manera horizontal en donde la fuerza o carga aplicada a estas probetas se aplicara de manera perpendicular a las fibras de la madera. (Figura 18).



Figura 18. Ensayo de compresión perpendicular a la fibra en la maquina universal. 18

Los parámetros en este ensayo son los mismos que en el anterior de compresión paralela, la carga fue aplicada de manera constante fue a una velocidad de 0.03 mm/min, hasta encontrar el límite de proporcionalidad y en donde la fuerza se vuelve constante a lo largo de la posición.

A diferencia con el anterior ensayo, la colocación de las piezas es diferente, se coloca de manera que las fibras quedan perpendicular a la fuerza formando un ángulo de 90 grados. En la gráfica de posición contra carga aplicada se puede observar una disminución en la fuerza (libras) en comparación a compresión paralela. (Figura 19).

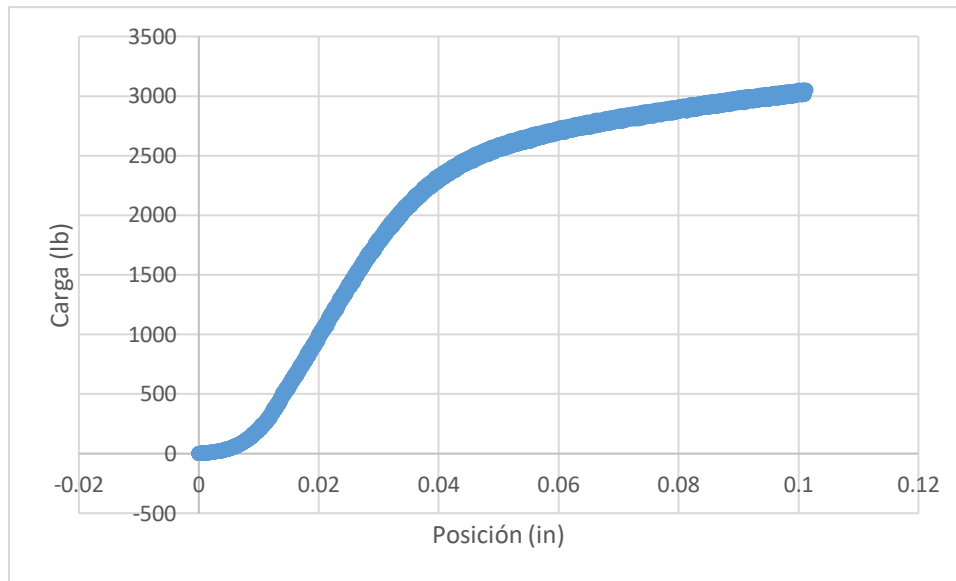


Figura 19. Gráfica posición-carga generada en el ensayo de compresión perpendicular a la fibra. ¹⁹

Se determinaron los esfuerzos a compresión perpendicular en donde se tomó la fuerza o carga máxima aplicada en libras, la cual se trasladó a kilogramos por cuestiones de fórmulas, y al dividir esta carga máxima dentro del área o sección de aplicación que es 25 cm², se encuentra el esfuerzo correspondiente a cada pieza de cada tratamiento de este experimento.

6.6.2.4 Módulo de ruptura a partir del ensayo a flexión (en kg/cm²)

Para determinar este módulo se tomó como base el ensayo a flexión el cual nos da los resultados necesarios para utilizar la siguiente formula descrita a continuación:

$$MR = \frac{3P a}{bh^2}$$

Siendo:

MR = módulo de ruptura en kg/cm²

P = Carga máxima en kg.

a = distancia desde el apoyo al punto de carga o reacción en cm.

b = ancho de la viga en cm

h = profundidad o peralte de la viga en cm

Del ensayo de flexión solo tomamos la carga máxima (P) en kilogramos, la maquina universal Instron trabaja en libras fuerza, y en donde se hizo la conversión correspondiente.

Los demás datos en esta fórmula, ya se tienen como lo son: (a) que es la distancia de la carga a uno de los apoyos, en este caso la norma pedía 70 cm de luz, por lo que (a) es la mitad 35 cm. El ancho de la vida y el peralta fue de 5 cm en cada una de las piezas de flexión estática.

6.6.2.5 Módulo de elasticidad a partir del ensayo a flexión (kg/cm²)

Para la determinación de este módulo se necesitó también de base el ensayo a flexión para utilizar la siguiente formula.

El módulo de elasticidad se define como:

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

Siendo:

ME = módulo de elasticidad en kg/cm²

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´

Del ensayo a flexión se utilizó la carga máxima antes de la ruptura o falla de las piezas (P) en kilogramos y la deflexión o longitud trasladada por parte de la carga aplicada. Los demás datos son constantes como luz de la viga (70 cm), el ancho y peralte (5 cm) y la distancia del apoyo a la reacción (a=35 cm).

6.7 DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS

Los tratamientos fueron representados por una pieza o probeta, conformados por 30 probetas por cada tratamiento, distribuidas en 5 repeticiones para un total de 90 probetas ensayadas o evaluadas.

Cuadro 1. Descripción de los Tratamientos. .

Propiedad evaluada	Tratamiento	No. probetas
Densidad	Sección basal	5
	Sección media	5
	Sección apical	5
% Humedad	Sección basal	5
	Sección media	5
	Sección apical	5
Contracción volumétrica	Sección basal	5
	Sección media	5
	Sección apical	5

Flexión estática	Sección basal	5
	Sección media	5
	Sección apical	5
Compresión paralela	Sección basal	5
	Sección media	5
	Sección apical	5
Compresión perpendicular	Sección basal	5
	Sección media	5
	Sección apical	5

Para la realización de las pruebas físicas y mecánicas de la especie de *P. maximinoi*, se extrajeron piezas o probetas según la metodología a utilizar expuesta por Lee et, al. (1994), en donde establece dividir las trozas en tres secciones de 3 metros cada una, las cuales son sección A (sección basal), B (sección media), C (sección apical). (Figura 20.)

Debido a abundancia de esta especie radica la importancia por lo tanto una de las prácticas como lo son raleos, no están siendo realizadas por el costo. En un segundo raleo como esta plantación de 12 años de edad, para reducir la densidad y darle un uso a la madera extraída se adoptó esta metodología la cual no tuvo problemas ya que la altura promedio de la plantación era de 16 metros, y la metodología necesita por lo menos 12 metros de altura para ser aplicada. (Figura 20).

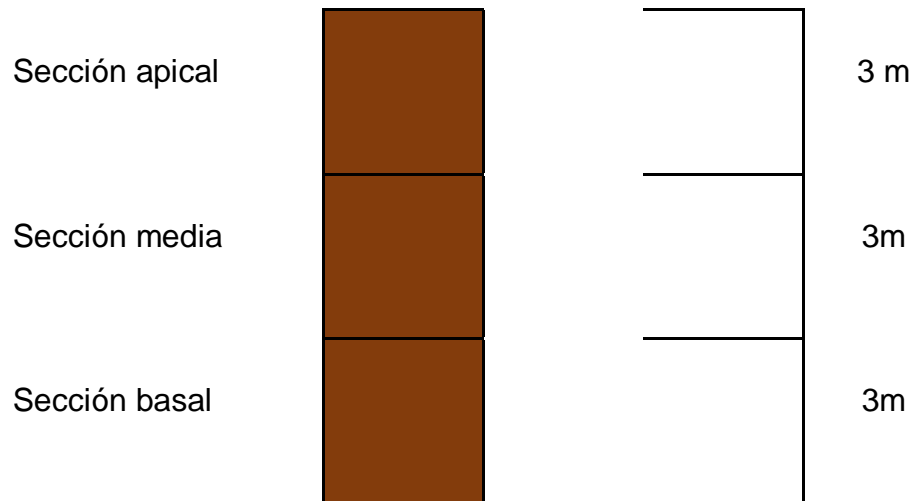


Figura 20. Secciones del fuste de un árbol experimentadas las propiedades físicas y mecánicas de *Pinus maximonoi* H.E. Moore. ²⁰

Se determinaron estos tratamientos para comparar los resultados de las trozas a extraer y diferenciar que sección se obtiene mayor beneficio en base a las variables de respuesta. Se marcaron las trozas seleccionadas de cada árbol sobre sus secciones transversales, y de ellas se aserraron para que posteriormente se utilizaron en la elaboración de las probetas con las dimensiones según el tipo de ensayo, luego se almacenaron para su protección del sol, la lluvia y la humedad.

Las dimensiones de probetas y normas a utilizar para los ensayos de propiedades físicas y mecánicas se describen a continuación en el cuadro 2.

Cuadro 2. Dimensiones de Probetas y normas utilizadas para ensayos de Propiedades Físicas y Mecánicas. ²

	Propiedad	Dimensión de probeta (cm)	Repeticiones	Norma
Física	Densidad	1x2x8	5	ASTM D 2395-0
Física	% Humedad	3x3x10	5	ASTM-143- 94
Física	Contracción volumétrica	1x2x8	5	ASTM-143- 94
Mecánica	Flexión estática	5x5x76	5	ASTM-143- 94
Mecánica	Compresión paralela a la fibra	5x5x20	5	ASTM-143- 94
Mecánica	Compresión perpendicular a la fibra	5x5x15	5	ASTM-143- 94

6.8 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental utiliza fue bloques completos al azar (DBA) con 3 tratamientos y 5 repeticiones, para un total de 15 unidades experimentales. Se utilizó este diseño tomando en cuenta factores ambientales y la homogeneidad de la plantación y bloqueando la gradiente de pendiente del terreno de manera perpendicular, como sugiere este diseño experimental. Cumpliendo con los tres principios de repetición, aleatorización y control local, se obtuvieron datos y así proceder a la evaluación de estos.

6.9 MÓDELO ESTADÍSTICO

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1, 2, 3, \dots, t \\ j = 1, 2, 3, \dots, r \end{array} \right.$$

En donde:

Y_{ij} = variable de respuesta observada o medida en el i-ésimo tratamiento y el j-ésimo bloque.

μ = media general de la variable de respuesta (Propiedades físico mecánicas).

τ_i = efecto del i-ésimo tratamiento.

β_j = efecto del j-ésimo bloque.

ϵ_{ij} = error asociado a la ij-ésima unidad experimental.

6.10 UNIDAD EXPERIMENTAL

La unidad experimental cuenta con 15 probetas ensayadas por cada tratamiento o sección del árbol (basal, medio y apical). Esto para propiedad evaluada sea física o mecánica.

6.11 CROQUIS DE CAMPO

La figura 21 presenta la estructura de las unidades experimentales y la distribución de los 3 tratamientos (T), cada tratamiento se asignó de forma aleatoria en los 5 bloques (B) que representan cada repetición.


→	Bloques perpendiculares a la gradiente de variabilidad			Pendiente	
B1	T1	T3	T2	D i r e c c i ó n 	
B2	T2	T1	T3		
B3	T3	T2	T1		
B4	T1		T3		T2
B5	T2		T1		T3

Figura 21. Croquis de campo de las 15 unidades experimentales (total de tratamientos) que conforman el ensayo. ²¹

6.12 MANEJO DEL EXPERIMENTO

Durante el experimento se identificaron árboles y se procesó la madera de la especie *P. maximinoi*, para luego elaborar probetas o piezas de la misma, las cuales se utilizan en ensayos de las propiedades físicas y mecánicas.

6.12.1 Selección y corte de materia prima

De los árboles escogidos se seleccionan trozas a intervalos establecidos, de tal forma que proporcionen información de la variación de sus propiedades respecto a su altura. Luego se procede al marcado y aserrado y posteriormente a su corte y almacenaje de la materia prima.

6.12.2 Elaboración de probetas y almacenaje

Se marcaron las trozas seleccionadas de cada árbol sobre sus secciones transversales (sección basal, sección media y sección apical). Que posteriormente se aserraron y se utilizaron en la elaboración de las probetas con las dimensiones según el tipo de ensayo, luego se almacenan para su protección del sol, la lluvia y la humedad.

6.12.3 Realización de pruebas físicas

Para la realización de las pruebas físicas se utilizó el laboratorio del campus San Pedro Claver, S. J. De La Verapaz, de la Universidad Rafael Landívar en el cual se ensayaron las probetas de las propiedades densidad, porcentaje de humedad y contracción volumétrica. Con la ayuda de la ingeniera en turno y de aparatos como el horno, balanza y probetas graduadas.

6.12.4 Realización de pruebas mecánicas

Se realizaron las pruebas mecánicas en el laboratorio del campus central de la Universidad Rafael Landívar en el cual tienen el personal y equipo necesario, así como la atención al estudiante. En el laboratorio se desarrollaron los ensayos de flexión, compresión paralela y perpendicular a la fibra.

6.13 VARIABLES RESPUESTA

Las variables utilizadas para determinar la aplicación y beneficio económico de la especie *P. maximinoi* como material de construcción. Se aplicó la metodología según la norma D-143 (94) en las pruebas mecánicas.

6.13.1 Densidad húmeda y seca (g/cm³)

Esta propiedad se obtuvo a través de la determinación de su peso en una balanza electrónica y su volumen en la probeta graduada, posteriormente se utilizó la siguiente fórmula para determinar la densidad en (g/cm³).

$$Densidad = \frac{Peso}{Volumen}$$

6.13.2 Porcentaje de humedad (%)

Se determinó el peso húmedo en la balanza electrónica, después de esto se colocaron las piezas en el horno durante 24 horas, para luego pesarlas de nuevo y encontrar el peso seco. Y utilizar la siguiente fórmula. (%).

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(Peso \text{ húmedo}) - (Peso \text{ seco})}{(Peso \text{ Seco})} * 100$$

6.13.3 Contracción volumétrica (%)

Antes de determinar el volumen, se recubrieron de parafina con una delgada capa, esto para que no absorban agua las piezas. Para la determinación se utilizó una probeta graduada para determinar el volumen húmedo, posteriormente se introdujeron las probetas al horno durante 24 horas para extraer toda el agua (humedad) de ellas.

Al salir del horno, por la temperatura se desprende la parafina, por lo que se agregó otra delgada capa de la misma para poder determinar el volumen seco nuevamente en una probeta graduada. Por último se determinó la contracción volumétrica con la siguiente fórmula.

$$\text{Contracción Volumétrica} = \frac{(\text{Volumen Húmedo}) - (\text{Volumen Seco})}{(\text{Volumen Verde})} * 100$$

6.13.4 Flexión estática (kg/cm²)

Según la norma ASTM D-143 (94) la carga es aplicada al centro de cada una de las probetas, siendo la longitud libre entre los soportes de 70 cm. Las probetas serán de 50x50x760 milímetros.

6.13.4.1 Compresión paralela y perpendicular a la fibra (kg/cm²)

La prueba de compresión paralela a la fibra utiliza muestras de 50 por 50 por 200 milímetros y para la prueba de compresión perpendicular a la fibra utiliza muestras de 50 por 50 por 150 milímetros.

6.13.4.2 Módulo de ruptura a partir del ensayo a flexión (kg/cm²)

$$MR = \frac{3P a}{bh^2}$$

Siendo:

MR = módulo de ruptura en kg/cm²

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

6.13.4.3 Módulo de elasticidad a partir del ensayo a flexión (en kg/cm²)

El módulo de elasticidad se define como:

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

Siendo:

ME = módulo de elasticidad en kg/cm²

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'

6.14 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Una vez realizadas las pruebas a las probetas se generó una base de datos, gráficos en excel 2010 Microsoft Office®, y se ordenaron los datos con las repeticiones y tratamientos de cada propiedad evaluada en este experimento, para poder exportarlo al análisis estadístico.

6.15 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se procedió a evaluar las variables (propiedades físico mecánicas) con los datos obtenidos de cada variable se realizó el análisis de varianza completamente al azar con un nivel de significancia del 95%, utilizando un análisis post-andeva Tukey, utilizando el software INFOSTAT®. Una vez obtenidos los resultados se aplicó la regla de decisión: Si el valor de $F \geq F$ crítica se rechaza la hipótesis nula (H_0).

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados muestran un error experimental de 8 grados de libertad, el cual según la literatura tiene ser como mínimo 12 pero el de este experimento cual está sustentado en pruebas de homogeneidad de varianzas y gráficas de predichos contra residuos y de cuantiles. (Anexo 4). En base a las pruebas estadísticas, los supuestos a evaluar son, hipótesis nula, todos los tratamientos no muestran diferencias significativas estadísticamente y la hipótesis alterna, que al menos uno de los tratamientos muestra diferencias significativas.

7.1 PROPIEDADES FÍSICAS EVALUADAS

7.1.1 Densidad

La densidad de la madera se obtiene como la relación entre la masa o peso entre el volumen de la misma. Es importante su determinación debido a que se puede clasificar la madera en ligera, semipesada y pesada. Además determinar esta propiedad física de madera de raleo de la especie *Pinus maximinoi* H. E. Moore de 12 años de edad.

7.1.1.1 Densidad Húmeda

En la propiedad física densidad, se evaluaron dos diferentes en las cuales el contenido de agua es la diferencia entre los dos tipos. Para determinar los niveles de significancia entre los tratamientos del experimento para la variable densidad húmeda, se realizó un análisis de varianza como se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3. Análisis de varianza para la variable densidad húmeda. (F crítico = 4.46) .

