



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE LIGNINA SOBRE LAS
PROPIEDADES DEL CURVADO A VAPOR DE LA MADERA DE LAS ESPECIES TECA
(*Tectona grandis*) Y MELINA (*Gmelina arborea*) A EDADES DE 5 Y 15 AÑOS**

María Teresa Castillo Pérez

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, febrero de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN DE LA IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE LIGNINA SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CURVADO A VAPOR DE LA MADERA DE LAS ESPECIES TECA (*Tectona grandis*) Y MELINA (*Gmelina arborea*) A EDADES DE 5 Y 15 AÑOS

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARÍA TERESA CASTILLO PÉREZ

ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León Paz
EXAMINADOR	Ing. Victor Herbert de León
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE LA IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE LIGNINA SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CURVADO A VAPOR DE LA MADERA DE LAS ESPECIES TECA (*Tectona grandis*) Y MELINA (*Gmelina arborea*) A EDADES DE 5 Y 15 AÑOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha noviembre 2012.



María Teresa Castillo Pérez

Guatemala 04 de noviembre de 2013

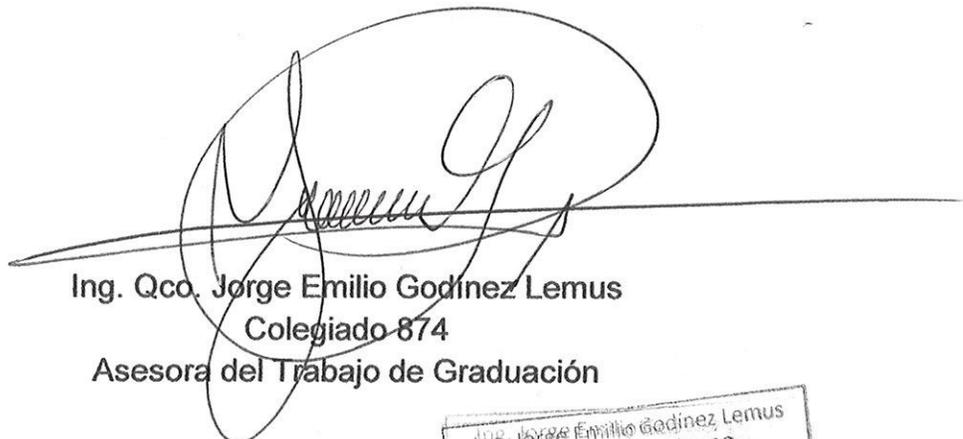
Ingeniero
Victor Manuel Monzón Valdez
Director Escuela de Ingeniería Química
Universidad De San Carlos De Guatemala

Estimado Ingeniero Monzón Valdez:

Por este medio me dirijo a usted para informarle que he revisado el informe final del trabajo de graduación titulado: "EVALUACIÓN DE LA IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE LIGNINA SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CURVADO A VAPOR DE LA MADERA DE LAS ESPECIES TECA (*Tectona Grandis*) y MELINA (*Gmelina Arbórea*), A EDADES de 5 y 15 AÑOS" desarrollado por la estudiante de Ingeniería Química María Teresa Castillo Pérez, carné No. 2000-10666

Por lo cual, después de haber realizado la revisión del respectivo informe y haberle hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Atentamente,



Ing. Qco. Jorge Emilio Godínez Lemus
Colegiado 874
Asesora del Trabajo de Graduación

Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
INGENIERO QUIMICO
Colegiado 874



Guatemala, 15 de noviembre de 2013
Ref. EI.Q.TG-IF.077.2013

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-089-2012-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **María Teresa Castillo Pérez.**

Identificada con número de carné: **2000-10666.**

Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA.**

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DE LA IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE LIGNINA SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CURVADO A VAPOR DE LA MADERA DE LAS ESPECIES TECA (*Tectona Grandis*) Y MELINA (*Gmelina Arbórea*), A EDADES DE 5 Y 15 AÑOS

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Emilio Godínez Lémus.**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Inga. Mercedes Esther Roquel Chávez
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Ref.EIQ.TG.009.2014

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **MARÍA TERESA CASTILLO PÉREZ** titulado: **"EVALUACIÓN DE LA IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE LIGNINA SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CURVADO A VAPOR DE LA MADERA DE LAS ESPECIES TECA (TECTONA GRANDIS) Y MELINA (GMELINA ARBOREA) A EDADES DE 5 Y 15 AÑOS"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.



Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, enero 2014

Cc: Archivo
VMMV/ale



Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 048.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE LIGNINA SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CURVADO A VAPOR DE LA MADERA DE LAS ESPECIES TECA (Tectona grandis) Y MELINA (Gmelina arborea) A EDADES DE 5 Y 15 AÑOS**, presentado por la estudiante universitaria **María Teresa Castillo Pérez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 4 de febrero de 2014

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la vida, guiarme, protegerme y derramar bendiciones a lo largo del camino de mi vida.
- Virgen María** Por ser mi guía y mi refugio en momentos difíciles, por protegerme y bendecirme.
- Mi esposo e hija** Douglas Silva y Sofía Isabella Silva Castillo, por brindarme su apoyo, comprensión y amor incondicional.
- Mis padres** Carlos Castillo y Nohemí Pérez de Castillo, por brindarme una vida llena de amor, por sus consejos y por ser un ejemplo de perseverancia y constancia.
- Mis hermanos** Carlos, Rosario y Karla Castillo Pérez, por su apoyo y compañía.

AGRADECIMIENTOS A:

Mi esposo e hija	Douglas Silva y Sofía Isabella Silva Castillo, por su apoyo, motivación, comprensión y por estar siempre ahí.
Mis padres	Carlos Castillo y Nohemí Pérez de Castillo, por sus enseñanzas, apoyo y motivación, a lo largo de mi vida.
Mis hermanos	Carlos, Rosario y Karla Castillo Pérez, por su apoyo y compañía.
Mis cuñadas y suegra	Karla, Wanda Silva Ortiz y Gloria Ortiz, por su apoyo en esta etapa final de mi carrera.
Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus	Por sus conocimientos y apoyo en esta etapa final de mi carrera.
Sección Tecnología de la Madera (CII)	Inga. Ericka Cano, Inga. Adela Marroquín, Ing. Freddy Contreras y Jesiel Enríquez, por compartir sus conocimientos y experiencias, por sus consejos y su apoyo para concluir esta etapa de mi vida.
Facultad de Ingeniería	Por ser la institución que permitió mi formación como profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
Hipótesis.....	XIV
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Investigaciones realizadas.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Estructura de la madera	3
2.1.1. Estructura macroscópica	3
2.1.2. Estructura microscópica	6
2.1.3. Dureza de la madera	7
2.1.3.1. Madera dura	8
2.1.3.2. Madera blanda.....	8
2.2. Composición química de la madera	9
2.2.1. Celulosa.....	10
2.2.2. Hemicelulosa	10
2.2.3. Lignina	12
2.3. Propiedades físicas de la madera	13
2.4. Propiedades mecánicas de la madera	15
2.4.1. Elasticidad - deformabilidad.....	15