F.V.	GL	SC	CM	F	p-valor
Tratamiento	2	0.06	0.03	42.84	0.0001
Árbol	4	3.8 E-3	9.5 E-4		
Error	8	0.01	6.5 E-4		
Total	14	0.06			

Coeficiente de variación: CV (%) = 3.99.

Luego de aplicar un análisis de ANDEVA con un nivel de significancia del $p=0.05\%$, se encontraron diferencias significativas en los materiales evaluados, además obteniendo un coeficiente de variación calculado para el error experimental de 3.99% .

Al encontrar diferencias estadísticamente significativas para la variable densidad húmeda, se procede a realizar una prueba de comparación múltiple de medias como se observa en el cuadro 4.

Cuadro 4. Densidad húmeda resultados comparación múltiple de medias según criterio Tukey. .

Tratamiento	Medias (g/cm³)	Grupo Tukey
Sección basal	0.68	A
Sección media	0.68	A
Sección apical	0.55	B

En el cuadro 4, el análisis post ANDEVA de Tukey refleja dos grupos, en el cual la sección basal y media tienen una mayor densidad que la parte o sección apical del árbol. Estas dos primeras secciones del árbol presentan la misma media.

Al comparar estos resultados con los de Campos (2015) en donde obtuvo una densidad promedio de madera en *P. maximinoi* de 0.68 g/cm^3 , el mismo dato el cual se obtuvo en esta investigación.

La sección basal y media son los mejores tratamientos en base a esta variable respuesta, densidad húmeda. Comparando estos resultados con los que obtuvo Valero, Reyes y Contreras (2005) que utilizaron la misma metodología que este experimento concluyeron que la sección basal del bambú fue el mejor tratamiento con un valor de densidad húmeda de 0.84 g/cm^3 . La madera de bambú es conocida por su fortaleza y cantidad de fibras

que la componen al compararla con el pino que obtuvo 0.68 g/cm³., esto es punto de partida para otra investigación de esta especie de bambú en la región.

7.1.1.2 Densidad seca

Al igual que la propiedad densidad húmeda, se hizo un análisis de varianza de datos para la densidad seca.

Cuadro 5. Análisis de varianza para la variable densidad seca. (F crítico = 4.46).

F.V.	GL	SC	CM	F	p-valor
Tratamiento	2	0.04	0.02	33.17	0.0001
Árbol	4	4.2 E-2	1.1 E-4		
Error	8	0.01	6.5 E-4		
Total	14	0.05			

Coefficiente de variación: CV (%) = 4.34.

Los resultados muestran un 4.34 % de variación por lo que los tratamientos tienen un comportamiento homogéneo estadísticamente. El ANDEVA muestra que hay diferencias significativas entre los tratamientos con un nivel de significancia del p=0.05%, esto se concluye a partir del criterio de F, se puede observar que la F experimental es mayor a la F crítico o de tabla por lo que se procede a realizar un análisis post ANDEVA para determinar las diferencias significativas. (Cuadro 6).

Cuadro 6. Densidad seca resultados comparación múltiple de medias según criterio Tukey. .

Tratamiento	Media (g/cm ³)	Grupo Tukey
Sección basal	0.63	A
Sección media	0.62	A
Sección apical	0.51	B

El análisis post ANDEVA muestra dos clasificaciones o grupos en la misma tendencia que el cuadro 4, densidad húmeda, la sección basal y media tiene una media mayor, por lo tanto un mayor peso dentro de su volumen, que la sección apical refleja una menor densidad, esto se puede ver de mejor manera en la figura 22.

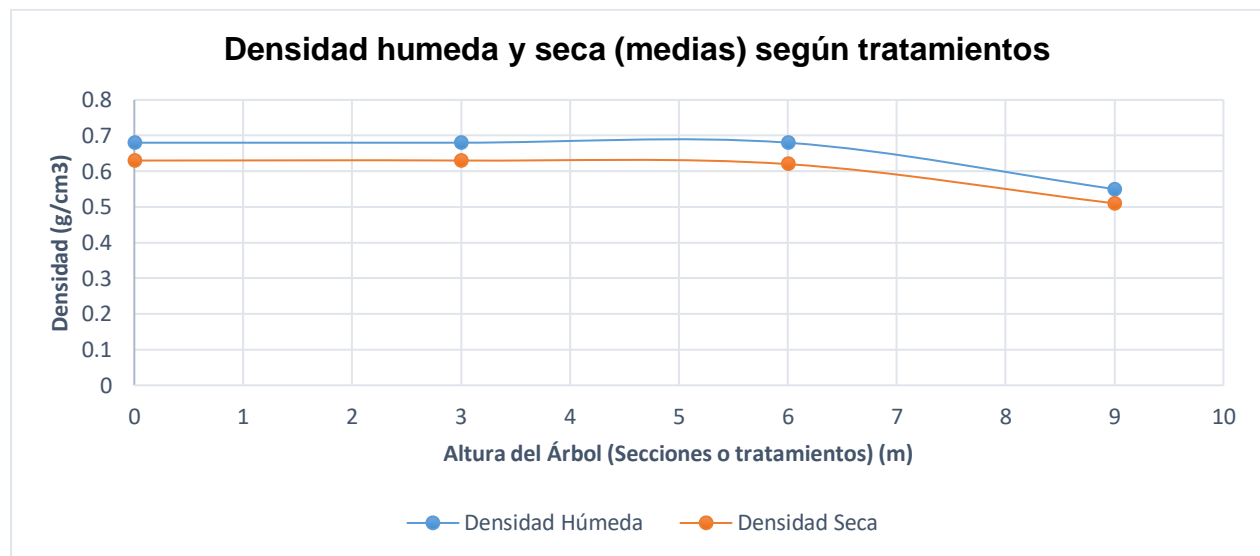


Figura 22. Densidad (medias) según tratamientos de propiedades físicas de *Pinus maximonoi* H.E. Moore. ²²

Los resultados muestran dos grupos Tukey, los cuales indican que en la sección del fuste en sus primeros 6 metros empezando desde el suelo, la madera a extraer tiene mayor densidad, es decir tiene una masa o peso mayor por unidad de volumen.

Entre la densidad húmeda y la seca los resultados muestran una disminución de densidad debido a la cantidad de agua que fue eliminada a través del horno y esta cantidad de agua tiene un peso el cual interviene en la relación masa/volumen por lo cual al eliminar el agua se tiene una densidad seca.

Campos (2015) obtuvo un promedio de densidad seca al aire de 0.50 g/cm^3 en madera de segundo raleo de *P.maximinoi*, y en esta investigación en la sección apical se determinó una densidad de 0.51 g/cm^3 . Además Campos como valor máximo obtuvo una densidad de 0.59 g/cm^3 , comparado con el valor máximo en sección basal de este experimento de 0.63 g/cm^3 .

De la misma forma que en la variable densidad húmeda, en base a la densidad seca los mejores tratamientos son la sección basal y media, ya que mostraron diferencias significativas y según Valero, Reyes y Contreras (2005) en densidad seca al horno de la especie bambú muestra la sección basal y media como mejores tratamientos con un valor de 0.65 g/cm^3 y en este experimento se obtuvo 0.63 g/cm^3 .

7.1.2 Humedad

Es una propiedad la cual determina la cantidad de agua retenida en un volumen específico se determina a partir de los pesos, el peso húmedo y el peso seco. En los resultados se presenta como un porcentaje el cual indica una relación entre la cantidad de agua que representa un peso con el peso total de la probeta.

Para determinar los niveles de significancia entre tratamientos del experimento se realizó un análisis de varianza como se muestra en el cuadro 6, para la variable humedad (%) en cada tratamiento.

Cuadro 7. Análisis de varianza para la variable humedad. (F crítico = 4.46).

F.V.	GL	SC	CM	F	p-valor
Tratamiento	2	10.38	5.19	109.84	<0.0001
Árbol	4	0.23	0.06		
Error	8	0.38	0.05		
Total	14	10.98			

Coeficiente de variación: CV (%) = 1.18.

Luego de aplicar el ANDEVA con un nivel de significancia del $p=0.05\%$, la F experimental o calculada es mayor a la F de tabla, por lo tanto se encontraron diferencias significativas estadísticamente, en la variable humedad. El coeficiente de variación calculado fue de 1.18 % lo que indica que los resultados de los tratamientos se comportaron homogéneos entre sí.

Para determinar el mejor tratamiento en cuanto a la variable humedad se utilizó la prueba de medias Tukey como se muestra en el cuadro 8.

Cuadro 8. Humedad resultados comparación múltiple de medias según criterio Tukey.

Tratamiento	Media (%)	Grupo Tukey
Sección basal	19.48	A
Sección media	18.50	B
Sección apical	17.45	C

La humedad muestra tres grupos de clasificación de Tukey que indica que la sección basal es la que tiene mayor humedad, la sección en el segundo grupo y la sección apical en el tercero. Por lo que la parte del fuste que tiene más contacto con el suelo y correspondientemente con el agua es la sección basal la cual es los primeros 3 metros de altura del árbol.

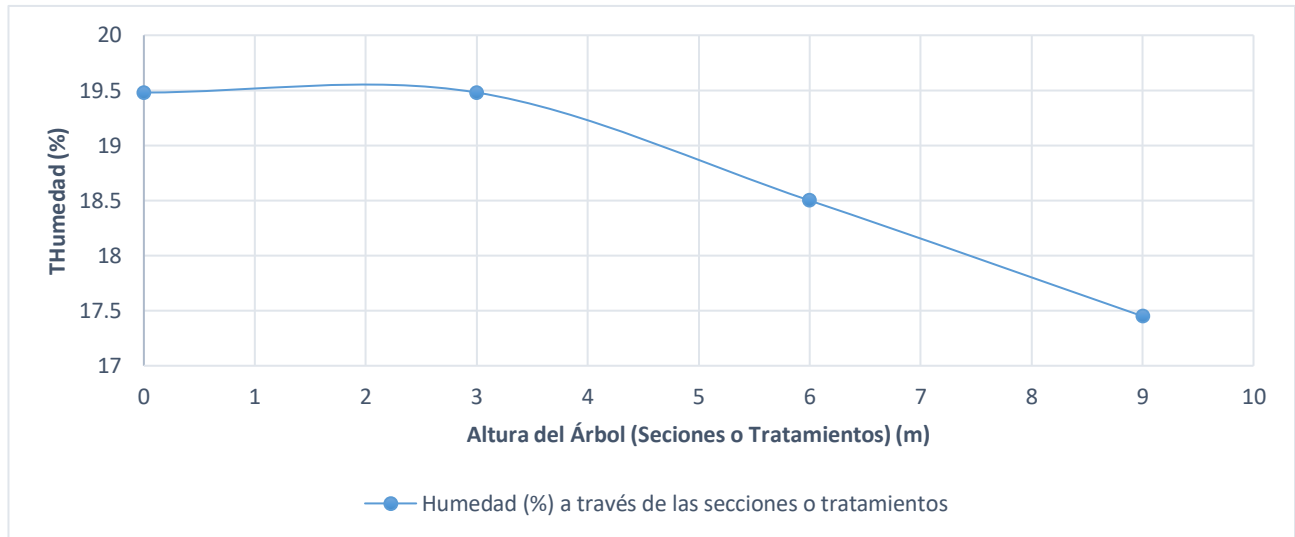


Figura 23. Humedad (medias) según tratamientos de propiedades físicas de *Pinus maximonoi* H.E. Moore. ²³

En la figura 23, se puede observar la caída del porcentaje de humedad según se va avanzando en la sección del árbol.

La sección basal muestra diferencias significativas estadísticamente, en esta variable el mejor tratamiento no es el que tenga el mayor dato en el análisis post ANDEVA, sino la que tenga el menor porcentaje de humedad, y en este caso es la sección apical la cual obtuvo un 17.45%. De la misma forma Fonseca (2006) obtuvo que la sección apical tiene menor porcentaje de humedad en pino candelillo con un valor entre 10 y 11%.

7.1.3 Contracción volumétrica

Esta propiedad mide en porcentaje la relación entre volumen húmedo y volumen seco, la cual indica cuanto se contrae la madera al momento de extraer el agua de la misma. El volumen cambia y aquí es donde se presenta la contracción volumétrica en función de la humedad presente en la madera.

Como se muestra en el cuadro 9, fue necesario realizar un análisis de varianza para determinar los niveles de significancia entre los tratamientos del experimento realizado para la variable contracción volumétrica.

Cuadro 9. Análisis de varianza para la variable contracción volumétrica (F crítico = 4.46)..

F.V.	GL	SC	CM	F	p-valor
Tratamiento	2	1.94	0.97	1.60	0.2600
Árbol	4	3.89	0.97		
Error	8	4.85	0.61		
Total	14	10.68			

Coeficiente de variación: CV (%) = 11.66.

Se aplicó el análisis ANDEVA con un nivel de significancia del $p=0.05\%$, la prueba de F dio como resultado que la F experimental o calculada es menor a la F de tabla, por lo tanto no se procede a realizar otro análisis. El coeficiente de variación calculado fue de 11.66 % lo que indica que los tratamientos se comportaron heterogéneos entre sí.

No es necesario hacer el post ANDEVA ya que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Los resultados indican que en la parte basal hay una mayor contracción debido a que en esta parte hay una mayor humedad visto en resultados anteriores.

Esta propiedad depende de la cantidad de agua para poder cambiar el volumen significativamente, en los resultados hay solo un grupo o todos son iguales estadísticamente, no hay diferencias significativas entre los tratamientos.

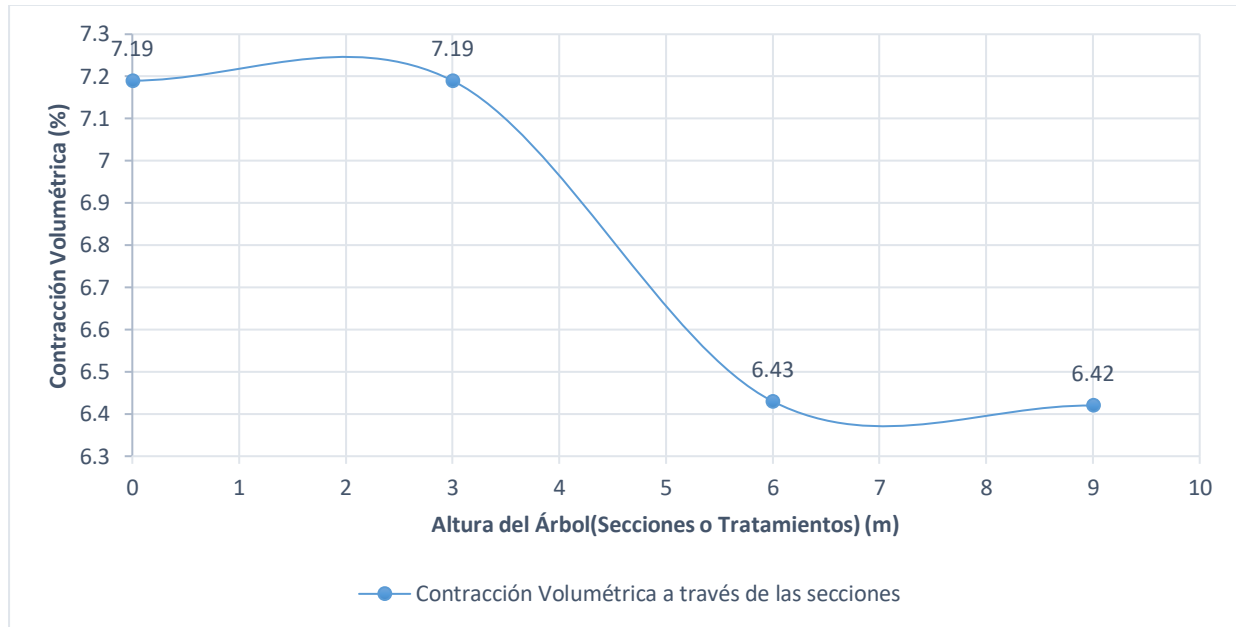


Figura 24. Contracción volumétrica (medias) según tratamientos de propiedades físicas de *Pinus maximinoi* H.E. Moore. ²⁴

En la figura 24, se observa una caída o una pendiente negativa a desde la sección basal hacia la apical, pero esta diferencia no es significativa como se describía anteriormente. Campos (2015) en esta variable no obtuvo de igual forma diferencias significativas con una contracción volumétrica promedio de 8% en madera de raleo.

7.2 PROPIEDADES MECÁNICAS EVALUADAS

7.2.1 Compresión perpendicular a la fibra

En esta propiedad particular de la madera, se tuvo que observar la dirección de las fibras las cuales estuvieron perpendiculares a la fuerza aplicada, además se obtuvo un esfuerzo el cual se obtiene de esa fuerza dividida una sección de área en donde fue aplicada dicha fuerza.

Por lo tanto para determinar los niveles de significancia entre los tratamientos del experimento para la variable compresión perpendicular, se realizó un análisis de varianza como se muestra en el cuadro 10.

Cuadro 10. Análisis de varianza para la variable compresión perpendicular. (F crítico = 4.46).¹⁰

F.V.	GL	SC	CM	F	p-valor
Tratamientos	2	2798.49	1399.24	39.31	0.0001
Árbol	4	205.89	51.47		
Error	8	284.75	35.59		
Total	14	3289.13			

Coeficiente de variación: CV (%) = 7.03.

Los resultados muestran un coeficiente 7.03% de variación por lo que los tratamientos tienen un comportamiento homogéneo estadísticamente. El ANDEVA muestra que hay diferencias significativas entre los tratamientos con un nivel de significancia del $p=0.05\%$, esto se concluye a partir del criterio de F, se puede observar que la F experimental es mayor a la F crítico o de tabla por lo que se procede a realizar un análisis post ANDEVA para determinar que tratamiento es mejor en la variable de compresión perpendicular a la fibra. (Cuadro 11).

Cuadro 11. Compresión Perpendicular a la Fibra Resultados Comparación Múltiple de Medias según criterio Tukey. „

Tratamiento	Media (kg/cm ²)	Grupo Tukey
Sección basal	98.13	A
Sección media	90.27	A
Sección apical	66.04	B

El esfuerzo va cambiando dependiendo la sección del árbol, los resultados muestran dos grupos de Tukey los cuales indican una mayor resistencia a la fuerza aplicada en una sección de área en los tratamientos Basal y Media, estos están en el grupo A, y con diferencias significativas con respecto a la sección Apical que se encuentra en el grupo B.

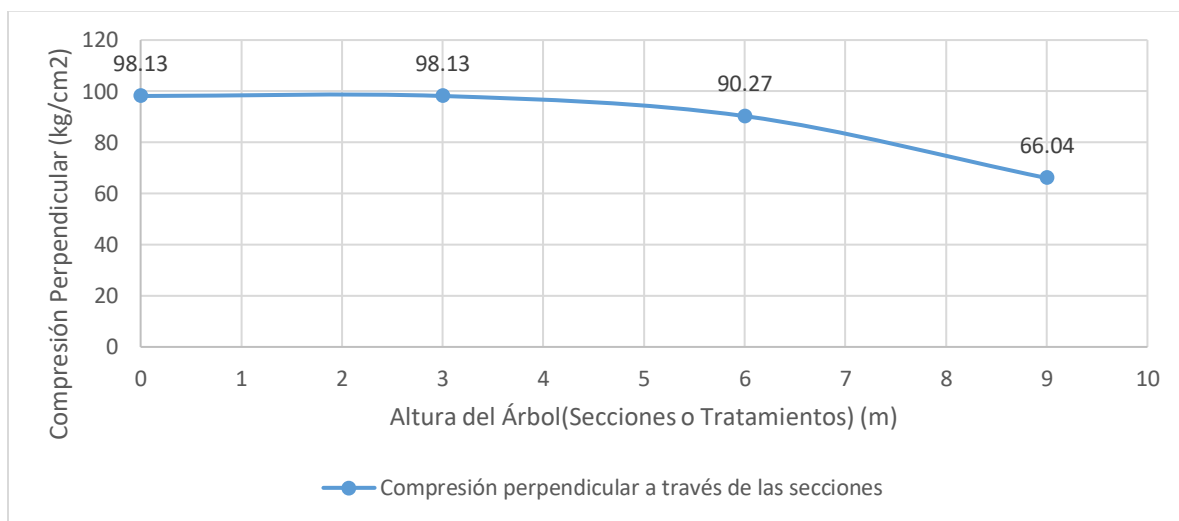


Figura 25. Compresión perpendicular (medias) según tratamientos de propiedades físicas de *Pinus maximinoi* H.E. Moore. „

El comportamiento de las figuras ha sido el mismo con una pendiente negativa a partir de la sección basal del árbol. La compresión perpendicular de las probetas ensayadas no se llegaron a fallar o romper, el esfuerzo determinado es representativo en este caso

es el esfuerzo en el límite proporcional elástico. La determinación de esta resistencia es importante en el diseño de vigas y fundamentalmente en los apoyos ya que en ellos se da este tipo de esfuerzos.

Campos (2015) determino una compresión perpendicular para madera de raleo de 45 kg/cm² en madera de corta final en estado seco de 74 kg/cm². En base a estos últimos resultados la madera experimentada muestra mejores resultados.

En un estudio Valero, Reyes y Contreras (2005) sobre bambú *Bambusa vulgaris* Schrad. ex J. C. Wendl, encontraron que la sección basal es el mejor tratamiento con 489.42 kg/cm² y concluyen que aumenta este valor si las piezas son secadas al horno.

7.2.2 Compresión paralela a la fibra

En esta propiedad contrario a la anterior (perpendicular) se orientaron las fibras de las probetas de madera en dirección de la fuerza aplicada, esta diferencia se pueden observar de mejor manera en fotografías. Esta propiedad en los antecedentes indicó mejores resultados de esfuerzo que la compresión perpendicular.

Como se muestra en el cuadro 12, se realizó un análisis de varianza para determinar los niveles de significancia entre los tratamientos del experimento realizado para la variable compresión paralela.

Cuadro 12. Análisis de varianza para la variable compresión paralela.

(F crítico = 4.46).¹²

F.V.	GL	SC	CM	F	p-valor
Tratamientos	2	6494.02	3247.01	26.65	0.0003
Árbol	4	548.39	137.10		
Error	8	974.76	121.84		
Total	14	8017.17			

Coeficiente de variación: CV (%) = 4.94.

Muestran los resultados de análisis ANDEVA, que hay diferencias significativas en base al comparativo de F, en donde el F calculado es mayor al F de tabla o crítico. El coeficiente de variación indica un 4.94% lo cual concluye que los tratamientos en base a los resultados tiene un comportamiento homogéneo estadísticamente, en base a estos resultados es necesario realizar un análisis post ANDEVA como se muestra en el cuadro 13 a continuación.

Cuadro 13. Compresión paralela a la fibra resultados comparación múltiple de medias según criterio Tukey. ¹³

Tratamiento	Media (kg/cm²)	Grupo Tukey
Sección basal	250.80	A
Sección media	219.49	B
Sección apical	200.32	B

Los resultados muestran dos grupos Tukey con la diferencia que el grupo A se encuentra solamente la sección Basal, la sección Media paso a estar en el grupo B en esta variable evaluada, pero tiene una misma tendencia en la gráfica como en la compresión perpendicular (figura 26), y las medias con un aumento considerable ya que la fuerza fue aplicada en dirección de las fibras en las probetas.

Al igual que en compresión perpendicular, las probetas no llegaron a una ruptura, solo se obtiene un esfuerzo representativo que es el límite proporcional elástico, el cual es el límite donde la pieza puede regresar a su forma original con la fuerza aplicada.

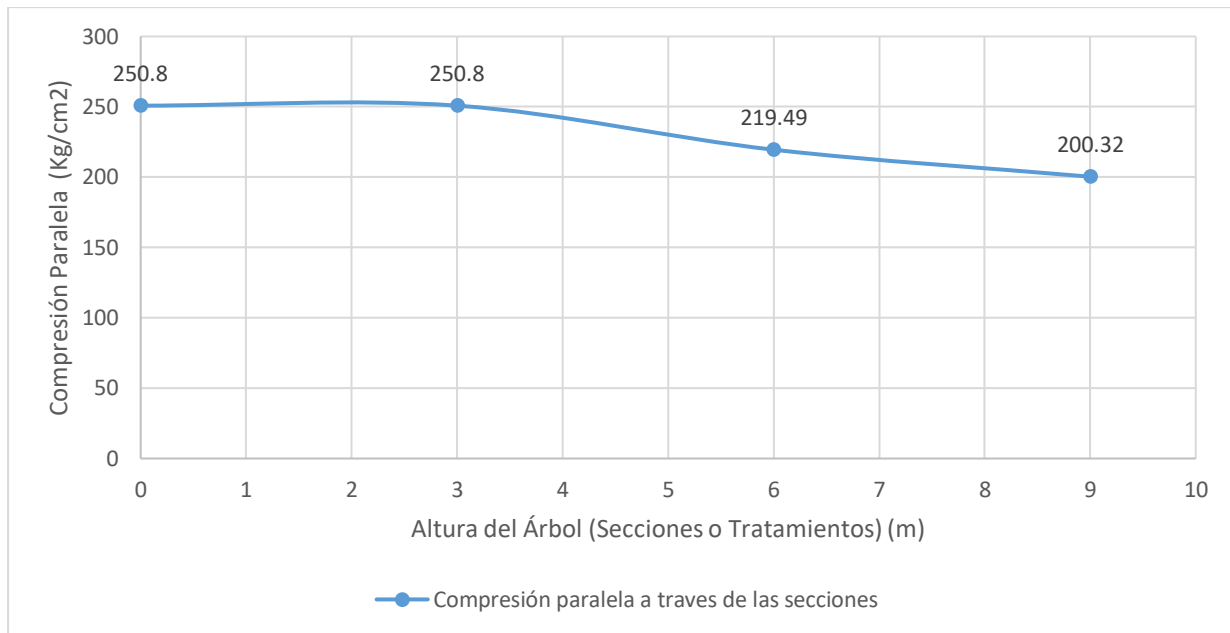


Figura 26. Compresión paralela (medias) según tratamientos de propiedades físicas de *Pinus maximinoi* H.E. Moore. ²⁶

Campos (2015) determinó para compresión paralela a la fibra en madera de corta final un valor de 206 kg/cm² en estado verde y 135 kg/cm² en madera de raleo. El valor promedio en esta variable obtenido en el experimento 223.54 kg/cm², el cual es comparable con la madera de corta final.

7.2.3 Flexión estática

Esta propiedad fue la más demostrativa ya que muestra la ruptura de las probetas de madera, indica a que fuerza la pieza cede y se rompe. Aquí se obtiene un esfuerzo el cual es uno de los comparativos para determinar el uso de la madera la resistencia de la misma. Por lo tanto para determinar los niveles de significancia entre los tratamientos del experimento para la variable flexión estática, se realizó un análisis de varianza como se muestra en el cuadro 14.

Cuadro 14. Análisis de varianza para la variable flexión estática. (F crítico = 4.46). ¹⁴

F.V.	GL	SC	CM	F	p-valor
Tratamientos	2	102.91	51.46	17.78	0.0011
Árbol	4	9.92	2.48		
Error	8	23.15	2.89		
Total	14	135.99			

Coeficiente de variación: CV (%) = 5.64

Los resultados muestran un 5.64 % de variación por lo que los tratamientos tienen un comportamiento homogéneo estadísticamente. El ANDEVA muestra que hay diferencias significativas entre los tratamientos con un nivel de significancia del $p=0.05\%$, esto se concluye a partir del criterio de F, se puede observar que la F experimental es mayor a la F crítico o de tabla por lo que se procede a realizar un análisis post ANDEVA para determinar las diferencias significativas. (Cuadro 15).

Cuadro 15. Flexión estática resultados comparación múltiple de medias según criterio Tukey. ¹⁵

Tratamiento	Media (kg/cm²)	Grupo Tukey
Sección Basal	33.26	A
Sección Media	30.37	A
Sección Apical	26.85	B

Los resultados muestran dos grupos Tukey los cuales indican la resistencia ante de la ruptura de las probetas de madera, la flexión estática nos ayudara continuamente para determinar el módulo de ruptura y elasticidad. La sección Basal y Media, están en grupo A, en donde presentan un esfuerzo mayor en base a la estadística y análisis post ANDEVA de los tratamientos. La media en kg/cm² de la sección apical se encuentra en el grupo B con una diferencia significativa estadísticamente, pero no alejada de la media

de las otras secciones o tratamientos evaluados según esta variable que es flexión estática. En la figura 27 se observa esta diferencia en la pendiente de la curva, que no es tan pronunciada como en otras graficas de anteriores variables respuesta evaluadas.

Campos (2015) obtuvo en esta propiedad un valor promedio de 35 kg/cm² el cual fue en madera de corta final de *P.maximinoi*, en esta investigación se obtuvo un valor promedio en sección basal de 33.26 kg/cm² en madera de segunda raleo.

El mejor tratamiento fue la sección basal en esta variable de flexión, de la misma manera en la investigación de bambú Valero, Reyes y Contreras (2005) determinaron que esta sección presenta diferencias significativas, con un valor de 428.41 kg/cm².

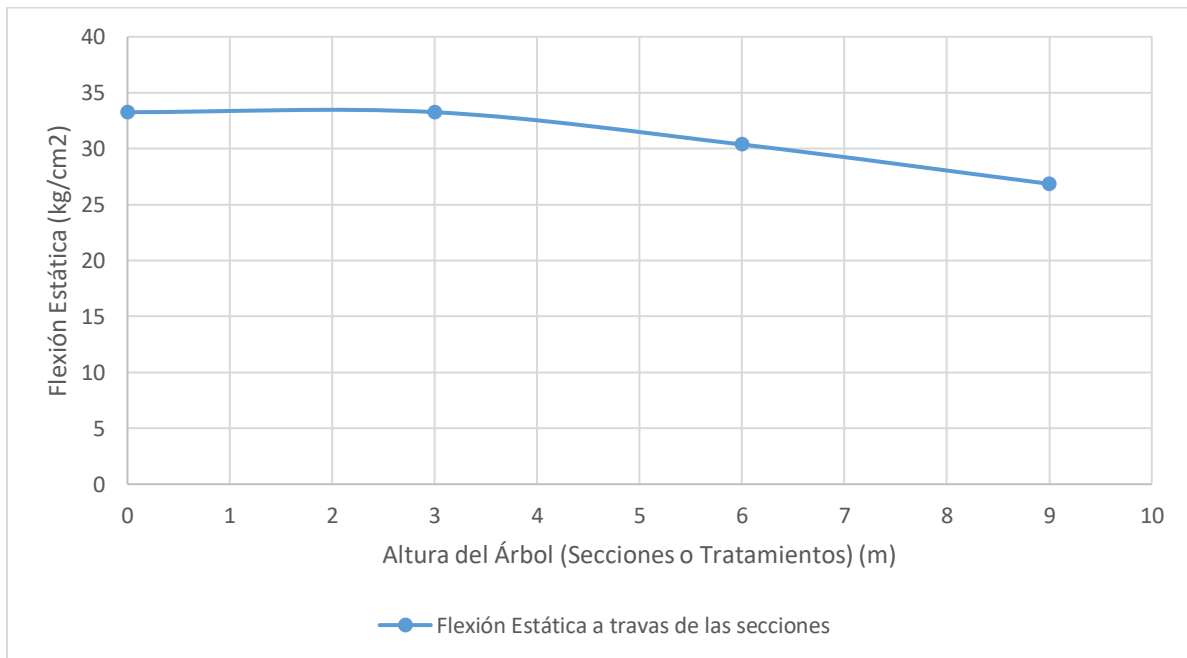


Figura 27. Flexión estática (medias) según tratamientos de propiedades físicas de *Pinus maximinoi* H.E. Moore. ²⁷

Esta propiedad de es la más determinante para cumplir con los objetivos antes propuestos, y la base para las variables de respuesta (módulo de ruptura y elasticidad).

Las probetas ensayadas llegaron a romperse y las cuales fallaron por diferentes motivos los cuales se analizaran y se darán conclusiones respecto a la resistencia de la especie *P. maximinoi*.

7.2.4 Módulo de ruptura

El módulo de ruptura se obtuvo a partir del ensayo de flexión estática, este módulo nos dio otro comparativo para determinar el uso de la madera en este caso la especie *P. maximinoi*. Estos resultados nos darán otro parámetro necesario para la discusión y para determinar el objetivo general de este informe.

Cuadro 16. Análisis de varianza para la variable módulo de ruptura.

(F crítico = 4.46).¹⁶

F.V.	GL	SC	CM	F	p-valor
Tratamientos	2	45366.20	22683.10	17.80	0.0011
Árbol	4	4377.62	1094.41		
Error	8	10192.51	1274.06		
Total	14	59936.33			

Coefficiente de variación: CV (%) = 5.64

Luego de aplicar un análisis de ANDEVA con un nivel de significancia del $p=0.05\%$, se encontró diferencia significativas, con la prueba de F en los materiales evaluados, lo que significa que los tratamientos evaluados tuvieron un comportamiento homogéneo obteniendo un coeficiente de variación calculado para el error experimental de 5.64%.

Al encontrar diferencias estadísticamente significativas para la variable módulo de ruptura, se procede a realizar una prueba de comparación múltiple de medias como se observa en el cuadro 17.

Cuadro 17. Módulo de ruptura resultados comparación múltiple de medias según criterio Tukey. ¹⁷

Tratamiento	Media (kg/cm ²)	Grupo Tukey
Sección Basal	698.40	A
Sección Media	637.67	A
Sección Apical	563.90	B

Al igual que la flexión estática el módulo de ruptura muestra dos grupos de Tukey e igual dimensionales en los resultados, es un esfuerzo en kg/cm². Las primeras dos secciones presentan mejores resultados en cuanto a su media estadística, ubica la sección basal y media en el grupo A de Tukey, y la sección apical en el grupo B de Tukey. Las diferencias entre los grupos se pueden ver de mejor manera en la figura 28.