2.4.2.	Flexibilidad	16
2.4.3.	Dureza.....	16
2.4.4.	Cortadura	17
2.4.5.	Hendibilidad.....	17
2.4.6.	Desgaste	17
2.4.7.	Resistencia al choque	18
2.4.8.	Resistencia a la tracción.....	18
2.4.8.1.	Factores que afectan la resistencia a la tracción	18
2.5.	Curvado de madera.....	19
2.6.	Generalidades de las especies	22
2.6.1.	Teca (<i>Tectona grandis</i>)	22
2.6.1.1.	Clasificación científica	23
2.6.1.2.	Características de la teca	23
2.6.2.	Melina (<i>Gmelina arborea</i>).....	25
2.6.2.1.	Clasificación científica	25
2.6.2.2.	Características de la melina	26
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	29
3.1.	Variables	29
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	29
3.3.	Recursos humanos disponibles	29
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	30
3.4.1.	Equipo	30
3.4.2.	Cristalería	35
3.4.3.	Reactivos.....	36
3.4.4.	Otros materiales	36
3.5.	Técnica cualitativa y cuantitativa	36
3.6.	Recolección de la información	37

3.6.1.	Recolectar la materia prima	37
3.6.2.	Caracterización química de la materia prima	38
3.6.3.	Curvado a vapor de las probetas	38
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	38
3.7.1.	Ordenamiento de la información	38
3.7.2.	Procesamiento de la información	39
3.7.3.	Programas a utilizar para análisis de datos	39
3.8.	Análisis estadístico	39
3.8.1.	Determinación del número de corridas	39
3.8.2.	Media aritmética	40
3.8.3.	Análisis de varianza (ANOVA)	41
4.	RESULTADOS	43
5.	INTERPRETACIÓN	45
	CONCLUSIONES	47
	RECOMENDACIONES	49
	BIBLIOGRAFÍA	51
	APÉNDICES	55
	ANEXOS	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Partes macroscópicas de la madera	5
2.	Estructura química de la celulosa	10
3.	Estructura generalizada de la lignina	12
4.	Cámara de vaporizado	20
5.	Cámara de vapor	30
6.	Molde de curvado.....	31
7.	Sierra circular	31
8.	Balanza analítica.....	32
9.	Balanza para determinación de humedad.....	32
10.	Plancha de agitación y calentamiento	33
11.	Horno utilizado para secar el serrín	33
12.	Colector de sedimentos para obtener el serrín	34
13.	Tamizadora	34
14.	Campana de extracción	35

TABLAS

I.	Tratamientos para la determinación del contenido de lignina	41
II.	Análisis de varianza	42
III.	Contenido de lignina y elongación por el radio de curvatura.....	43
IV.	Análisis de varianza del contenido de lignina respecto a la edad del árbol de cada especie	44

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
F	Fisher
g	Gramos
°C	Grados Celsius
mL	Mililitros
n	Número de repeticiones u observaciones
%	Porcentaje
SSA	Suma de cuadrados de tratamientos
SSE	Suma de cuadrados para el error
SST	Suma de cuadrados totales

GLOSARIO

ASTM	American Society for Testing and Materials.
Celulosa	Biopolímero compuesto de moléculas β -glucosa. Es responsable de la base estructural de las plantas.
Elongación	Alargamiento que sufre un cuerpo que se somete a esfuerzo de tracción.
Extracción	Separación de los componentes de cualquier sustancia por el contacto con un líquido.
Hemicelulosa	Polisacárido heterogéneo que forma una cadena lineal ramificada.
Latifondias	Árboles con un tronco con una ramificación desordenada, sus hojas son anchas y pueden ser perennes o caedizas.
Lignina	Polímero aromático que forma una matriz amorfa y es asociado con las propiedades de curvado de la madera.
Radio de curvatura	Magnitud que mide la curvatura de un objeto geométrico tal como una línea curva.

RESUMEN

El objetivo del proyecto de investigación fue evaluar la influencia que tiene el contenido de lignina sobre las propiedades del curvado de madera a vapor de dos especies arbóreas: teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*). El método más común para curvar la madera es el método por saturación con vapor, en este método las probetas de madera son introducidas en una cámara de vapor, a un tiempo y temperatura establecidas, para después sacarlas y moldearlas en la forma deseada, generalmente se utilizan moldes de hierro con bajo contenido de carbono con dobleces en ángulos de 180° (“U”) y 90° (“L”). Este método se considera de bajo impacto ambiental, ya que el agua condensada de la cámara de vapor no está contaminada.

Para la realización del proyecto se utilizaron las Norma de ensayo ASTM D115-56 “Standard Test Method for Preparation of Extractive-Free Wood”, la Norma de ensayo ASTM D1106-56 “Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood” y del proyecto FODECYT 25-2010 “Evaluación de la influencia del tiempo de vaporizado y tiempo de prensado en el proceso de curvado a vapor de madera sólida de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) obtenida en el primer raleo como alternativa tecnológica para el desarrollo agroindustrial”.

Se determinó que el porcentaje de contenido de lignina para la especie teca (*Tectona grandis*) en la edad de 5 años es de 23,6 % y en la edad de 15 años es de 26,2 %. Para la especie melina (*Gmelina arborea*) en la edad de 5 años es de 18,2 % y en la edad de 15 años es de 20,07 %.

Se observó que al momento de curvar a vapor las probetas de teca a edad de 15 años no curvaron debido a que las vetas de las probetas no están lo más rectas posibles para evitar el desprendimiento de las fibras al momento de aplicar la fuerza para curvar las probetas.

Por el análisis de varianza se demostró que la hipótesis planteada es rechazada, es decir, no sólo depende del porcentaje de lignina contenida en la madera para curvar, sino depende de otras propiedades físicas de la madera.

OBJETIVOS

General

Evaluar la importancia del contenido de lignina en la madera teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*), a edades de 5 y 15 años sobre las propiedades del curvado a vapor de la madera.

Específicos

1. Determinar el contenido de lignina en la madera teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) en la edad de 5 años.
2. Determinar el contenido de lignina en la madera teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) en la edad de 15 años.
3. Determinar si existe variación entre el contenido de lignina de la madera entre las edades 5 y 15 años.
4. Determinar si hay variación entre las edades de 5 y 15 años de la madera teca (*Tectona grandis*) y las propiedades del curvado de la madera a vapor.
5. Determinar si hay variación entre las edades de 5 y 15 años de la madera melina (*Gmelina arborea*) y las propiedades del curvado de la madera a vapor.

Hipótesis

- **Hipótesis científica:**

Las propiedades de curvado de madera de las especies teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) de árboles de edades de 5 y 15 años dependen del contenido de lignina en el tejido vegetal del mismo.

- **Hipótesis estadística:**

Hipótesis nula:

El contenido de lignina en el tejido vegetal de una especie de árbol influye directamente en la curvatura de las probetas de dicho árbol curvadas a vapor.

Hipótesis alternativa:

El contenido de lignina en el tejido vegetal de una especie de árbol no influye directamente en la curvatura de las probetas de dicho árbol curvadas a vapor.

INTRODUCCIÓN

La madera contiene gran variedad de compuestos orgánicos, pero siempre existen compuestos de mayor importancia por su abundancia en la misma. La madera se compone, en su mayor parte, de celulosa (40 %-50 %), hemicelulosa (20 %-25 %) y lignina (25 %-30 %), según literatura encontrada. La lignina es un polímero fenólico de gran estructura y peso molecular, constituye el segundo componente más abundante en la madera. El contenido varía de acuerdo a la especie debido a que existen especies que se puede curvar más fácil que otras.

En su estado natural la madera no puede curvarse, sin embargo cuando se le somete a calor en presencia de vapor se vuelve semiplástica, aumentando su ductilidad y presentando deformaciones sin sufrir roturas.

La información que se genere por medio de este documento, servirá para la apertura y estudio de especies de madera sólidas ideales para moldear, así como la información de parámetros establecidos para lograr un mejor curvado de la madera sólida que puede ayudar a empresas y talleres en fabricación de muebles de madera que quieran incursionar en esta técnica. En la actualidad en Guatemala país no se utiliza en forma comercial esta técnica, por desconocimiento de parámetros o bien por la falta de información detallada de la técnica de curvado de la madera a vapor.



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE LIGNINA SOBRE LAS
PROPIEDADES DEL CURVADO A VAPOR DE LA MADERA DE LAS ESPECIES TECA
(*Tectona grandis*) Y MELINA (*Gmelina arborea*) A EDADES DE 5 Y 15 AÑOS**

María Teresa Castillo Pérez

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, febrero de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN DE LA IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE LIGNINA SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CURVADO A VAPOR DE LA MADERA DE LAS ESPECIES TECA (*Tectona grandis*) Y MELINA (*Gmelina arborea*) A EDADES DE 5 Y 15 AÑOS

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARÍA TERESA CASTILLO PÉREZ

ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León Paz
EXAMINADOR	Ing. Victor Herbert de León
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE LA IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE LIGNINA SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CURVADO A VAPOR DE LA MADERA DE LAS ESPECIES TECA (*Tectona grandis*) Y MELINA (*Gmelina arborea*) A EDADES DE 5 Y 15 AÑOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha noviembre 2012.

María Teresa Castillo Pérez

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la vida, guiarme, protegerme y derramar bendiciones a lo largo del camino de mi vida.
- Virgen María** Por ser mi guía y mi refugio en momentos difíciles, por protegerme y bendecirme.
- Mi esposo e hija** Douglas Silva y Sofía Isabella Silva Castillo, por brindarme su apoyo, comprensión y amor incondicional.
- Mis padres** Carlos Castillo y Nohemí Pérez de Castillo, por brindarme una vida llena de amor, por sus consejos y por ser un ejemplo de perseverancia y constancia.
- Mis hermanos** Carlos, Rosario y Karla Castillo Pérez, por su apoyo y compañía.

AGRADECIMIENTOS A:

Mi esposo e hija	Douglas Silva y Sofía Isabella Silva Castillo, por su apoyo, motivación, comprensión y por estar siempre ahí.
Mis padres	Carlos Castillo y Nohemí Pérez de Castillo, por sus enseñanzas, apoyo y motivación, a lo largo de mi vida.
Mis hermanos	Carlos, Rosario y Karla Castillo Pérez, por su apoyo y compañía.
Mis cuñadas y suegra	Karla, Wanda Silva Ortiz y Gloria Ortiz, por su apoyo en esta etapa final de mi carrera.
Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus	Por sus conocimientos y apoyo en esta etapa final de mi carrera.
Sección Tecnología de la Madera (CII)	Inga. Ericka Cano, Inga. Adela Marroquín, Ing. Freddy Contreras y Jesiel Enríquez, por compartir sus conocimientos y experiencias, por sus consejos y su apoyo para concluir esta etapa de mi vida.
Facultad de Ingeniería	Por ser la institución que permitió mi formación como profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
Hipótesis.....	XIV
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Investigaciones realizadas.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Estructura de la madera	3
2.1.1. Estructura macroscópica	3
2.1.2. Estructura microscópica	6
2.1.3. Dureza de la madera	7
2.1.3.1. Madera dura	8
2.1.3.2. Madera blanda.....	8
2.2. Composición química de la madera	9
2.2.1. Celulosa.....	10
2.2.2. Hemicelulosa	10
2.2.3. Lignina	12
2.3. Propiedades físicas de la madera	13
2.4. Propiedades mecánicas de la madera	15
2.4.1. Elasticidad - deformabilidad.....	15

2.4.2.	Flexibilidad	16
2.4.3.	Dureza.....	16
2.4.4.	Cortadura	17
2.4.5.	Hendibilidad.....	17
2.4.6.	Desgaste	17
2.4.7.	Resistencia al choque	18
2.4.8.	Resistencia a la tracción.....	18
2.4.8.1.	Factores que afectan la resistencia a la tracción	18
2.5.	Curvado de madera.....	19
2.6.	Generalidades de las especies	22
2.6.1.	Teca (<i>Tectona grandis</i>)	22
2.6.1.1.	Clasificación científica	23
2.6.1.2.	Características de la teca	23
2.6.2.	Melina (<i>Gmelina arborea</i>).....	25
2.6.2.1.	Clasificación científica	25
2.6.2.2.	Características de la melina	26
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	29
3.1.	Variables	29
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	29
3.3.	Recursos humanos disponibles	29
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	30
3.4.1.	Equipo	30
3.4.2.	Cristalería	35
3.4.3.	Reactivos.....	36
3.4.4.	Otros materiales	36
3.5.	Técnica cualitativa y cuantitativa	36
3.6.	Recolección de la información	37

3.6.1.	Recolectar la materia prima	37
3.6.2.	Caracterización química de la materia prima	38
3.6.3.	Curvado a vapor de las probetas	38
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	38
3.7.1.	Ordenamiento de la información	38
3.7.2.	Procesamiento de la información	39
3.7.3.	Programas a utilizar para análisis de datos	39
3.8.	Análisis estadístico	39
3.8.1.	Determinación del número de corridas	39
3.8.2.	Media aritmética	40
3.8.3.	Análisis de varianza (ANOVA)	41
4.	RESULTADOS	43
5.	INTERPRETACIÓN	45
	CONCLUSIONES	47
	RECOMENDACIONES	49
	BIBLIOGRAFÍA	51
	APÉNDICES	55
	ANEXOS	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Partes macroscópicas de la madera	5
2.	Estructura química de la celulosa	10
3.	Estructura generalizada de la lignina	12
4.	Cámara de vaporizado	20
5.	Cámara de vapor	30
6.	Molde de curvado.....	31
7.	Sierra circular	31
8.	Balanza analítica.....	32
9.	Balanza para determinación de humedad.....	32
10.	Plancha de agitación y calentamiento	33
11.	Horno utilizado para secar el serrín	33
12.	Colector de sedimentos para obtener el serrín	34
13.	Tamizadora	34
14.	Campana de extracción	35

TABLAS

I.	Tratamientos para la determinación del contenido de lignina	41
II.	Análisis de varianza	42
III.	Contenido de lignina y elongación por el radio de curvatura.....	43
IV.	Análisis de varianza del contenido de lignina respecto a la edad del árbol de cada especie	44

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
F	Fisher
g	Gramos
°C	Grados Celsius
mL	Mililitros
n	Número de repeticiones u observaciones
%	Porcentaje
SSA	Suma de cuadrados de tratamientos
SSE	Suma de cuadrados para el error
SST	Suma de cuadrados totales

GLOSARIO

ASTM	American Society for Testing and Materials.
Celulosa	Biopolímero compuesto de moléculas β -glucosa. Es responsable de la base estructural de las plantas.
Elongación	Alargamiento que sufre un cuerpo que se somete a esfuerzo de tracción.
Extracción	Separación de los componentes de cualquier sustancia por el contacto con un líquido.
Hemicelulosa	Polisacárido heterogéneo que forma una cadena lineal ramificada.
Latifondias	Árboles con un tronco con una ramificación desordenada, sus hojas son anchas y pueden ser perennes o caedizas.
Lignina	Polímero aromático que forma una matriz amorfa y es asociado con las propiedades de curvado de la madera.
Radio de curvatura	Magnitud que mide la curvatura de un objeto geométrico tal como una línea curva.

RESUMEN

El objetivo del proyecto de investigación fue evaluar la influencia que tiene el contenido de lignina sobre las propiedades del curvado de madera a vapor de dos especies arbóreas: teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*). El método más común para curvar la madera es el método por saturación con vapor, en este método las probetas de madera son introducidas en una cámara de vapor, a un tiempo y temperatura establecidas, para después sacarlas y moldearlas en la forma deseada, generalmente se utilizan moldes de hierro con bajo contenido de carbono con dobleces en ángulos de 180° (“U”) y 90° (“L”). Este método se considera de bajo impacto ambiental, ya que el agua condensada de la cámara de vapor no está contaminada.