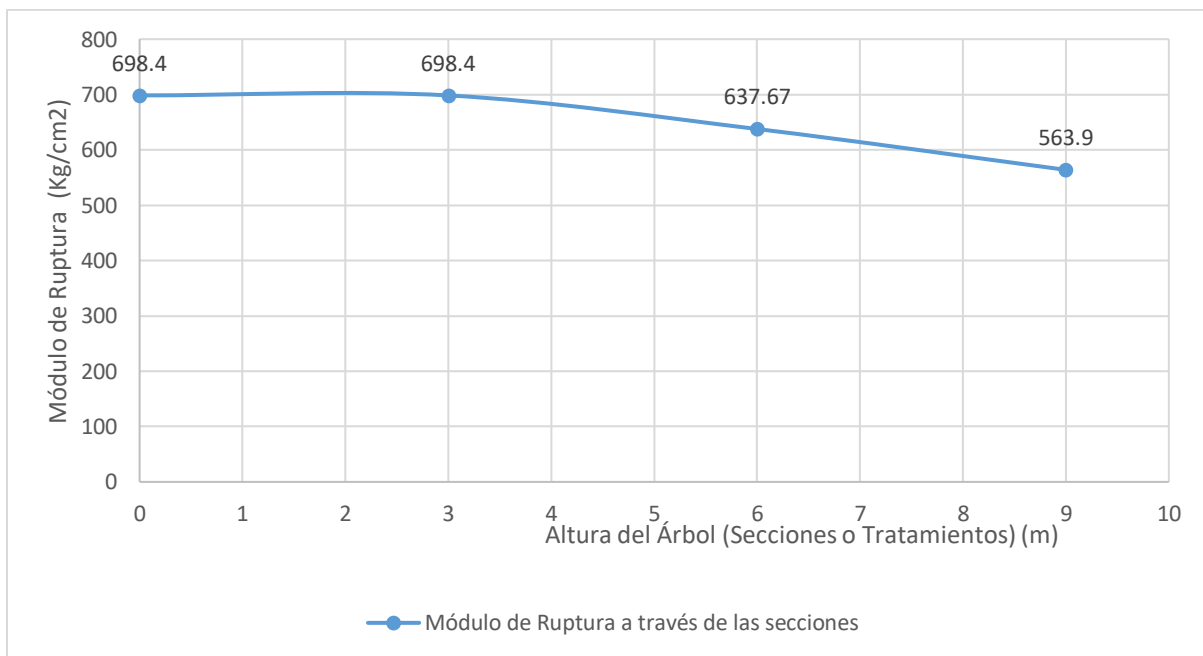


Figura 28. Módulo de ruptura (medias) según tratamientos de propiedades físicas de *Pinus maximinoi* H.E. Moore. ²⁸

Campos (2015) en madera de corta final determino un MOR de 422 kg/cm² esta verde y en madera de raleo 283 kg/cm² estos resultados estan por debajo de los que se pueden observar en la figura 28, pero es otro comparativo que la madera experimentada en este ensayo se compara de buena manera con la de corta final.

7.2.4 Módulo de elasticidad

Esta propiedad de la madera es la más representativa al momento de hablar de madera estructural o de cualquier en construcción en donde se utiliza madera. El módulo de elasticidad determina la capacidad de la madera para resistir deformaciones por lo que es un parámetro determinante al momento de seleccionar madera estructural para la construcción.

Para determinar los niveles de significancia entre tratamientos del experimento se realizó un análisis de varianza como se muestra en el cuadro 18, para la variable módulo de elasticidad en cada tratamiento.

Cuadro 18. Análisis de varianza para el módulo de elasticidad. (F crítico = 4.46).

F.V.	GL	SC	CM	F	p-valor
Tratamiento	2	8922047. 75	4461023. 88	0.05	0.9518
Árbol	4	4746739 3.66	1186684 8.42		
Error	8	7279195 70.47	8973994 6.31		
Total	14	7743090 11.89			

Coeficiente de variación: CV (%) = 19.42.

Se aplicó el análisis ANDEVA con un nivel de significancia del p=0.05%, y no se encontraron diferencias significativas estadísticamente con la prueba de F dio como resultado que la F experimental o calculada es menor a la F de tabla, por lo tanto no se procede a realizar otro análisis posterior.

En la variable módulo de elasticidad el coeficiente de variación calculado fue de 19.42 % lo que indica que los tratamientos se comportaron heterogéneos entre sí. No hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos y eso se ve representado en la F experimental, además el módulo de elasticidad es una propiedad propia de la especie, y esto se evidencio en la estadística de esta variable y como se puede observar en la figura 29.

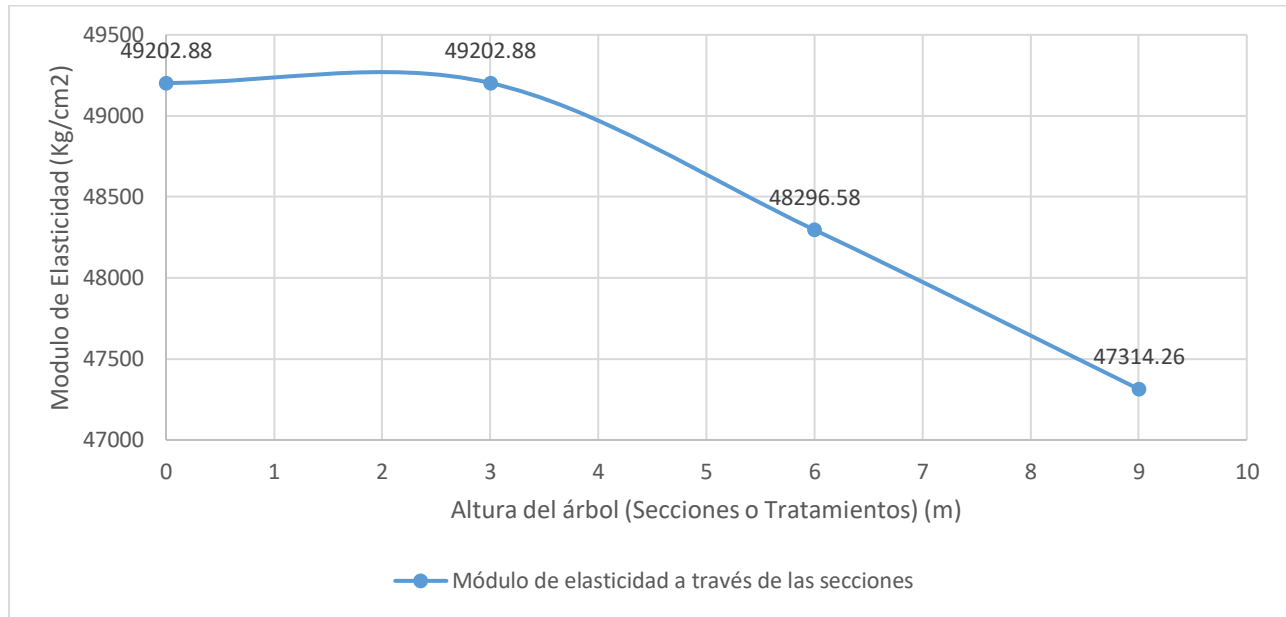


Figura 29. Módulo de elasticidad (medias) según tratamientos de propiedades físicas de *Pinus maximinoi* H.E. Moore. ²⁹

La tendencia de las gráficas con una pendiente negativa a través de las secciones se mantiene, pero en esta variable, la pendiente no representa una diferencia significativa.

El módulo de elasticidad como antes se mencionaba es el parámetro que determina que tan resistente es una especie de madera en las condiciones que se encuentra. Por lo que al momento de seleccionar, escoger un tipo de madera estructural o de construcción se utiliza este parámetro como referencia generalmente.

El módulo de elasticidad es un valor propio de cada especie es inherente a la misma, no debe de oscilar entre muchos datos, por ejemplo según Campos (2015) determina el MOE para madera de raleo con un valor de 44,029 kg/cm².

7.2 RESUMEN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

En el cuadro 19 se resumen los valores obtenidos a través de las pruebas físicas determinadas de la especie *P. maximinoi* de 12 años de edad, la cual es madera de segundo raleo.

Cuadro 19. Resumen de valores obtenidos de las propiedades físicas de cada sección del fuste evaluado. ¹⁹

Propiedad evaluada	Tratamiento	Valor obtenido (media o promedio) y media general
Densidad húmeda (g/cm³)	Sección basal	0.68
	Sección media	0.68
	Sección apical	0.55
	\bar{x}	0.64
Densidad seca (g/cm³)	Sección basal	0.63
	Sección media	0.62
	Sección apical	0.51
	\bar{x}	0.59
Humedad (%)	Sección basal	19.48
	Sección media	18.50
	Sección apical	17.45
	\bar{x}	18.48
Contracción volumétrica (%)	Sección basal	7.19
	Sección media	6.43
	Sección apical	6.42
	\bar{x}	6.68

En el cuadro 20 se resumen los valores de las propiedades mecánicas de la madera de raleo de *P. maximinoi* obtenidos a través de las pruebas de laboratorio, para los tratamientos o secciones del fuste evaluadas.

Cuadro 20. Resumen de valores obtenidos de las propiedades mecánicas de cada sección del fuste evaluado. ²⁰

Propiedad evaluada	Tratamiento	Valor obtenido (media o promedio) y media general
Compresión paralela a la fibra (kg/cm²)	Sección basal	250.80
	Sección media	219.49
	Sección apical	200.32
	\bar{x}	223.54
Compresión perpendicular la fibra (kg/cm²)	Sección basal	98.13
	Sección media	90.27
	Sección apical	66.04
	\bar{x}	84.81
Flexión estática (kg/cm²)	Sección basal	33.26
	Sección media	30.37
	Sección apical	26.85
	\bar{x}	30.16
Módulo de ruptura (kg/cm²)	Sección basal	698.40
	Sección media	637.67
	Sección apical	563.90
	\bar{x}	633.32
Módulo de elasticidad (kg/cm²)	Sección basal	49202.88
	Sección media	48296.58
	Sección apical	47314.26
	\bar{x}	48271.24

7.3 CLASIFICACIÓN DE USO SEGÚN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

7.3.1 Propiedades físicas

7.3.1.1 Densidad (g/cm³)

Según Vignote y Martínez (2006), se pueden clasificar las maderas por su densidad, según el cuadro 21.

Cuadro 21. Clasificación de la madera según su densidad. ²¹

Tipo de densidad	Densidad en kg/m ³	Densidad en 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).

En base a esta clasificación podemos identificar la madera del segundo raleo de la especie *P. maximinoi* de 12 años de edad, como semipesada en la variable densidad húmeda con una media general (0.64 g/cm³). Y como una madera semiligera en la variable densidad seca con una media general (0.59 g/cm³).

De acuerdo con investigación realizada por Campos (2015), sobre las propiedades físico-mecánicas de la especie *P.maximinoi* en Cobán Alta Verapaz, obtuvo una media general de la densidad de madera de corta final igual a 0.68 g/cm³, la cual la clasifica en madera semipesada.

7.3.1.2 Humedad (%)

Según (Herrero & García, 2009) quienes hacen una adaptación de normas de productos de madera para la construcción recomiendan con carácter general que la madera para uso estructural se instale en obra con un contenido de humedad no superior al 20 %.

En base a este parámetro la humedad media general de la especie *P.maximinoi* de 12 años de edad, está debajo del parámetro con un 18.48%, además de que ninguno resultados máximos en las probetas ensayadas sobrepasa el 20%. Por último (Herrero & García, 2009) establecen una variación de esta variable con el fin de tener una humedad lo más próxima a la humedad de equilibrio que se espera en condiciones ambientales en que se va a encontrar la madera en servicio.

Cuadro 22. Equilibrio de humedad. ^z

Ambiente	Humedad en equilibrio
Ambiente interior cerrado	12% +- 3%
Ambiente exterior bajo cubierta	15% +- 3%
Ambiente exterior al descubierto	18% +- 6%

(Herrero & García, 2009)

Esta tabla nos indica los valores en los que se encuentra la madera según el ambiente en el que se encuentra, por lo tanto si la madera tiene una humedad menor al 20% y está en un ambiente al descubierto ya sea por secado al sol o por almacenaje, puede variar la humedad en cierto porcentaje, al variar este puede salirse del parámetro para el uso de la madera.

Fonseca (2006) obtuvo que la sección apical tiene menor porcentaje de humedad en pino candelillo con un valor entre 10 y 11%. Además de determinar valores más altos para la sección basal y media, con la misma tendencia que este experimento.

7.3.1.3 Contracción volumétrica (%)

Según Pérez (1983), clasifica las maderas en base a la contracción volumétrica total, según el Cuadro 23.

Cuadro 23. Clasificación de la madera según su contracción volumétrica. ²³

Clase	Contracción volumétrica (%)	Tipo de madera
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).

En base a esta clasificación, la especie *P. maximinoi* de 12 años de edad está en la clase pequeña contracción con una media general en base a esta variable de 6.68 % de contracción volumétrica. Al estar clasificada así, esta especie no presenta cambios en su volumen al momento del proceso de secado, en el cual se le extrae la cantidad de agua presente en la madera lo que es la humedad presente.

Campos (2015) obtuvo 7.252 % en madera de raleo y 4.868% en madera de corta final, al igual se clasifica en la clase de pequeña contracción como el material ensayado de este experimento.

7.3.2 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas son las características de un material en respuesta a las fuerzas aplicadas externamente. De acuerdo con Spavento, et al. (2008), las propiedades mecánicas de la madera son aquellas que definen la aptitud y capacidad para resistir cargas externas y estas son las que hacen apta a la madera como material de construcción.

7.4.2.1 Compresión perpendicular a la fibra (g/cm^3)

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.

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 24.

Cuadro 24. Clasificación de la madera según su esfuerzo a compresión perpendicular a la fibra. ²⁴

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

(Spavento, et al. 2008).

El material experimental obtuvo un valor promedio general en esta variable de 84.81 kg/cm^2 , en donde clasifica en un alto esfuerzo a la compresión perpendicular a la especie *P. maximinoi* de 12 años de edad. Esta clasificación es el primer parámetro para utilizar esta especie de madera como material de construcción y el resultado es satisfactorio.

El resultado obtenido se puede comparar con Campos (2015), que obtuvo una compresión perpendicular a la fibra en madera de corta final de duramen de 73.56 kg/cm² y en albura 93.985 kg/cm², por lo tanto la madera de raleo evaluada en este experimento se comporta dentro de parametros para utilizarse como madera de material de construcción.

7.4.2.2 Compresión paralela la fibra (kg/cm²)

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. De igual forma Spavento, et al. (2008), propone la clasificación de la madera de acuerdo al esfuerzo de compresión paralela a la fibra según los datos del cuadro 25.

Cuadro 25. Clasificación de la madera según su esfuerzo a compresión paralela a la fibra.²⁵

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

(Spavento, et al. 2008).

La media general de los tratamientos de esta especie es de 223.54 kg/cm² lo cual clasifica a como bajo esfuerzo de compresión paralela a la fibra, no es un resultado satisfactorio para utilizar la especie *P. maximinoi* de 12 años de edad como material de construcción.

En comparación a los resultados obtenidos en la investigación de Campos (2015), en madera de corta final de duramen 205.55 kg/cm² y de albura 249.43 kg/cm². Por lo tanto la madera de segundo raleo evaluada en este experimento está dentro de parámetros de corte para su uso.

7.4.2.3 Flexión Estática, módulo de Ruptura y de elasticidad (kg/cm²)

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 & Casado, 2005).

En base a la flexión estática se determinan los módulos de ruptura y elasticidad los cuales son los parámetros determinantes de esta investigación o experimento por lo tanto 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 26, sus valores son expresados en kg/cm².

Cuadro 26. Clasificación de la madera según el módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE) a partir del ensayo a flexión estática. ²⁶

MOR	MOE	Clasificación
< 500	< 100,000	Muy bajo
500 – 950	101,000 – 120,000	Bajo
951 – 1220	121,000 – 150,000	Medio
1221 – 1750	151,000 – 200,000	Alto
> 1750	> 200,000	Muy alto

(Spavento, et al. 2008).

Al clasificar el material experimental en el cuadro 26, el MOR promedio general de los tratamientos es de 633.32 kg/cm² por lo tanto se encuentra en un módulo de ruptura bajo, además el MOE promedio es de 48,271.24 kg/cm² clasificándolo en un módulo de elasticidad muy bajo.

Después de estas clasificaciones la madera de *P. maximinoi* de 12 años de edad no obtiene resultados satisfactorios para utilizarse como material estructural en la industria de la construcción. Pero al comparar el MOR y MOE de este experimento con los obtenidos por Campos (2015), que en madera de corta final de duramen tiene un MOR de 365.13 kg/cm² y albura 490.22 kg/cm² y en MOE de madera de corta final duramen es de 118,146.51 kg/cm² y albura de 99,80687 kg/cm².