Para la realización del proyecto se utilizaron las Norma de ensayo ASTM D115-56 “Standard Test Method for Preparation of Extractive-Free Wood”, la Norma de ensayo ASTM D1106-56 “Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood” y del proyecto FODECYT 25-2010 “Evaluación de la influencia del tiempo de vaporizado y tiempo de prensado en el proceso de curvado a vapor de madera sólida de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) obtenida en el primer raleo como alternativa tecnológica para el desarrollo agroindustrial”.

Se determinó que el porcentaje de contenido de lignina para la especie teca (*Tectona grandis*) en la edad de 5 años es de 23,6 % y en la edad de 15 años es de 26,2 %. Para la especie melina (*Gmelina arborea*) en la edad de 5 años es de 18,2 % y en la edad de 15 años es de 20,07 %.

Se observó que al momento de curvar a vapor las probetas de teca a edad de 15 años no curvaron debido a que las vetas de las probetas no están lo más rectas posibles para evitar el desprendimiento de las fibras al momento de aplicar la fuerza para curvar las probetas.

Por el análisis de varianza se demostró que la hipótesis planteada es rechazada, es decir, no sólo depende del porcentaje de lignina contenida en la madera para curvar, sino depende de otras propiedades físicas de la madera.

OBJETIVOS

General

Evaluar la importancia del contenido de lignina en la madera teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*), a edades de 5 y 15 años sobre las propiedades del curvado a vapor de la madera.

Específicos

1. Determinar el contenido de lignina en la madera teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) en la edad de 5 años.
2. Determinar el contenido de lignina en la madera teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) en la edad de 15 años.
3. Determinar si existe variación entre el contenido de lignina de la madera entre las edades 5 y 15 años.
4. Determinar si hay variación entre las edades de 5 y 15 años de la madera teca (*Tectona grandis*) y las propiedades del curvado de la madera a vapor.
5. Determinar si hay variación entre las edades de 5 y 15 años de la madera melina (*Gmelina arborea*) y las propiedades del curvado de la madera a vapor.

Hipótesis

- **Hipótesis científica:**

Las propiedades de curvado de madera de las especies teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) de árboles de edades de 5 y 15 años dependen del contenido de lignina en el tejido vegetal del mismo.

- **Hipótesis estadística:**

Hipótesis nula:

El contenido de lignina en el tejido vegetal de una especie de árbol influye directamente en la curvatura de las probetas de dicho árbol curvadas a vapor.

Hipótesis alternativa:

El contenido de lignina en el tejido vegetal de una especie de árbol no influye directamente en la curvatura de las probetas de dicho árbol curvadas a vapor.

INTRODUCCIÓN

La madera contiene gran variedad de compuestos orgánicos, pero siempre existen compuestos de mayor importancia por su abundancia en la misma. La madera se compone, en su mayor parte, de celulosa (40 %-50 %), hemicelulosa (20 %-25 %) y lignina (25 %-30 %), según literatura encontrada. La lignina es un polímero fenólico de gran estructura y peso molecular, constituye el segundo componente más abundante en la madera. El contenido varía de acuerdo a la especie debido a que existen especies que se puede curvar más fácil que otras.

En su estado natural la madera no puede curvarse, sin embargo cuando se le somete a calor en presencia de vapor se vuelve semiplástica, aumentando su ductilidad y presentando deformaciones sin sufrir roturas.

La información que se genere por medio de este documento, servirá para la apertura y estudio de especies de madera sólidas ideales para moldear, así como la información de parámetros establecidos para lograr un mejor curvado de la madera sólida que puede ayudar a empresas y talleres en fabricación de muebles de madera que quieran incursionar en esta técnica. En la actualidad en Guatemala país no se utiliza en forma comercial esta técnica, por desconocimiento de parámetros o bien por la falta de información detallada de la técnica de curvado de la madera a vapor.

1. ANTECEDENTES

1.1. Investigaciones realizadas

Francisco Paz, ha presentado un estudio sobre *Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer raleo en árboles de melina (Gmelina arborea roxb.), de una plantación proveniente del departamento de Izabal* en octubre de 2008.

En dicho estudio se caracterizó químicamente la madera de la especie melina (*Gmelina arborea roxb.*). Se determinó el porcentaje de celulosa, lignina, extraíbles, taninos y cenizas. El muestreo realizado fue de nueve árboles a tres distintas alturas; el resultado de dichas caracterizaciones se concluyó en que no se tiene diferencia significativa respecto a la altura del árbol, lo cual significa que se puede tomar cualquier parte del mismo y su composición química será la misma. Se utilizaron las normas ANSI/ASTM¹ para cada ensayo respectivamente.

Manolo Muralles presentó un estudio sobre la *Caracterización química de la madera de la especie teca (Tectona grandis L.F.)* en el 2008.

En dicho estudio se caracterizó químicamente la madera del primer raleo de la especie teca (*Tectona grandis L.F.*), a nivel de laboratorio, proveniente de la plantación del municipio de Patulul, Suchitepéquez. Se determinó el porcentaje de celulosa, lignina, extraíbles, taninos y cenizas. El muestreo realizado fue de nueve árboles a tres distintas alturas; el resultado de dichas caracterizaciones se concluyó en que no se tiene diferencia significativa

¹ ASTM: por sus siglas en inglés "American Society for Testing and Materials"

respecto a la altura del árbol, lo cual significa que se puede tomar cualquier parte del mismo y su composición química será la misma. Se utilizaron las normas ANSI/ASTM para cada ensayo respectivamente.

Cristian Araya realizó un estudio sobre la *Determinación de características de curvado de madera sólida para las especies Nothofagus Pumilio (Lenga) y Laurelia Philipiana (Tepa)* en el 2005.

En dicho estudio se investigó la forma de curvar madera sólida en forma industrial y aprovechando la infraestructura actual (maquinarias y procesos productivos de la madera laminada), en maderas de Tepa y Lenga, con espesores de 15 y 20 mm. Ambas especies y espesores fueron sometidas a un vaporizado, y posterior curvado en la prensa hidráulica, secado con el generador de alta frecuencia, luego se tomaron los pesos correspondientes para observar los cambios de contenido de humedad. Las probetas fueron sumergidas en agua a 80 °C por 10 minutos en los cuales se logró un aumento del contenido de humedad, e inmediatamente después se vaporizaron para lograr un contenido de humedad de 30- 35 %, óptimo para el curvado.

2. MARCO TEÓRICO

La madera se puede definir como el conjunto de tejidos orgánicos que forman la masa de los troncos de los árboles, desprovistos de corteza y hojas. Se ha utilizado durante miles de años como combustible, como materia prima para la fabricación de papel, mobiliario, construcción de viviendas y una gran variedad de utensilios para diversos usos. Las propiedades de la madera dependen de muchos factores tales como: especie y edad del árbol, condiciones de crecimiento como el terreno, el clima, etc.

La estructura de la madera viene dada por los elementos anatómicos que la forman: células, vasos leñosos, fibras, canales de resina, etc. Así, la composición celular, el grosor, la simetría, etc., de estos elementos determinan las características de la madera, y junto a las otras propiedades físicas y mecánicas, sus posibles usos.

2.1. Estructura de la madera

La madera es una sustancia fibrosa, organizada, esencialmente heterogénea, producida por un organismo vivo llamado árbol. Sus propiedades y posibilidades de empleo es la consecuencia de los caracteres, organización y composición química de las células que la constituyen.

2.1.1. Estructura macroscópica

El tronco del árbol está estructurado en capas superpuestas. Esta organización se debe a la capa generatriz, llamada cambium, que se ubica

entre la madera y la corteza. Esta capa produce madera hacia el interior y corteza hacia el exterior. Este fenómeno es similar en toda la superficie, produciéndose en cada período vegetativo una nueva capa de madera que cubre la anterior. En cada capa se distinguen dos zonas muy marcadas, la que se forma al principio con células de paredes delgadas y grandes lúmenes que se denomina madera de primavera y se caracteriza porque los tejidos son más porosos, y la otra de células gruesas y lúmenes pequeños que se denomina madera de verano y se caracteriza por tejidos más densos.

Esta diferencia entre las dos zonas, hace fácilmente distinguible en la sección transversal. Una serie de anillos de crecimiento, cada uno de los cuales corresponde a un período vegetativo de la vida del árbol, representando el crecimiento anual, por lo que su número indica la edad del árbol. Los anillos también identifican si la madera es dura o blanda, ya que la madera dura tiene los anillos más cercanos que los de la madera blanda.

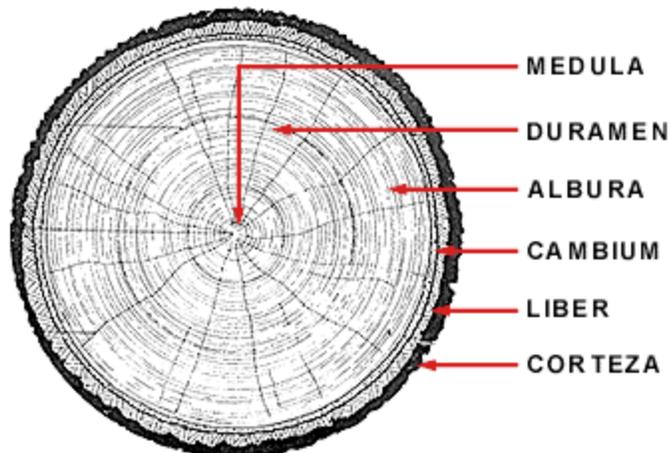
Los anillos indican algunos períodos climáticos, si están muy juntos indican un período de sequía, en la cual el xilema no ha podido crecer demasiado y si por lo contrario ha llovido, los anillos estarán más separados. Los "anillos" de la madera se producen por el "cambium" y el "felógeno" que forman el/la "felodermis" y el "corcho".

En el corte se distingue en una zona exterior más clara llamada albura, que es la zona de madera más reciente, se considera la zona viva del árbol y está en condiciones óptimas para sufrir alteraciones. Por esta zona circula la savia.

La zona oscura, llamada duramen, es más duradera y resistente a los ataques biológicos. Es la madera de mayor resistencia y durabilidad. Las capas internas de la albura se van convirtiendo en duramen.

La zona central, llamada médula, es un tejido flojo y esponjoso. Tiene un diámetro muy pequeño. La diferente relación entre el desarrollo de estas capas tienen que ver con la resistencia mecánica. La médula se suele desechar en los procesos de elaboración de la madera.

Figura 1. **Partes macroscópicas de la madera**



Fuente: www.monografias.com/trabajos48/maderas.shtml. Consulta: septiembre 2012.

El cambium es la capa existente entre la albura y la corteza, constituye la base del crecimiento en especial del tronco, generando dos tipos de células: hacia el interior: madera (albura) y hacia el exterior: líber. La capa exterior de protección del tronco, es la corteza. Está constituida por células muertas. Su cara interior, formada por tejido vivo, contra el cambium, es el líber. El líber es la

parte interna de la corteza. Es filamentosa y poco resistente. También son distinguibles los radios medulares, que son los que aseguran la solidaridad entre los componentes de los tejidos, otorgando flexibilidad. Son componentes más débiles y la madera se rompe por ellos.

2.1.2. Estructura microscópica

Si se analiza la madera a nivel microscópico se puede determinar que, al igual que cualquier ser vivo, está constituido por células en general alargadas dispuestas en su mayoría en dirección del eje del árbol, y sin contenido protoplasmático. Sólo un pequeño porcentaje de células tienen formas más o menos rectangulares y están orientadas transversalmente al eje del árbol en una dirección radial y tienen contenido protoplasmático.

Las células en la madera están unidas entre sí por una sustancia llamada materia intercelular o laminilla media, y a su vez trabadas por otro tipo de células colocadas perpendicularmente a las anteriores y en el sentido radial del tronco, formando los llamados radios leñosos.

Los radios leñosos son bandas o láminas delgadas de un tejido, cuyas células se desarrollan en dirección radial, o sea, perpendicular a los anillos de crecimiento. Almacenan y difunden las materias nutritivas que aporta la savia descendente (igual que las células de parénquima). Contribuyen a que la deformación de la madera sea menor en dirección radial que en la tangencial. Son más blandos que el resto de la masa leñosa.

Las paredes de los tubos están formadas por una serie de capas compuestas por microfibrillas de celulosa enrolladas helicoidalmente alrededor

del eje con inclinación diferente en cada capa, y todas ellas, contenidas en un material amorfo, prácticamente insoluble, que es la lignina.

En el sentido axial se distingue:

- Fibras alargadas, de pared gruesa formadas por células que se han prolongado afinándose en las puntas, constituyendo los tejidos de sostén, es decir, la estructura y la parte resistente de la madera (tejido fibroso). En las coníferas estas células son las mismas que sirven para permitir la circulación de los fluidos.
- Vasos y poros de pared delgada (tejido vascular), formando los órganos de conducción o vehículo de la savia ascendente o bruta; los poros de la madera aparecen en sección transversal (pequeños agujeros), y en sección longitudinal (pequeñas estrías).

Células de parénquima, son cortas y poco abundantes. Difunden y almacenan en todo el espesor del árbol la savia descendente o elaborada. El parénquima constituye una especie de tejido conjuntivo (tegumental o de defensa), que vincula entre sí a los otros tejidos y que está formado por células poliédricas de paredes celulósicas delgadas y esponjosas.

2.1.3. Dureza de la madera

Según su dureza, la madera se clasifica en madera blanda y madera dura.

2.1.3.1. Madera dura

Son aquellas que proceden de árboles de un crecimiento lento, por lo que son más densas y soportan mejor las inclemencias del tiempo. Estas maderas proceden de árboles de hoja caduca, que tardan décadas, e incluso siglos, en alcanzar el grado de madurez suficiente para ser cortadas y poder ser empleadas en la elaboración de muebles o vigas de los caseríos o viviendas unifamiliares. Son más caras que las blandas, debido a que su lento crecimiento provoca su escasez, pero son más atractivas para construir muebles con ellas. También son muy empleadas para realizar tallas de madera.

2.1.3.2. Madera blanda

El término madera blanda es una denominación genérica que sirve para englobar a la madera de los árboles pertenecientes a la orden de las coníferas. La gran ventaja que tienen respecto a las maderas duras, procedentes de especies de hoja caduca con un período de crecimiento más largo, es su ligereza y su precio, menor.

Este tipo de madera no tiene una vida tan larga como las duras, pero puede ser empleada para trabajos específicos. Por ejemplo, la madera de cedro rojo tiene repelentes naturales contra plagas de insectos y hongos, de modo que es casi inmune a la putrefacción y a la descomposición, por lo que es muy utilizada en exteriores. La manipulación de las maderas blandas es mucho más sencilla, aunque tiene la desventaja de producir mayor cantidad de astillas. Además, la carencia de veteado de esta madera le resta atractivo, por lo que casi siempre es necesario pintarla, barnizarla o teñirla.