Al comparar estos resultados se puede observar un mayor módulo de ruptura y un módulo de elasticidad menor de este experimento con respecto al de Campos (2015), pero los resultados están de igual manera clasificados en bajo y muy bajo según el cuadro 26.

En el cuadro 27 se hace un resumen de la clasificación de uso en base a las propiedades físicas y mecánicas.

Cuadro 27. Resumen de clasificación de uso de *P. maximinoi*.

Propiedad evaluada	Tratamiento	Resultado	Clasificación
Densidad (g/cm³) Húmeda	Sección basal	0.68	Pesada
	Sección media	0.68	Pesada
	Sección apical	0.55	Semiligera
Densidad seca (g/cm³)	Sección basal	0.63	Semipesada
	Sección media	0.62	Semipesada
	Sección apical	0.51	Semiligera

Humedad (%)	Sección basal	19.48	Debajo del límite ($< 20\%$)
	Sección media	18.50	
	Sección apical	17.45	
Contracción volumétrica (%)	Sección basal	7.19	Pequeña contracción (5 a 10%)
	Sección media	6.43	
	Sección apical	6.42	
Compresión paralela a la fibra (kg/cm²)	Sección basal	250.80	Bajo
	Sección media	219.49	Bajo
	Sección apical	200.32	Bajo
Compresión perpendicular a la fibra (kg/cm²)	Sección basal	98.13	Alto
	Sección media	90.27	Alto
	Sección apical	66.04	Medio
Módulo de ruptura (flexión) (kg/cm²)	Sección basal	698.40	Bajo
	Sección media	637.67	Bajo
	Sección apical	563.90	Bajo
Módulo de elasticidad (flexión) (kg/cm²)	Sección basal	49,202.88	Muy bajo
	Sección media	48,296.58	Muy bajo
	Sección apical	47,314.26	Muy bajo

7.4 ANÁLISIS BENEFICIO-COSTO DE LA UTILIZACIÓN DE MADERA DE *Pinus maximinoi* H. E. Moore EN EL MERCADO DE LA CONSTRUCCIÓN

Para realizar un análisis beneficio-costos se debe aclarar desde que punto va estar enfocado, por lo tanto se analizará desde la intervención que es segundo raleo a una plantación de 12 años de edad de la especie *P. maximinoi*. Desde este punto hacia el beneficio que la materia prima extraída y transformada en distintos elementos no estructurales los cuales se pueden utilizar en la construcción convencional.

7.4.1 Raleos

Se denominan raleos o aclareos a los cortes realizados en un rodal en algún momento entre su establecimiento y cosecha final, en los cuales los árboles eliminados son de la misma especie que los árboles favorecidos. (Winter, 1977; citado por Gutiérrez, 2008).

7.4.1.1 Costos de raleos

A continuación se describen los costos unitarios por metro cúbico de las actividades que se requieren al momento de implementar un raleo en una plantación. (INAB, 2016).

Cuadro 28. Costos unitarios de actividades en un raleo. ²⁸

Actividad	Costo (Q)	Unidad de Medida
Apeo	32/m ³	Metro cúbico
Jalete	40/km	Metro cúbico
Habilitación de brechas de extracción	60/km	Jornal
Habilitación de bacadilla	60/m ²	Jornal
Manejo de residuos y limpias	30/m ³	Jornal
Transporte	20/km	Millar

Además de estos costos al análisis se añadirán costos de protección y un porcentaje de imprevistos con el objetivo de realizar un análisis apegado a la realidad y al sector forestal de la región.

7.4.1.2 Beneficios de raleos

Entre los beneficios de realizar esta práctica se encuentran, proveer un retorno financiero intermedio de la venta del producto del raleo, aumenta la producción comercial al concentrar el crecimiento del volumen en pocos pero mejores árboles, rodales raleados tienen una producción más valiosa, ingreso rápido para el propietario y reduce el costo de los subsecuentes tratamientos al aumentar el diámetro residual. (Fuentes, 2014).

Como se mencionan hay varios beneficios que se ven a futuro con la intervención de esta práctica pero en este caso nos enfocaremos en el producto extraído para la venta o renta de la materia prima transformada en elementos no estructurales para el mercado de la construcción. Para interpretar los beneficios que la madera de segundo raleo de *P. maximinoi* de 12 años de edad, hay que analizar a través de los rendimientos por volumen comercial, para la transformación de materia prima a madera aserrada y escuadra en dimensiones comerciales de la industria de la construcción.

En el cuadro 29 se describen las clases diamétricas de rendimiento en función del volumen comercial en porcentaje para arboles de *P. maximinoi* en el municipio de San Cristóbal A.V.

Cuadro 29. Tabla de rendimiento por volumen comercial *Pinus maximinoi* H. E. Moore. ²⁹

Clases Diametricas	Altura (m)	Leña (%)	Trocilla (%)	Troza (%)	Reglas (%)
10-14.99	11	9	53	8	30
15-19.99	13	6	46	6	42
20-24.99	16	1	20	24	55
25-29.99	17	0	12	40	48
30-34.99	19	0	0	0	100
35-39.99	22	0	0	0	0

(Fuentes, 2014)

Se recopilaron datos existentes en el instituto nacional de bosques INAB de la plantación actual con una edad de 12 años en la finca Santa Gabrielita Chisiram los cuales son, pendiente: 16 a 32%, DAP promedio 24 cm, altura 16 m, densidad: 612 árboles/ha, área basal 28.44 m²/ha y un volumen: 176.44 m³/ha.

A través de estos datos recopilados podemos ubicar en la tabla de rendimiento, los productos a extraer y en donde se puede observar el porcentaje de leña es mínimo. Ya con un rendimiento evaluado y demostrado de esta plantación de pino se puede proceder a evaluar los beneficios económicos que esta puede dar.

Debido a los resultados anteriores, el análisis de beneficio no llegará hasta una transformación terciaria, que sería de elementos estructurales como vigas o largueros, por lo que los usos más comunes que frecuentemente en nuestro medio se le da a la madera en la construcción convencional de viviendas, para parales que sostengan losas, formaletas para encoframientos además se utiliza la madera de diámetros menores para divisiones de interiores, puertas, ventanas, zócalos, barandas, cielo falso, molduras, pisos, muebles, gabinetes de cocina, closet, etc. Estos diferentes usos de la madera están catalogados como acabados en la construcción, por lo que no tienen una función como elemento estructural.

Cuadro 30. Análisis beneficio costo de la utilización de madera de *P. maximinoi* en el mercado de la construcción. ³⁰

Costos				
Actividad	Costos (Q.)	Unidad de Medida	Cantidad	Total (Q.)
Silvicultural				
Apeo	32.00	M ³	3	96.00
Jalete	60.00	M ³	2	120.00
Brecha de extracción.	60.00	Jornal	2	120.00
Habilitación de bacadilla	60.00	Jornal	2	120.00
Apilamiento	60.00	Jornal	2	120.00
Manejo de Residuos	60.00	Jornal	2	120
Protección				
Prevención de Incendios	60.00	jornal	2	120
Transporte				
Transporte	200.00	millar		
Transporte	85.00	M ³		85
Transformación				
A madera aserrada	2.00	pie tablar		
A madera aserrada	800.00	M ³		800
			Subtotal (sin transformación)	901
			Subtotal (con transformación)	1701
			Imprevistos (15%)	135.17
			Total (sin transformación)	1036
			Total (con transformación)	1836
Actividad	Beneficio	Unidad de Medida	Total	
Venta en rollo de madera de pino (Parales en construcción)	1450.00	M ³	1450.00	
Venta de madera aserrada	1900.00	M ³	1900.00	
Venta de madera aserrada	4500.00	millar de pies	4500.00	
B/C				
Relación beneficio venta en rollo/costos sin transformación			1.40	
Relación beneficio venta madera aserrada/costos con transformación			1.03	

Los precios de venta fueron a través de la consulta en el mercado de aserraderos y comerciantes de madera en la región, principalmente en los municipios de Santa Cruz, Cobán y San Juan Chamelco, quienes tienen el mayor movimiento en la industria forestal de la Alta Verapaz.

Como se puede observar en el cuadro 29 la mejor relación beneficio costo es de 1.4 sin transformar la madera en madera aserrada. Por lo que el análisis revela que el mejor uso económico de la madera de segundo raleo es venderla sin ninguna transformación a su vez esta puede ser utilizada en las construcciones como parales para la fundición de una losa de concreto.

8 CONCLUSIONES

1. En base a las propiedades físicas, el mejor tratamiento fue la sección basal en las variables respuesta densidad húmeda, densidad seca, porcentaje de humedad y porcentaje de contracción volumétrica. La sección Apical obtuvo los resultados más bajos, esta sección la cual se colocó en los últimos grupos de Tukey en todas las propiedades físicas con excepción en el porcentaje de contracción volumétrica en donde no existieron diferencias significativas.
2. La clasificación de madera de la especie *Pinus maximinoi* H. E. Moore de 12 años de edad según la densidad húmeda se clasifica en madera semipesada (0.600 a 0.649 g/cm³) y en densidad seca se clasifica como madera semiligera (0.500 a 0.599 g/cm³). Además en la variable humedad se encuentra esta especie por debajo del límite máximo (20%) para que esta sea usada en la industria de la construcción y por último en la propiedad de contracción volumétrica se clasifica este pino como madera de pequeña contracción (5 a 10 %).
3. De acuerdo a los resultados obtenidos en base a las propiedades físicas, mecánicas, y la clasificación de uso, la madera de *P. maximinoi* de 12 años de edad es de utilidad en la construcción pero no para su uso en estructuras.
4. En base a las propiedades mecánicas, el mejor tratamiento también fue la sección Basal y tratamiento de la sección media a su vez se colocó en el primer grupo Tukey en compresión perpendicular, flexión estática y módulo de ruptura. Al igual que en las pruebas físicas el tratamiento con los resultados más bajos estadísticamente fue la sección Apical la cual se encuentra en el último grupo Tukey en todas las propiedades mecánicas con excepción en el módulo de elasticidad, en donde no existieron diferencias significativas.

5. La madera de la especie *P. maximinoi*, se clasificó en base a sus propiedades mecánicas, en la variable compresión perpendicular a la fibra se clasificó en un alto esfuerzo (76 a 100 kg/cm²). Respecto a la compresión paralela esta madera de raleo se clasificó en un bajo esfuerzo (201 a 300 kg/cm²). Por último esta especie de pino a través del ensayo a flexión presentó resultados en MOR (módulo de ruptura) de bajo (500 a 950 kg/cm²) y se clasificó según su MOE (módulo de elasticidad) en muy bajo (< 100,000 kg/cm²).

6. Con base al análisis estadístico la madera de *P. maximinoi* se concluye que los tratamientos (sección Basal, Media y Apical) no muestran el mismo comportamiento en sus propiedades físicas y mecánicas.

7. En el análisis beneficio costo, la mejor utilidad de la madera de segundo raleo es como parales.

8. La mejor relación beneficio costo, fue sin transformar la madera, aquí se determinó una relación de 1.4 que significa que por cada Q.1.00 gastado o invertido tiene como retorno Q.1.40, lo que significa una ganancia de Q.0.40.

9 RECOMENDACIONES

1. Apoyar a los estudiantes de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Ambientales de la Universidad Rafael Landívar en el financiamiento de estas pruebas, los laboratorios los proporciona sin costo la universidad, pero hay otros gastos en la elaboración de las probetas a ensayar, además de apoyarlo incentivarlo a la investigación de este tipo de experimentos ya que proporciona clasificaciones y uso para cada especie de madera.
2. Determinar propiedades físicas y mecánicas de otras especies de la región de Alta Verapaz, como por ejemplo Taxiscobo, para tener un registro de las mismas y determinar mejores usos a maderas de diámetros menores.
3. Usar la metodología empleada en este experimento, la cual permite ensayar cualquier especie de madera de la región que este en el proceso del segundo raleo, esto para comparar sus propiedades físicas y mecánicas con las de este experimento.
4. Utilizar los laboratorios tanto del campus San Pedro Claver, S. J." De La Verapaz y del campus central de la universidad Rafael Landívar, donde se cuenta con la infraestructura y equipo necesario para este tipo de estudios.
5. Implementar otro tipo de tratamientos químicos o de curado a la madera de pino, para comparar los resultados, y observar las variaciones que se puedan dar así como el gasto que se incurriría al usarlos.
6. Realizar otro tipo de pruebas mecánicas a esta especie de pino con el fin de encontrar valores los cuales no se han discutido y sirvan para clasificar de mejor manera a la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, así mismo estas pruebas se pueden realizar a otras especies de la región.

10 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.
- 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.
- Aróstegui, A. (2010). Propiedades Físico-Mecánicas y Usos de Dos Especies de Podocarpus. Revista Forestal del Perú, 1-10.
- Burrión, R. C. (2004). Aplicaciones De La Madera En La Construcción. Guatemala.
- Campos, C. (2015). Propiedades Físicas y Mecánicas de Pinnus Maximinoi. Cobán, Alta Verapaz.
- Castañeda, J. B. (2013). Estudio de propiedades físico mecánicas (corte y flexión) de la especie de madera tropical teca (tectona grandis) en el sistema de laminado pegado estructural. Bogotá, Colombia.
- Castellanos, J. S. (2008). Características Mecánicas De La Madera Y Su Aplicación En La Industria De La Construcción. Morelia, México.
- Carrasco, F. C. (2017). Crece Negocios. Consultado el 25 de marzo de 2017. Disponible en: <https://www.crecenegocios.com/analisiscostobeneficio>.

Comisión Nacional Forestal, CONAFOR. (s. f.) Paquetes tecnológicos: Ficha técnica del Pinus Maximinoi H.E. Moore (en línea). Consultado 3 febrero de 2017. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/970Pinus%20maximinoi.pdf>

Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., González, L., Tablada, M. & Robledo, C.W. (2010). Programa de Análisis Estadístico para computadora InfoStat. Argentina.

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.

Fernandez, J.I., Gutierrez, A., Baonza, M.V., Diez, M.R., (1995). Características físico - mecánicas de las maderas de especies de crecimiento rápido de procedencia española. MAPA. INIA Vol 4 n° 2.

Fonseca, M. (2006). Determinación de la composición química de la madera de pino candelillo (Pinus maximinoi H. E. Moore). Tactic Alta Verapaz .

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.

Fuentes, L. (2014). Productividad de las plantaciones forestales en los diferentes tipos de raleos en la región II las Verapaces. Guatemala.

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.

Gutiérrez, B. J. (2008). Evaluación de la de sitio, en la finca Sexán Ixte, Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. Tesis respuesta del crecimiento, productividad y calidad de una plantación de Teca (Tectona Grandis L.F. Verbenaceae), con un raleo prescrito al 50%, en tres clases. Ing. Forestal Guatemala. Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas 11-15 p.

Herrero, M., & García, M. (2009). Productos de Madera para la construcción . Austria.

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

Instituto Nacional De Bosques. (2016). Consultado 10 de agosto 2017. Disponible en: <http://portal.inab.gob.gt/index.php/46-pinfor/118-programa-de-incentivos-forestales-pinfor>.

Instituto Nacional De Bosques. (2017). Consultado el 3 de septiembre 2017. Disponible en: <http://www.inab.gob.gt/>

Infomadera. s. f. b Propiedades mecánicas de la madera estructural (en línea). Consultado 5 enero 2017. Disponible en: <http://infomadera.net/empresa/producto/886/info/14220>

Lee A., X. Bai, & P. Peralta. (1994). Selected Physical and Mechanical Propierties of Giant Timber Bamboo Grown in South Carolina. Forest Products Journal. September. Vol. 44 (9): 40 – 45.

- MAGA. (2010). Mapa de zonas de vida de Holdridge para la República de Guatemala. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación
- Mansilla, W. R. (1996). Ingeniería De La Madera En Guatemala. Guatemala.
- Marroquín, U. F. (20 de Febrero de 2017). Arboretum UFM Pinus maximinoi. Obtenido de <http://arboretum.ufm.edu/plantas/pinus-maximinoi/>: www.arboretum.ufm.edu.
- Montgomery, D. (2004). Diseño y Análisis de Experimentos. 2ª Ed. México, D.F.: Limusa. 686 p.
- Moreno, J. R. (2006). Propiedades físico-mecánicas de la madera de Tectona grandis Linn. F. (teca), proveniente de una plantación de ocho años de edad en Cochabamba, Bolivia. Bolivia.
- 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.
- Prades, C. (2000). Características Físico-Mecánicas de la madera de Pinus pinaster. Ait, procedente de Granada. Granada, España.
- Rodríguez, C. & Vergara, E. 2008. Propiedades físicas y mecánicas de la madera de Pinus canariensis crecido en el secano de la Región del Maule. Chile.

Sosa, W. C. (2004). Propiedades Físico Mecánicas del Pinus Patula Schiede. Guatemala.

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.

Suirezs, T. M. (2005). Comportamiento de la Madera de Pinus taeda, impregnado con arseniato de cobre cromatado. Argentina.

URL, ONU (2012). Estudio de Potencial económico y propuesta de mercadoterritorial del Valle del Polochic, departamento de Alta Verapaz. (en línea). Guatemala. Consultado 03 feb. 2017. Disponible en: <https://www.url.edu.gt/PortalURL/Archivos/56/Archivos/ALTA%20VERAPAZ%20Estudio%20de%20potencial%20econ%C3%B3mico.pdf>.

Valero, S., Reyes, E., & Contreras, W. (2005). Estudio de las propiedades físicas y mecánicas del Bambú de tres años de edad y provenientes de plantaciones en Venezuela. Francisco Javier Pulgar, Venezuela.

Vignote, S. & 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.

11 ANEXOS

Anexo 1. Boletas de campo para la toma de datos de propiedades físicas.

Prueba Física DENSIDAD (REPETICIONES)	PESO (g)	VOLUMEN (cm ³)	DENSIDAD (g/cm ³)
SECCIÓN BASAL (1)			
SECCIÓN BASAL (2)			
SECCIÓN BASAL (3)			
SECCIÓN BASAL (4)			
SECCIÓN BASAL (5)			
SECCIÓN MEDIA (1)			
SECCIÓN MEDIA (2)			
SECCIÓN MEDIA (3)			
SECCIÓN MEDIA (4)			
SECCIÓN MEDIA (5)			
SECCIÓN APICAL (1)			
SECCIÓN APICAL (2)			
SECCIÓN APICAL (3)			
SECCIÓN APICAL (4)			
SECCIÓN APICAL (5)			

$$Densidad = \frac{Peso}{Volumen}$$

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(Peso \text{ húmedo}) - (Peso \text{ seco})}{(Peso \text{ Seco})} * 100$$

Prueba Física HUMEDAD (REPETICIONES)	PESO SECO (g)	PESO HUMEDO (g)	% HUMEDAD
SECCIÓN BASAL (1)			
SECCIÓN BASAL (2)			
SECCIÓN BASAL (3)			
SECCIÓN BASAL (4)			
SECCIÓN BASAL (5)			
SECCIÓN MEDIA (1)			
SECCIÓN MEDIA (2)			
SECCIÓN MEDIA (3)			
SECCIÓN MEDIA (4)			
SECCIÓN MEDIA (5)			
SECCIÓN APICAL (1)			
SECCIÓN APICAL (2)			
SECCIÓN APICAL (3)			
SECCIÓN APICAL (4)			
SECCIÓN APICAL (5)			

Prueba Física Contracción Volumétrica (REPETICIONES)	Volumen Verde (cm3)	Volumen Seco (g)	% Contracción Volumétrica
SECCIÓN BASAL (1)			
SECCIÓN BASAL (2)			
SECCIÓN BASAL (3)			
SECCIÓN BASAL (4)			
SECCIÓN BASAL (5)			
SECCIÓN MEDIA (1)			
SECCIÓN MEDIA (2)			
SECCIÓN MEDIA (3)			
SECCIÓN MEDIA (4)			
SECCIÓN MEDIA (5)			
SECCIÓN APICAL (1)			
SECCIÓN APICAL (2)			
SECCIÓN APICAL (3)			
SECCIÓN APICAL (4)			
SECCIÓN APICAL (5)			

$$\text{Contracción Volumétrica} = \frac{(\text{Volumen Verde}) - (\text{Volumen Seco})}{(\text{Volumen Verde})} * 100$$

Anexo 2. Análisis estadístico de propiedades físicas y mecánicas.

Análisis de la varianza

Humedad

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Humedad	15	0.97	0.94	1.18

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamientos	10.38	2	5.19	109.84	<0.0001
Arbol	0.23	4	0.06	1.21	0.3765
Error	0.38	8	0.05		
Total	10.98	14			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.39279

Error: 0.0472 gl: 8

Tratamientos	Medias	n	E.E.
Basal	19.48	5	0.10 A
Media	18.50	5	0.10 B
Apical	17.45	5	0.10 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

DH(DENSIDAD HÚMEDA)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
DH	15	0.92	0.86	3.99

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamientos	0.06	2	0.03	42.84	0.0001
Arbol	3.8E-03	4	9.5E-04	1.47	0.2987
Error	0.01	8	6.5E-04		
Total	0.06	14			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.04597

Error: 0.0006 gl: 8

Tratamientos	Medias	n	E.E.
Basal	0.68	5	0.01 A
Media	0.68	5	0.01 A
Apical	0.55	5	0.01 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

DS (DENSIDAD SECA)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
DS	15	0.90	0.83	4.34

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamientos	0.04	2	0.02	33.17	0.0001
Arbol	4.2E-03	4	1.1E-03	1.61	0.2626
Error	0.01	8	6.5E-04		
Total	0.05	14			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.04620

Error: 0.0007 gl: 8

Tratamientos	Medias	n	E.E.
Basal	0.63	5	0.01 A
Media	0.62	5	0.01 A
Apical	0.51	5	0.01 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

CV (CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CV	15	0.55	0.21	11.66

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamientos	1.94	2	0.97	1.60	0.2600
Arbol	3.89	4	0.97	1.61	0.2630
Error	4.85	8	0.61		
Total	10.68	14			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=1.40648

Error: 0.6057 gl: 8

Tratamientos	Medias	n	E.E.
Basal	7.19	5	0.35 A
Apical	6.43	5	0.35 A
Media	6.42	5	0.35 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Análisis de la varianza

CPerF (Compresión Perpendicular a la Fibra)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CPerF	15	0.91	0.85	7.03

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamientos	2798.49	2	1399.24	39.31	0.0001
Arbol	205.89	4	51.47	1.45	0.3039
Error	284.75	8	35.59		
Total	3289.13	14			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=10.78193

Error: 35.5941 gl: 8

Tratamientos	Medias	n	E.E.
Basal	98.13	5	2.67 A
Media	90.27	5	2.67 A
Apical	66.04	5	2.67 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

CParF (Compresión paralela a la Fibra)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CParF	15	0.88	0.79	4.94

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamientos	6494.02	2	3247.01	26.65	0.0003
Arbol	548.39	4	137.10	1.13	0.4093
Error	974.76	8	121.84		
Total	8017.17	14			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=19.94851

Error: 121.8444 gl: 8

Tratamientos	Medias	n	E.E.
Basal	250.80	5	4.94 A
Media	219.49	5	4.94 B
Apical	200.32	5	4.94 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Flest (Flexión Estática)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Flest	15	0.83	0.70	5.64

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamientos	102.91	2	51.46	17.78	0.0011
Arbol	9.92	4	2.48	0.86	0.5282
Error	23.15	8	2.89		
Total	135.99	14			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=3.07453

Error: 2.8943 gl: 8

Tratamientos	Medias	n	E.E.
Basal	33.26	5	0.76 A
Media	30.37	5	0.76 A
Apical	26.85	5	0.76 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

ModRup (Modulo de Ruptura)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
ModRup	15	0.83	0.70	5.64

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamientos	45366.20	2	22683.10	17.80	0.0011
Arbol	4377.62	4	1094.41	0.86	0.5273
Error	10192.51	8	1274.06		
Total	59936.33	14			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=64.50649

Error: 1274.0640 gl: 8

Tratamientos	Medias	n	E.E.
Basal	698.40	5	15.96 A
Media	637.67	5	15.96 A
Apical	563.90	5	15.96 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

ModElast (Modulo de Elasticidad)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
ModElast	15	0.07	0.00	19.62

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamientos	8922047.75	2	4461023.88	0.05	0.9518
Arbol	47467393.66	4	11866848.42	0.13	0.9661
Error	717919570.47	8	89739946.31		
Total	774309011.89	14			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=17119.87820

Error: 89739946.3089 gl: 8

Tratamientos	Medias	n	E.E.	
Basal	49202.88	5	4236.51	A
Media	48296.58	5	4236.51	A
Apical	47314.26	5	4236.51	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Anexo 3. 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</i>	Verde	0.46	49,600	9,300	27,600	6,700	2,500	América Tropical
<i>augustifolia</i>	12 %	-	93,100	11,100	52,800	11,900	3,500	
<i>Pinus caribaea</i>	Verde	0.68	77,200	13,000	33,800	8,100	4,400	América Tropical
	12 %	-	115,100	15,400	58,900	14,400	5,500	
<i>Pinus oocarpa</i>	Verde	0.55	55,200	12,000	25,400	7,200	2,600	América Tropical
	12 %	-	102,700	15,500	53,000	11,900	4,000	
<i>Pinus radiata</i>	Verde	0.42	42,100	8,100	19,200	5,200	2,100	Asia
	12 %	-	80,700	10,200	41,900	11,000	3,300	
<i>Calophyllum</i>	Verde	0.52	72,400	11,000	31,400	8,700	4,000	América Tropical
<i>brasiliense</i>	12 %	-	100,700	12,600	47,600	14,300	5,100	
<i>Quercus</i> spp.	Verde	0.76	-	-	-	-	-	América Tropical
	12 %	-	158,600	20,800	-	-	11,100	
<i>Swietenia</i>	Verde	0.45	62,100	9,200	29,900	8,500	3,300	América Tropical
<i>macrophylla</i>	12 %	-	79,300	10,300	46,700	8,500	3,600	
<i>Cupressus</i>	Verde	0.93	42,700	6,300	19,900	6,600	1,500	África
<i>lusitánica</i>	12 %	-	71,000	7,000	37,100	10,900	2,000	
<i>Ceiba pentandra</i>	Verde	0.25	15,200	2,800	7,300	2,400	1,000	América Tropical
	12 %	-	29,600	3,700	16,400	3,800	1,000	
<i>Virola</i> spp.	Verde	0.42	38,600	11,300	16,500	5,000	1,400	América Tropical
	12 %	-	75,200	14,100	35,400	6,800	2,300	
<i>Cedrela</i> spp.	Verde	0.41	51,700	9,000	23,200	6,800	2,400	América Tropical
	12 %	-	79,300	9,900	42,800	7,600	2,700	
<i>Tectona grandis</i>	Verde	0.55	80,000	9,400	41,100	8,900	4,100	Asia
	12 %	-	100,700	10,700	58,000	13,000	4,400	

(Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, 1999)

Anexo 4. Sustento de resultados experimentales, pruebas homogeneidad u homocedasticidad de varianzas gráficas de predichos contra residuos, y graficas de cuantiles en base a residuos.

Densidad húmeda (g/cm³)

DISEÑO BLOQUES COMPLETOS AL AZAR						
Propiedades físicas						
Densidad húmeda	Repeticiones					
Tratamiento	I	II	III	IV	V	Varianza
T1	0.67741935	0.70625	0.69333333	0.68	0.66666667	0.00023481
T2	0.6625	0.68666667	0.6875	0.69375	0.65333333	0.00031358
T3	0.57857143	0.5125	0.55	0.60625	0.5125	0.0016934

Prueba Hartley o F máxima	
7.211860909	
15.5	H tabla (3,4,0.05)(t,r-1,grado)

Prueba Bartlett		
Sp2	0.00074726	
q	2.09840923	
c	1.11111111	
Xo2 (2.3026)	4.34419814	calculado
X2	5.99146	tabla

Densidad seca (g/cm³)

Densidad seca	Repeticiones					
Tratamiento	I	II	III	IV	V	Varianza
T1	0.65	0.65333333	0.63571429	0.62142857	0.61428571	0.00029372
T2	0.60666667	0.62857143	0.62666667	0.63333333	0.59285714	0.00029546
T3	0.54615385	0.47333333	0.52	0.56	0.46666667	0.00176928

Prueba Hartley	
6.02373168	Hc
15.5	H tabla (3,4,0.05)(t,r-1,grado)

Prueba Bartlett		
Sp2	0.00078616	
q	2.00116269	
c	1.11111111	
Xo2 (2.3026)	4.14287504	calculado
X2	5.99146	tabla

Contracción volumétrica (%)

Contracción Vol.		Repeticiones				
Tratamiento	I	II	III	IV	V	Varianza
T1	9.67741935	6.25	6.66666667	6.66666667	6.66666667	1.9730966
T2	6.25	6.66666667	6.25	6.25	6.66666667	0.05208333
T3	7.14285714	6.25	6.25	6.25	6.25	0.15943878

Prueba Hartley	
37.88345473	Hc
15.5	H tabla (3,4,0.05)(t,r-1,grado)

Prueba Bartlett		
Sp2	0.72820624	
Q	5.48928845	
C	1.11111111	
Xo2 (2.3026)	11.3641116	calculado
X2	5.99146	tabla

Humedad (%)

% Humedad		Repeticiones				
Tratamiento	I	II	III	IV	V	Varianza
T1	19.7339246	19.4503171	19.4260486	19.3258427	19.4831014	0.02299241
T2	18.6046512	18.558952	18.1222707	18.8053097	18.4210526	0.06413084
T3	17.4778761	17.8414097	17.4208145	17.3515982	17.1428571	0.06470059

Prueba Hartley	
2.813997841	Hc
15.5	H tabla (3,4,0.05)(t,r-1,grado)

Prueba Bartlett		
Sp2	0.05060795	
Q	0.53238598	
C	1.11111111	
Xo2 (2.3026)	1.10216355	calculado
X2	5.99146	tabla

Compresión perpendicular a la fibra (kg/cm²)

Compresión Perpen.		Repeticiones					
Tratamiento	I	II	III	IV	V	Varianza	
T1	94.9181818	98.0109091	102.665455	98.3618182	96.7127273	8.24065884	
T2	90.9854545	94.5363636	94.1181818	79.4	92.3218182	38.9722668	
T3	77.1363636	59.8109091	65.4763636	55.8181818	71.9490909	75.4128628	

Prueba Hartley	
9.151314749	Hc
15.5	H tabla (3,4,0.05)(t,r-1,grado)

Prueba Bartlett		
Sp2	40.8752628	
Q	1.80087458	
C	1.11111111	
Xo2 (2.3026)	3.72823178	calculado
X2	5.99146	tabla

Compresión paralela a la fibra (kg/cm²)

Compresión Paralela		Repeticiones					
Tratamiento	I	II	III	IV	V	Varianza	
T1	262.554545	243.48	273.014545	233.143636	241.832727	269.349199	
T2	228.087273	216.332727	227.152727	211.021818	214.852727	58.9533147	
T3	203.287273	198.62	188.949091	202.370909	208.365455	52.4819593	

Prueba Hartley	
5.132224528	Hc
15.5	H tabla (3,4,0.05)(t,r-1,grado)

Prueba Bartlett		
Sp2	126.928158	
Q	1.55935989	
C	1.11111111	
Xo2 (2.3026)	3.22823986	calculado
X2	5.99146	tabla

Flexión estática (kg/cm²)

Flexión Estática		Repeticiones				
Tratamiento	I	II	III	IV	V	Varianza
T1	33.6272727	33.3781818	34.9890909	31.2	33.0909091	1.85269025
T2	30.0836364	29.3381818	30.7527273	32.5854545	29.0672727	1.97459174
T3	25.8654545	23.6345455	27.6745455	28.4872727	28.6	4.43287174

Prueba Hartley	
2.392667496	Hc
15.5	H tabla (3,4,0.05)(t,r-1,grado)

Prueba Bartlett		
Sp ²	2.75338457	
Q	0.43854131	
C	1.11111111	
Xo ² (2.3026)	0.90788314	calculado
X ²	5.99146	tabla

Módulo de ruptura (kg/cm²)

Módulo de Ruptura		Repeticiones				
Tratamiento	I	II	III	IV	V	Varianza
T1	706.172727	700.941818	734.770909	655.2	694.909091	817.036399
T2	631.756364	616.101818	645.807273	684.294545	610.412727	870.794955
T3	543.174545	496.325455	581.165455	598.232727	600.6	1954.89644

Prueba Hartley	
2.392667496	Hc
15.5	H tabla (3,4,0.05)(t,r-1,grado)