2.2. Composición química de la madera

La madera está compuesta de forma general por tres grupos de sustancias, las que conforman la pared celular, donde se encuentran las principales macromoléculas, celulosa, hemicelulosa (poliosas) y ligninas, que están presente en todas las maderas; el otro grupo lo conforman las sustancias de baja masa molar conocidas también como sustancias extraíbles que se encuentran en menor cantidad, y las sustancias minerales.

En composición media la madera se compone de un 50 % de carbono (C), un 42 % de oxígeno (O), un 6 % de hidrógeno (H) y el 2 % de nitrógeno (N) y otros elementos. Todo esto se compone de la siguiente manera:

- Celulosa: 40-50 %
- Lignina: 25-30 %
- Hemicelulosa (poliosas): 20-25 % (hidratos de carbono)
- Resina, tanino, grasas: el porcentaje restante

Los parámetros climáticos influyen en la composición química, así, se presentan diferencias entre maderas que provienen de zonas templadas con las que provienen de zonas tropicales.

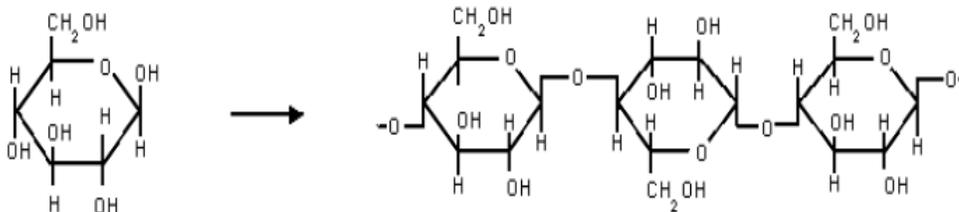
Entre los compuestos orgánicos extraíbles se pueden encontrar hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, fenoles, aldehídos, cetonas, ácidos alifáticos, ceras, glicéridos y compuestos nitrogenados.

2.2.1. Celulosa

Es un homopolisacárido (es decir, compuesto de un único tipo de monómero) rígido, insoluble, que contiene desde varios cientos hasta varios miles de unidades de glucosa. La celulosa corresponde a la biomolécula más abundante de la biomasa terrestre y los seres vivos.

La celulosa es un polisacárido estructural en las plantas, ya que forma parte de los tejidos de sostén. La chepa de una célula vegetal joven contiene aproximadamente un 40 % de celulosa; la madera un 50 %, mientras que el algodón con un porcentaje mayor al 90 %.

Figura 2. Estructura química de la celulosa



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Celulosa>. Consulta: septiembre 2012.

2.2.2. Hemicelulosa

Las poliosas o hemicelulosas son heteropolisacáridos de alta masa molar, que se encuentran constituidos por diferentes unidades de monosacáridos: pentosas, hexosas y ácidos urónicos, enlazados entre sí por enlaces glicosídicos, formando estructuras ramificadas y en general amorfas. Pueden ser clasificadas como pentosanos y hexosanos, aunque también se

clasifican en dependencia de su origen, su composición estructural y solubilidad en álcalis.

Las hemicelulosas se encuentran asociadas con la celulosa mediante fuertes interacciones polisacárido – polisacárido. El contenido de poliosas varía radialmente en la madera aumentando hacia el centro y variado en su composición de azúcares. El tipo y contenido de hemicelulosas presentes en la madera varía con la especie, la edad, parte del árbol, y en muchas especies su regularidad está relacionada con criterios taxonómicos.

Las hemicelulosas de las coníferas no son las mismas que las de las latifolias, siendo las de las coníferas más complejas. Diferencias existen también entre las hemicelulosas del tronco, de las ramas, de las raíces y de la corteza del propio árbol, así como diferencias en cuanto a contenido y composición entre la madera de compresión, tensión y normal.

La función de las hemicelulosas en la madera parece ser de intermediario entre la celulosa y la lignina, facilitando la incrustación de las microfibrillas. Probablemente no exista enlace químico alguno entre las hemicelulosas y la celulosa, más que suficiente adhesión mutua que es fortalecida por los puentes de hidrógeno y las fuerzas de Van der Waals.

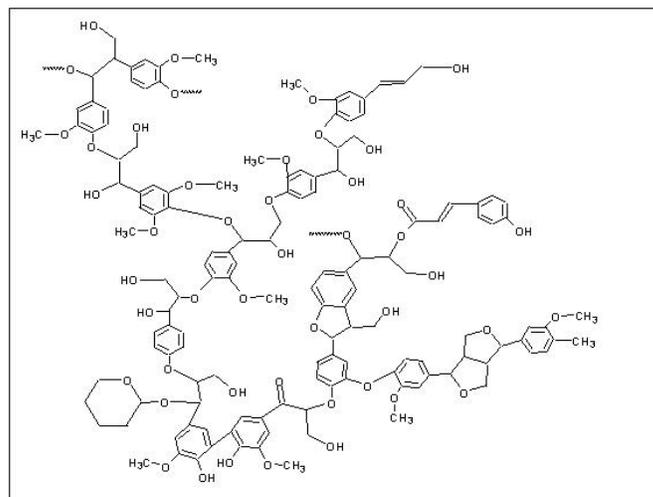
Son importantes en la fabricación de pulpa, ya que aumenta su rendimiento y aumentan la resistencia del papel. Algunas, como los arabinogalactanos después de separados pueden constituir un subproducto de la fabricación de celulosa, y ser utilizadas como tensoactivo en la industria de tintas.

2.2.3. Lignina

Es un grupo de compuestos químicos usados en las paredes celulares de las plantas para crear madera. La palabra lignina proviene del término latino *lignum*, que significa madera; así, a las plantas que contienen gran cantidad de lignina se las denomina leñosas.

La lignina está formada por la extracción irreversible del agua de los azúcares, creando compuestos aromáticos. Los polímeros de lignina son estructuras transconectadas con un peso molecular de 10.000 uma. La molécula de lignina es una molécula, con un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico). El acoplamiento aleatorizado de estos radicales da origen a una estructura tridimensional, polímero amorfo, característico de la lignina.

Figura 3. Estructura generalizada de lignina



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Lignina>. Consulta: septiembre 2012.

La lignina es un componente en la madera que realiza múltiples funciones los cuales son esenciales para la vida de las plantas. Por ejemplo, posee un importante papel en el transporte interno de agua, nutrientes y metabolitos.

Proporciona rigidez a la pared celular y actúa como puente de unión entre las células de la madera, creando un material que es notablemente resistente a los impactos, compresiones y flexiones. Realmente, los tejidos lignificados resisten el ataque de los microorganismos, impidiendo la penetración de las enzimas destructivas en la pared celular.

Sólo existen dos tipos de lignina comercialmente disponibles: las ligninas sulfonadas y las kraft ligninas. La capacidad de elaboración de productos de lignina en el mundo oriental es aproximadamente de 1,4 - 106 toneladas/año. Sólo una compañía produce kraft ligninas; las restantes producen ligninas sulfonadas. Los productos de lignina han empezado a tener una importancia creciente en distintas aplicaciones industriales.

2.3. Propiedades físicas de la madera

Las propiedades físicas de la madera dependen del crecimiento, edad, contenido de humedad, clases de terreno y distintas partes del tronco. Estas propiedades determinan el comportamiento frente a los distintos factores que intervienen en el medio natural, sin producir ninguna modificación mecánica o química. Entre las propiedades de la madera está la resistencia, dureza, rigidez y densidad. La humedad es la propiedad más importante, pues influye sobre todas las demás propiedades físicas y mecánicas.