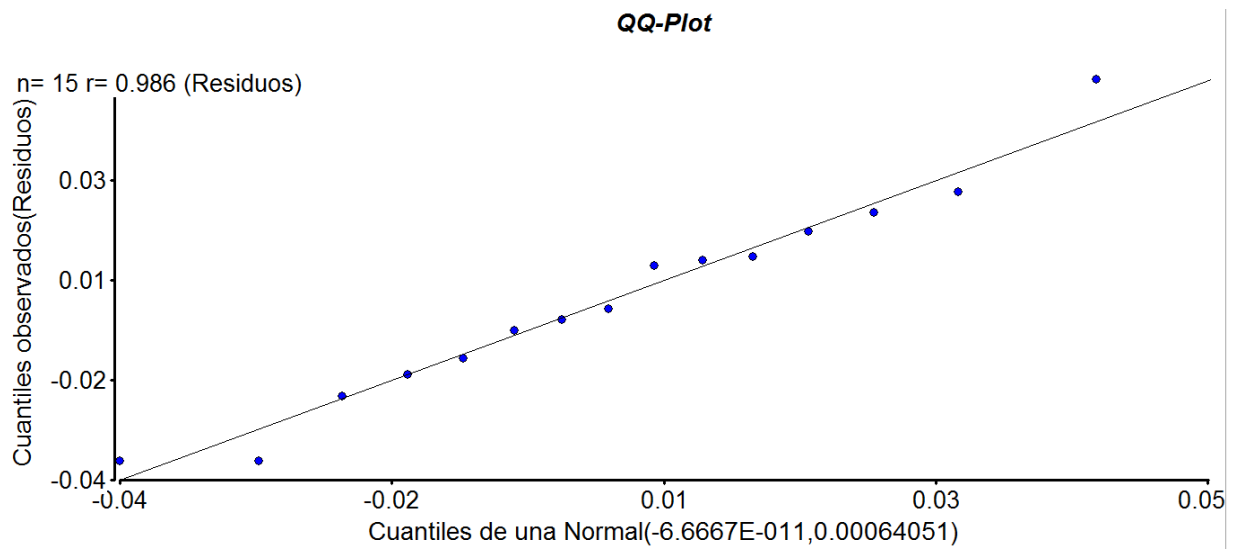
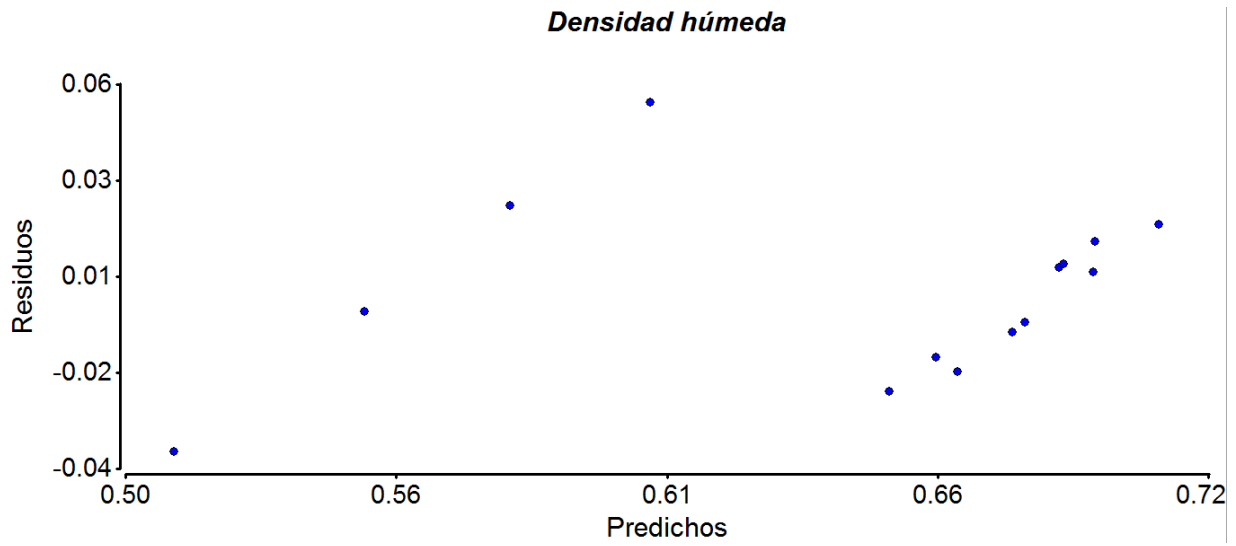
Prueba Bartlett		
Sp ²	1214.2426	
q	0.43854131	
c	1.11111111	
Xo ² (2.3026)	0.90788314	calculado
X ²	5.99146	tabla

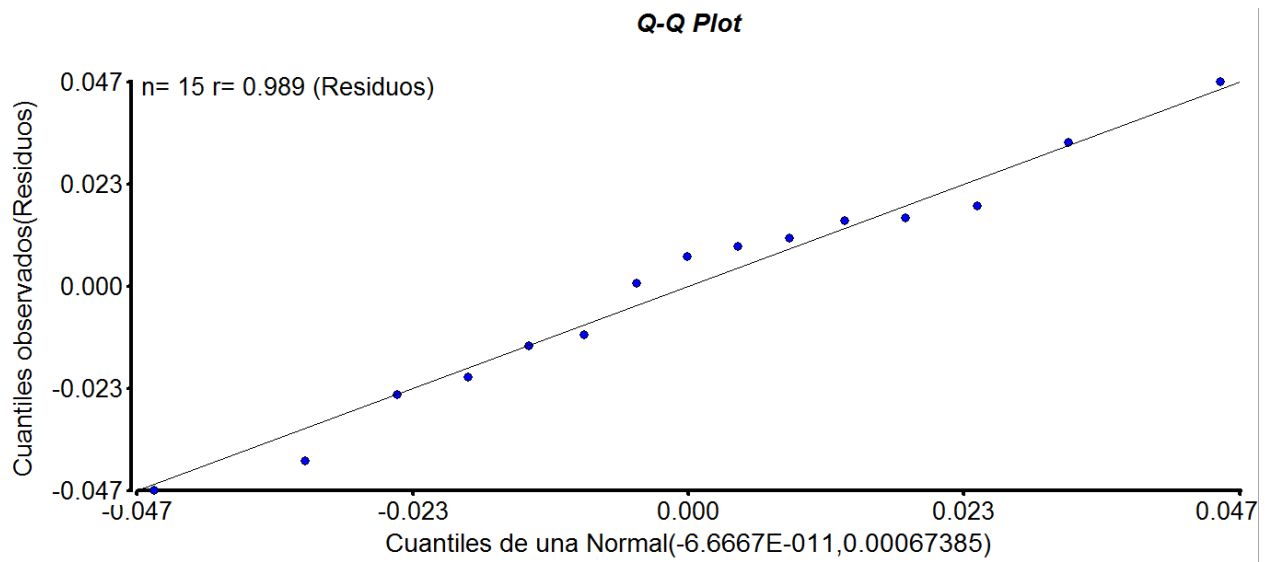
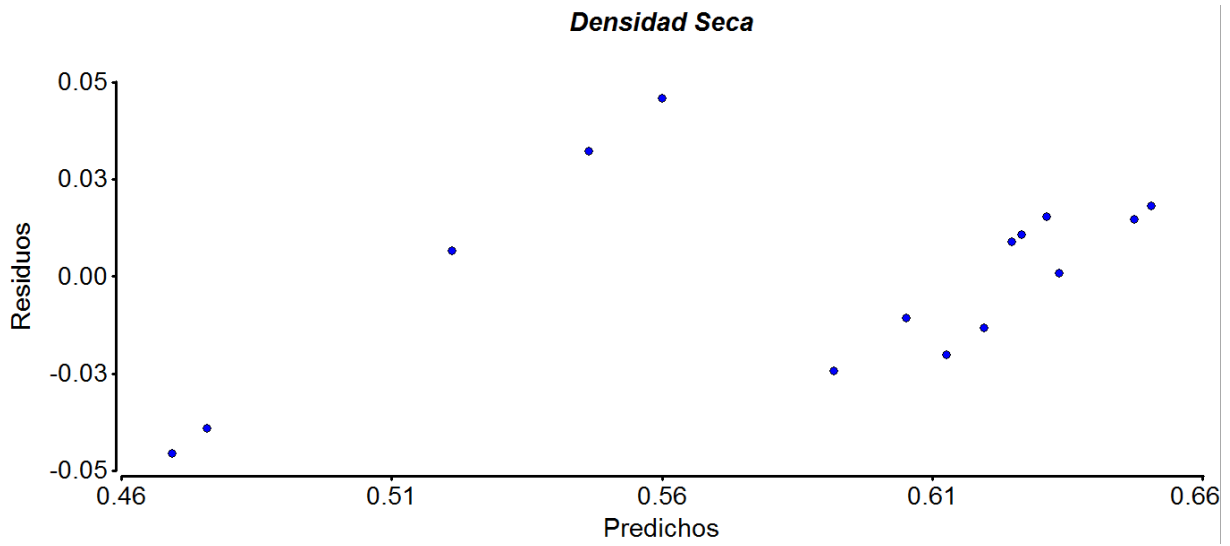
Módulo de elasticidad (kg/cm²)

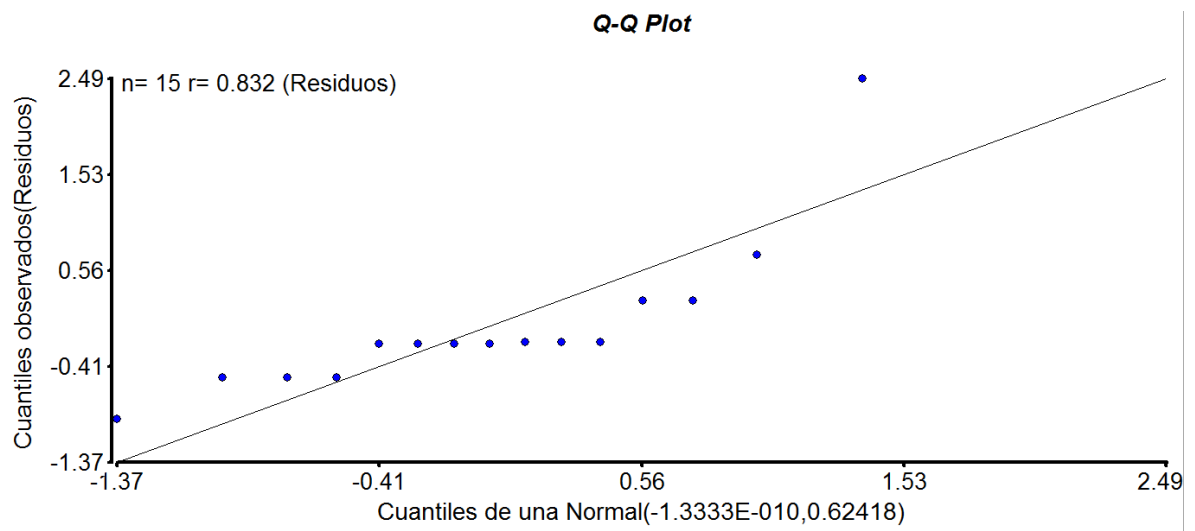
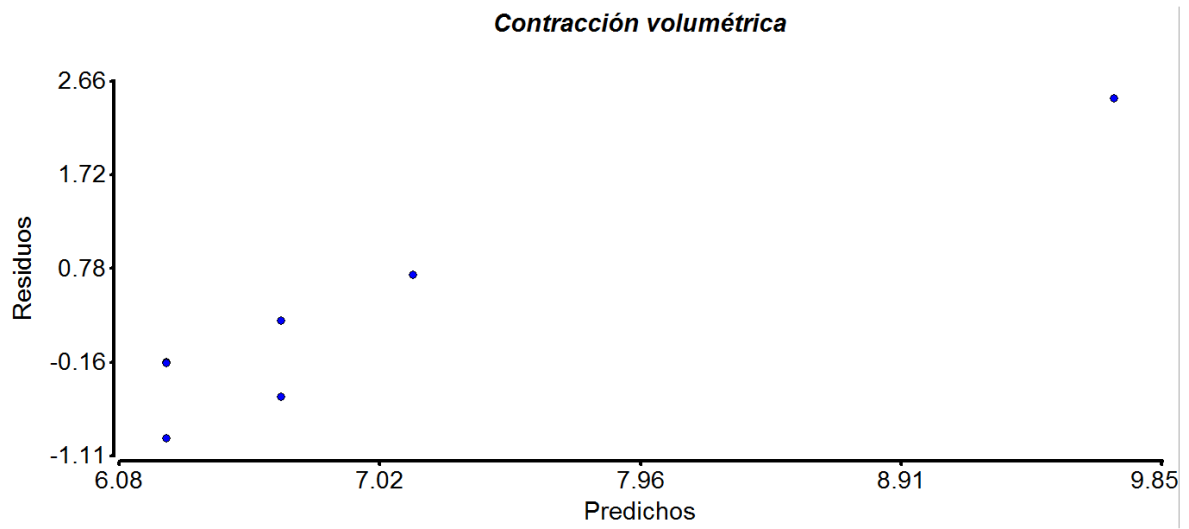
Módulo de elasticidad		Repeticiones					
Tratamiento	I	II	III	IV	V	Varianza	
T1	49655.6121	52515.0722	58789.4089	44256.6003	40797.7314	49547331.7	
T2	56977.2132	44424.8665	46504.2432	52105.6158	41470.9583	38663474.08	
T3	37801.4577	38545.8228	46137.6936	51824.1057	62262.2277	103135913.3	

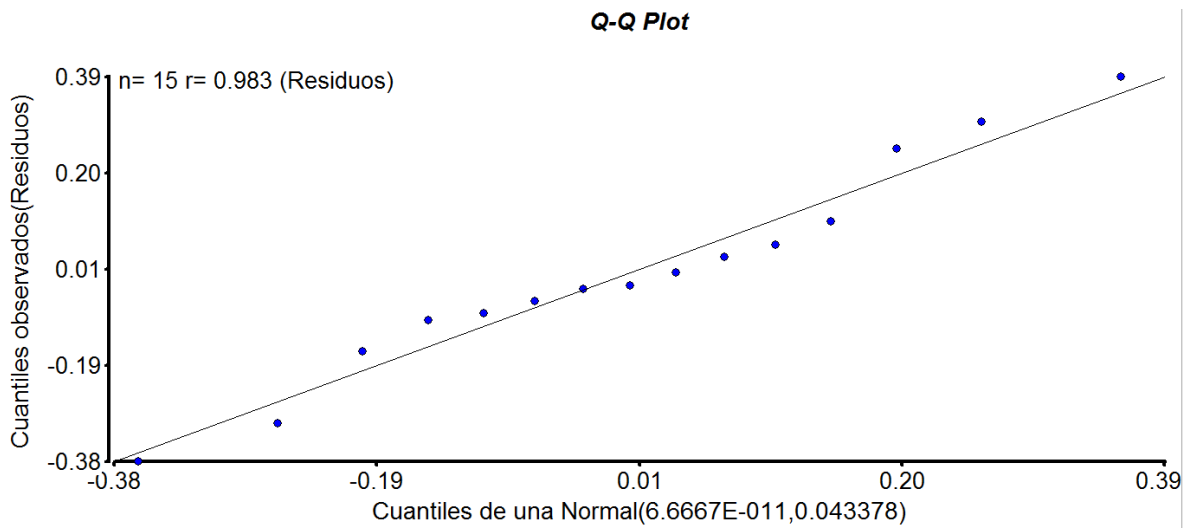
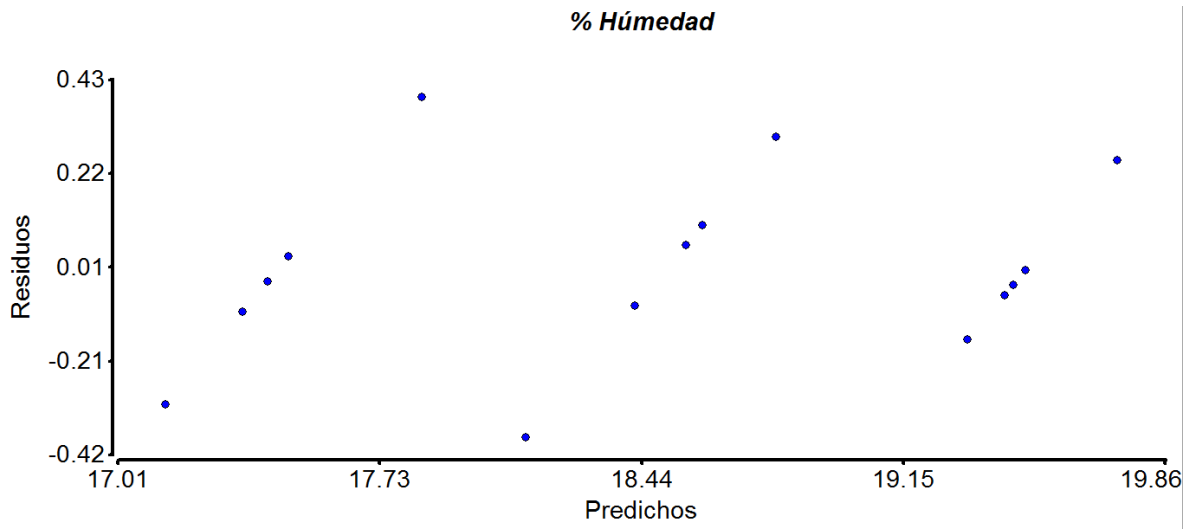
Prueba Hartley	
2.667528353	Hc
15.5	H tabla (3,4,0.05)(t,r-1,grado)