La humedad de madera es la parte de agua en las células de la madera en relación a la masa seca de la madera. La humedad de la madera se señala en porcentaje(%). Es una magnitud de estado decisiva de la madera para sus cualidades tecnológicas y mecánicas.

La madera tiene la característica que cuando está seca absorbe humedad del aire que la rodea, y cuando está mojada, cede la humedad. Por eso, si la madera tiene el tiempo suficiente adquiere el nivel de humedad correspondiente al aire que la rodea, es decir la humedad de equilibrio.

La madera es un material higroscópico, es decir, intercambia humedad con el ambiente en función del contenido de humedad y la temperatura de ambos. En condiciones estables de temperatura y humedad relativa del aire, la madera cederá o absorberá humedad hasta alcanzar un equilibrio en el cual su contenido de humedad no variará. El valor del contenido de humedad de la madera en ese momento se llama Humedad de Equilibrio Higroscópico (HEH). Hay una cierta inercia en el intercambio de humedad con el ambiente y es un proceso lento, pero en maderas de baja densidad suele ser más rápido que en maderas de densidad mayores.

El agua en la madera se encuentra en tres formas:

- Agua libre: se encuentra en las cavidades celulares. Es la primera en eliminarse en el proceso de secado. Su eliminación no provoca contracciones, pero puede provocar colapso celular (aplastamiento de las paredes). Una vez que se elimina el agua libre de la madera, no es posible recuperarla salvo por inmersión o mojado directo. Para fines prácticos se considera la presencia de agua libre en contenidos de humedad mayores a 30 %.

- Agua de imbibición: es el agua que está embebida en las paredes celulares, entre las fibras de celulosa. Su eliminación implica la contracción de las paredes celulares, y por ende de la madera.
- Agua de constitución: agua que está formando parte de la materia celular. No puede ser eliminada por los métodos tradicionales de secado. Su eliminación implica la destrucción parcial de la madera como material. No es tenida en cuenta para el proceso de secado.

2.4. Propiedades mecánicas de la madera

Dentro de las propiedades mecánicas de la madera se encuentran: la elasticidad, deformabilidad, flexibilidad, dureza, cortadura, hendibilidad, desgaste, resistencia al choque y resistencia a la tracción.

2.4.1. Elasticidad – deformabilidad

Bajo cargas pequeñas, la madera se deforma de acuerdo con la ley de Hooke, o sea, que las deformaciones son proporcionales a las tensiones. Cuando se sobrepasa el límite de proporcionalidad la madera se comporta como un cuerpo plástico y se produce una deformación permanente. Al seguir aumentando la carga, se produce la rotura. Este módulo dependerá de la clase de madera, del contenido de humedad, del tipo y naturaleza de las acciones, de la dirección de aplicación de los esfuerzos y de la duración de los mismos. El valor del módulo de elasticidad E en el sentido transversal a las fibras será de 4 000 a 5 000 Kg / cm². El valor del módulo de elasticidad E en el sentido de las fibras será de 80 000 a 180 000 Kg / cm².

2.4.2. 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 ésta una propiedad que la hace útil para la curvatura (muebles, ruedas, cerchas, instrumentos musicales, etc.).

La madera verde, joven, húmeda o calentada, es más flexible que la seca o vieja y tiene mayor límite de deformación. La flexibilidad se facilita calentando la cara interna de la pieza (produciéndose contracción de las fibras interiores) y, humedeciendo con agua la cara externa (produciéndose un alargamiento de las fibras exteriores) La operación debe realizarse lentamente.

2.4.3. Dureza

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

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

2.4.4. Cortadura

Es la resistencia ofrecida frente a la acción de una fuerza que tiende a desgajar o cortar la madera en dos partes cuando la dirección del esfuerzo es perpendicular a la dirección de las fibras. Si la fuerza es máxima en sentido perpendicular a las fibras será cortadura y si es mínima en sentido paralelo a las mismas será desgarramiento o hendibilidad.

2.4.5. Hendibilidad

Es la resistencia ofrecida frente a la acción de una fuerza que tiende a desgajar o cortar la madera en dos partes cuando la dirección de los esfuerzos es paralela a la dirección de las fibras. La madera tiene cierta facilidad para hendirse o separarse en el sentido de las fibras. Una cuña, penetra fácilmente en la madera, al vencer por presión la fuerza de cohesión de las fibras (no las corta). Es fácil observar esta propiedad al cortar madera para hacer leña, en la dirección de las fibras se separa en dos fácilmente.

La madera verde es más hendible que la seca. Cuando se van a realizar uniones de piezas de madera por medio de tornillos o clavos, interesa que la madera que se va a utilizar tenga una gran resistencia a la hienda.

2.4.6. Desgaste

Las maderas sometidas a un rozamiento o a una erosión, experimentan una pérdida de materia (desgaste). La resistencia al desgaste es importante en las secciones perpendiculares a la dirección de las fibras, menor en las tangenciales y muy pequeña en las radiales.

2.4.7. Resistencia al choque

Indica el comportamiento de la madera al ser sometida a un impacto. La resistencia es mayor, en el sentido axial de las fibras y menor en el transversal, o radial.

En la resistencia al choque influyen: el tipo de madera, el tamaño de la pieza, la dirección del impacto con relación a la dirección de las fibras, la densidad y la humedad de la madera, entre otros.

2.4.8. Resistencia a la tracción

La madera es un material muy indicado para trabajar a tracción (en la dirección de las fibras), viéndose limitado su uso únicamente por la dificultad de transmitir estos esfuerzos a las piezas. Esto significa que en las piezas sometidas a tracción los problemas aparecerán en las uniones.

Si se realiza un esfuerzo de tracción en la dirección axial, la magnitud de la deformación producida será menor que si el esfuerzo es de compresión, sobre todo en lo que concierne a las deformaciones plásticas. Es decir que la rotura de la madera por tracción se puede considerar como una rotura frágil.

2.4.8.1. Factores que afectan a la resistencia a la tracción

- **Humedad:** la resistencia a la tracción paralela a la fibra aumenta de forma más o menos lineal desde el punto de saturación de las fibras hasta el 10 %, con un aumento del 3 % por cada disminución de humedad del 1 %.

Entre el 8 y el 10 % de humedad existe un máximo, a partir del cual disminuye ligeramente.

- Temperatura: el efecto de la temperatura es menor en la tracción paralela, que en otros tipos de esfuerzos.
- Nudos: los nudos afectan enormemente frente a este esfuerzo, ya que la desviación de fibras alrededor del nudo tiene gran influencia en la resistencia. Así, pequeños nudos, que reducirían la resistencia a compresión en un 10 %, lo haría en el 50 % en el caso de tracción. Los nudos dan lugar, también, a una distribución irregular de las tensiones.
- Inclinación de la fibra: se puede decir que la resistencia a tracción se ve más afectada que la resistencia a la compresión con igual inclinación de las fibras. Un ángulo de 15° reduce la resistencia a la tracción a la mitad y si el ángulo es de 30° la resistencia es 1/5 de la que tendría si la dirección del esfuerzo fuese paralela a la fibra.