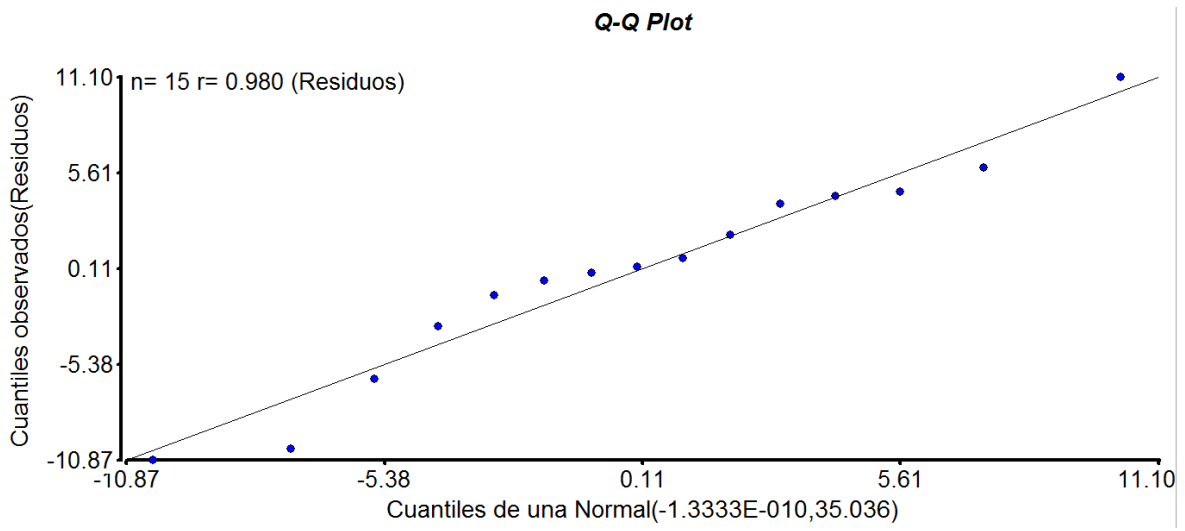
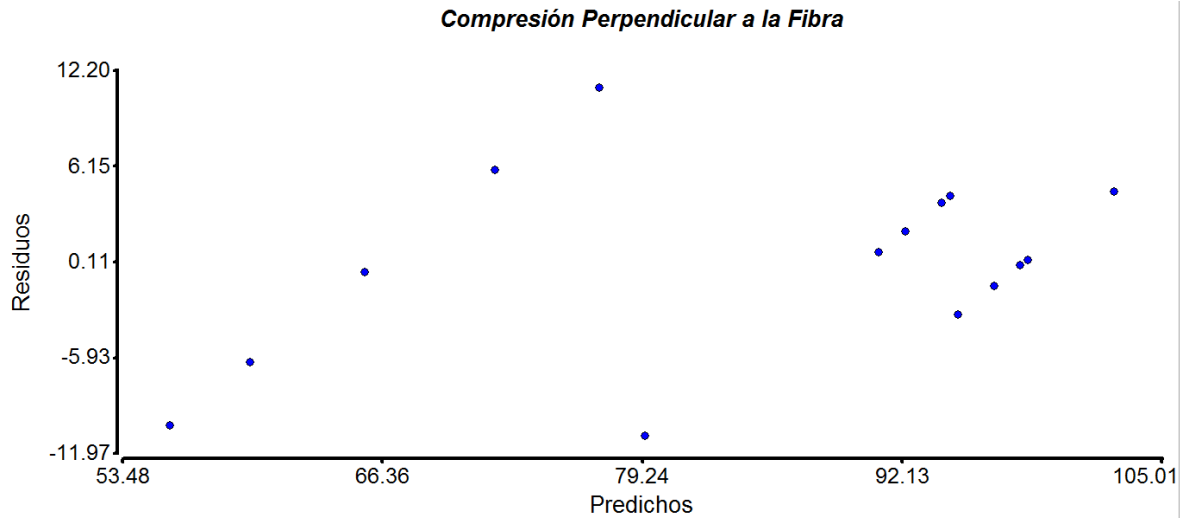
Prueba Bartlett	
Sp²	63782239.7
Q	0.47347293
C	1.11111111
Xo²	0.98019975 calculado
(2.3026)	
X²	5.99146 tabla



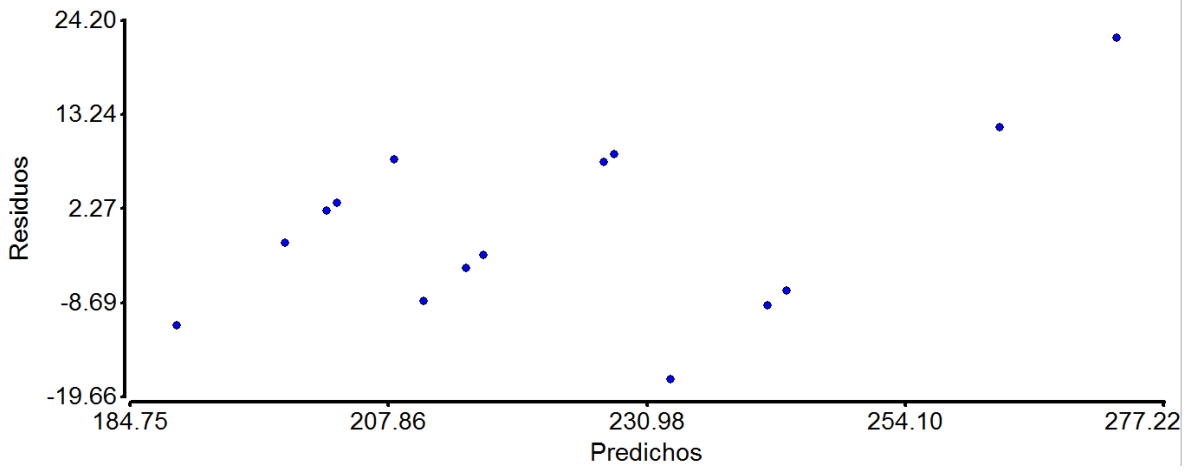




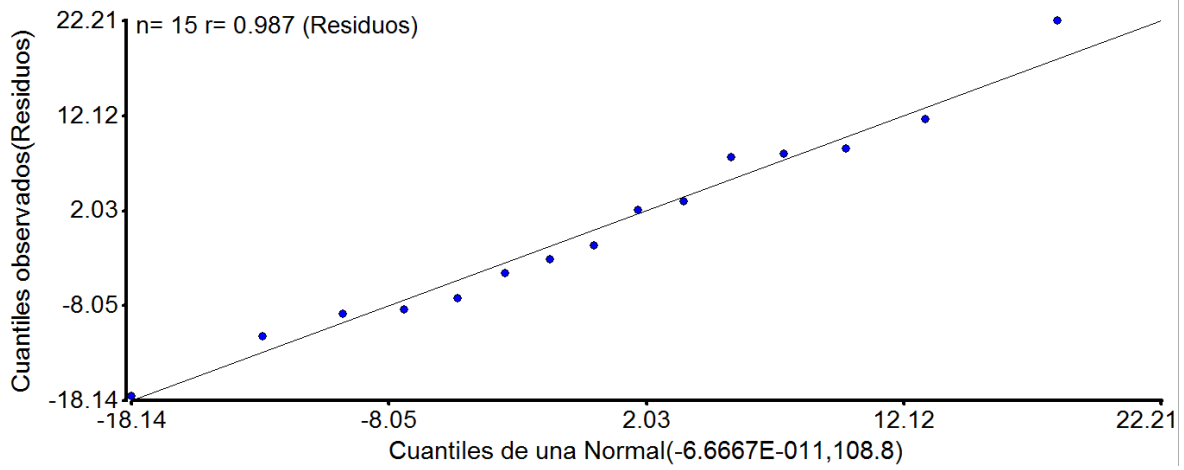


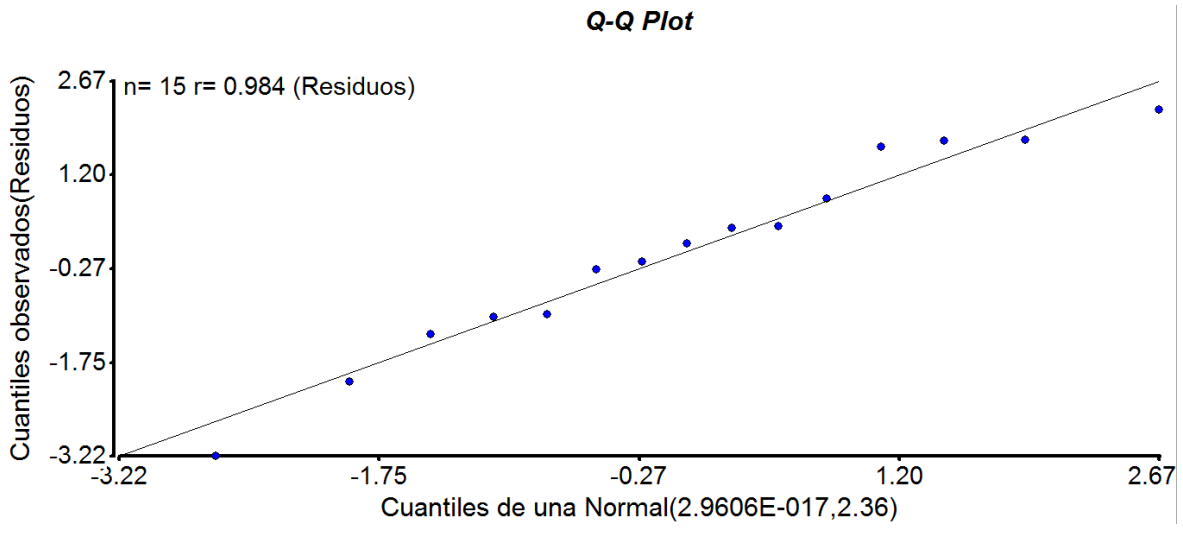
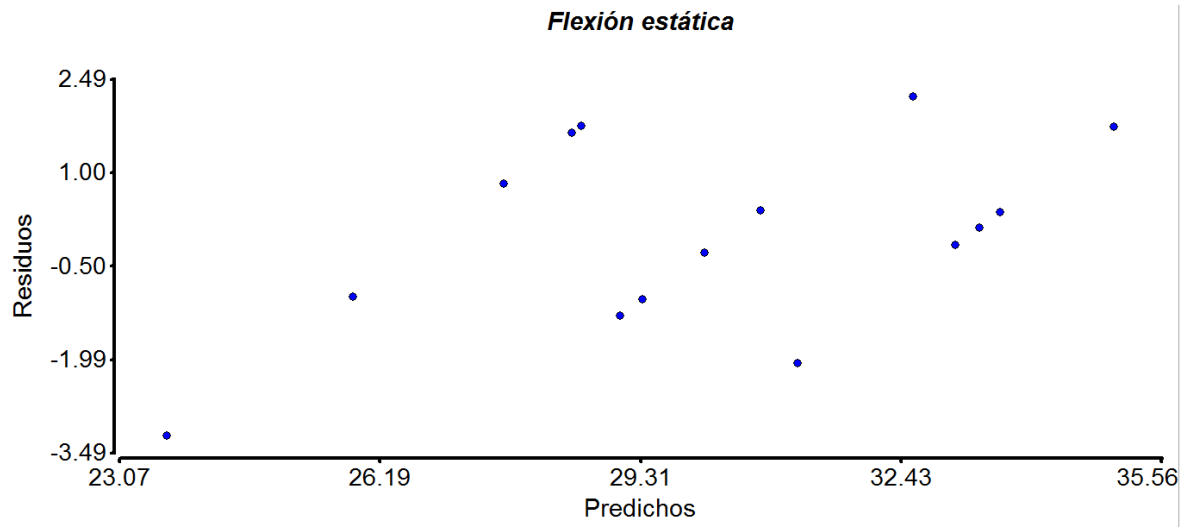


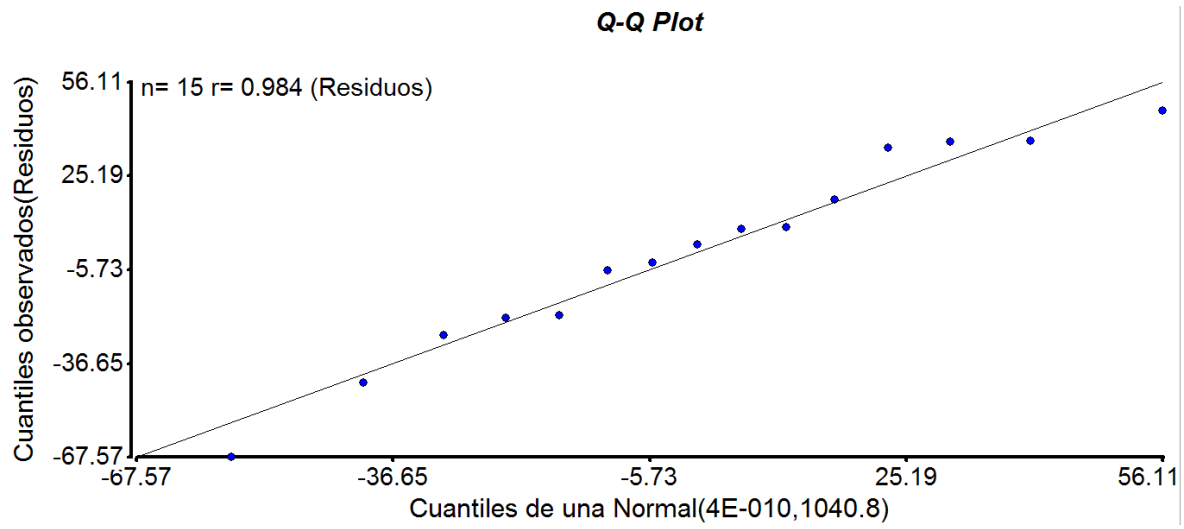
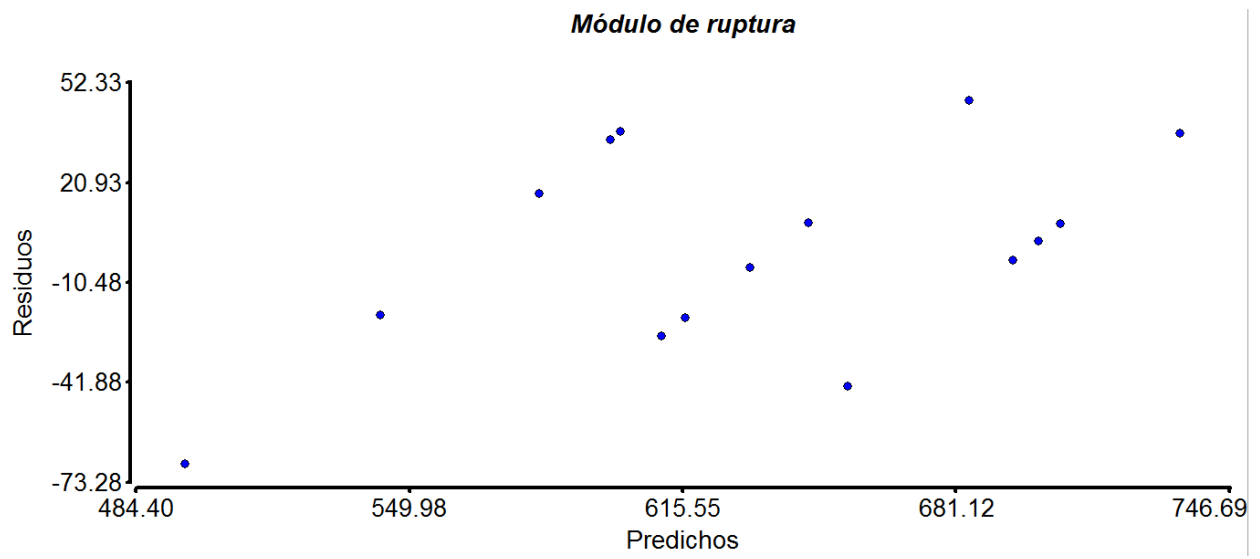
Compresión Paralela a la fibra



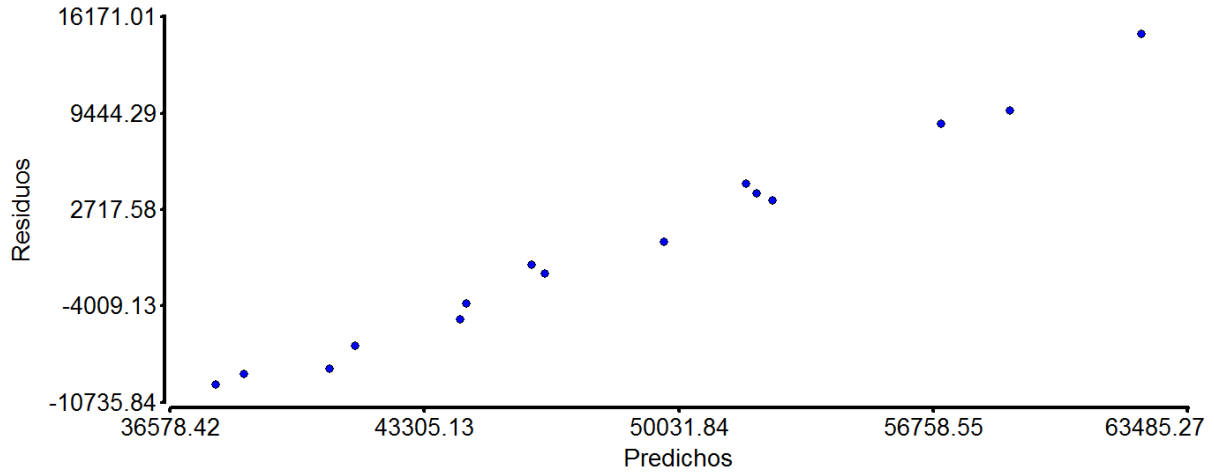
Q-Q Plot







Módulo de elasticidad



Q-Q Plot