2.5. Curvado de madera

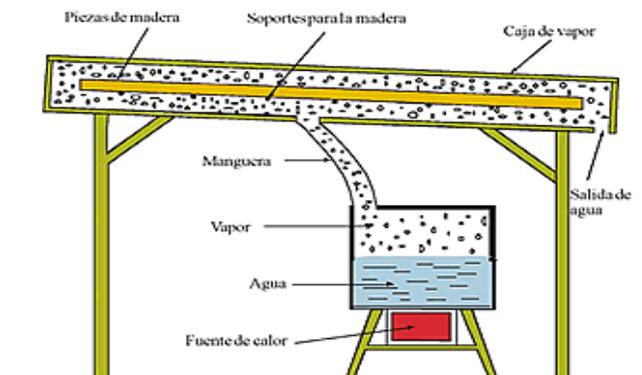
Originalmente para la elaboración de piezas de madera curvada se utilizaban bloques de madera a la cual se le daba la forma de la curva deseada mediante cortes. Otro método era el ensamble de piezas siguiendo la forma de la curva que se quería obtener, a las cuales se les hacen los cortes necesarios. En ocasiones a estas piezas se le ponía una capa de chapa de madera fina, práctica que se viene realizando desde 1600.

El doblado de la madera sólida a vapor, consiste en ablandar las piezas para después doblarlas, y esto se logra sometiendo la madera a una etapa de

vaporizado. Previo a este paso, es necesario fabricar un molde con la forma que se desea curvar la madera sólida. Los materiales que se pueden utilizar para construir el molde pueden ser metal, plástico, madera, entre otros. Entre ellos se coloca la pieza de madera reblandecida, dando la forma del molde y dejando con presión (puede ser por medio de sargentos de apriete rápido), la madera hasta que se enfríe; en ese momento se retiran los sargentos y se obtiene la pieza de madera curvada, con las mismas características de resistencia que la pieza recta original.

Para doblar las piezas mediante vaporizado, es necesario tener un recipiente que genere vapor, conectado a una cámara en donde se tienen las piezas de madera. La cámara requiere de soportes para las piezas que se están vaporizando y un orificio para drenar el agua que se condensa en el interior (figura 4.). Un requisito del proceso de vaporizado es que la madera debe ser de calidad excelente, carecer de defectos y tener hilo recto, pues de lo contrario las piezas de madera que se doblen tendrán muchas imperfecciones después del proceso.

Figura 4. **Cámara de vaporizado**



Fuente: http://html.rincondelvago.com/madera_8.html. Consulta: septiembre 2012.

Un método que comparado con el doblado mediante vaporizado muestra ventajas, es el doblado-laminado ya que la materia prima que se requiere no es una pieza de madera sólida y los radios de curvatura que se pueden obtener para cada especie son menores.

En este proceso se usan varias láminas de madera con espesores entre 2 y 3 milímetros y el doblado se efectúa sin vapor. El proceso inicia con la selección de las láminas, todas deben tener un espesor uniforme para evitar posibles fallas y garantizar que la dimensión del grueso final de las piezas laminadas sea igual en todas. Es conveniente que las láminas tengan también una textura uniforme, para que en la aplicación del adhesivo, éste funcione correctamente.

Al igual que en el proceso de doblado por vapor, es necesario fabricar moldes para colocar las láminas: con los moldes listos y las láminas de madera cortadas a la dimensión apropiada, se inicia el proceso de doblado con la colocación de adhesivo en ambas caras de cada una de las láminas; se unen y son colocadas en el molde donde se les aplica presión para unir el conjunto de las láminas. El siguiente paso es esperar que el adhesivo se seque; una vez endurecido se retira la presión y se quita la pieza del molde.

Una variante en el método de laminado, consiste en realizar pequeños cortes en los extremos de dos piezas de madera sólida. El grosor de cada uno de los cortes puede ser de 2 a 3 milímetros quedando en forma de láminas de madera. Luego se aplica adhesivo en los espacios donde se efectuaron los cortes y se unen las dos piezas, para finalmente colocarlas en el molde siguiendo los mismos pasos que el proceso de laminado.

Es importante mencionar que cada especie de madera que se trate de someter a un doblado, ya sea mediante vaporizado o laminado, tendrá una respuesta diferente con relación al radio de curvatura que se proponga. Esto se debe a que cada especie tiene características anatómicas diversas, lo que determina que cada una pueda alcanzar radios mínimos de curvatura diferentes.

La madera es plastificada a vapor realizando el procedimiento de someter la madera a curvar a una hora por pulgada de espesor (sin importar el ancho de pieza a doblar de madera). Tener cuidado de no exponer la madera por mucho tiempo a vapor porque puede causar arrugas en la madera, en especial en el área de la forma de curva. La temperatura recomendada para el curvado de madera es de 100 °C (a temperatura y presión estándar) o bien a la temperatura de ebullición dependiendo del lugar en donde se realizará el curvado.

2.6. Generalidades de las especies

En el presente estudio se trabajaron dos especies de árbol: teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*).

2.6.1. Teca (*Tectona grandis*)

Tectona grandis es originaria de Birmania, Tailandia y algunas partes de la India. Se reconoce a Trinidad y Tobago como el primer país del continente americano donde fue introducida la teca. En América Central, por conveniencia, se identifican dos procedencias: Tensascrium (Birmania)- Trinidad y Tobago y Sri Lanka- Panamá. La teca inicia la floración entre los cinco y los ocho años, a partir de esta fecha comienzan a producir semilla fértil, la cual generalmente

presenta latencia, por lo que requiere de tratamientos de escarificación. Requiere de climas con una estación seca bien definida (3 a 5 meses), con temperaturas medias anuales entre 22 y 28 °C, una precipitación media anual de 1 250 a 2 500 mm y altitudes entre los 0 y 1 000 msnm.

Es una especie muy resistente a plagas y enfermedades. Por su importancia se han realizado múltiples estudios de mejoramiento genético, para identificar el germoplasma ideal para cada zona de interés principalmente en Asia.

2.6.1.1. Clasificación científica

Nombre científico: *Tectona grandis*

Familia: Verbenaceae

Género: Tectona

Nombres comunes: el nombre común más conocido, en la mayoría de los países donde se ha introducido esta especie, es teca. En la India, se le conoce como sagun, sagon, sagan, skhu, toak, slip tru, Indian oak.

2.6.1.2. Características de la teca

La *Tectona grandis* es una especie latifoliada de la familia Verbenaceae que alcanza hasta 30 metros de altura. Nombrada como la Reina de las Maderas, entre los conocedores, pues su apariencia se hace más bella con el paso de los años y tiene la capacidad de no dañarse cuando entra en contacto con metales, lo que la hace muy valiosa para la fabricación de muebles de alto valor y embarcaciones lujosas. En su lugar de origen el árbol grande, puede alcanzar más de 50 m de altura.

Es un árbol de fuste recto, con corteza áspera y delgada (12 mm), fisurada, de color café claro que se desprende en placas grandes y delgadas; sin olor o sabor característico. Los árboles generalmente presentan dominancia apical, que se pierde con la madurez o cuando florece a temprana edad, dando una copa más amplia con ramas numerosas.

La madera de teca es fina y dura, cualidad muy apreciada para diversos usos, es una madera que contiene sílice; con una densidad de 0,61 a 0,69; fácil de trabajar, secar y preservar; su durabilidad natural es buena y tiene buena estabilidad dimensional. No es corrosiva, tiene resistencia a las termitas, los hongos y a la intemperie.

Tiene un aceite antiséptico que la hace muy resistente y la protege del ataque de diversos organismos. Por las características anteriores y por su belleza, se considera una de las especies más valiosas del mundo.

La madera seca rápido al aire y presenta pocas deformaciones. Además, su comportamiento es bueno durante el secado tanto al aire como en estufa. La madera de teca es usada en construcciones navales, puentes, muebles y carpintería en general, enchapado y contrachapado, madera para parquet (parqué) y duela utilizados en la fabricación de barriles para guardar productos químicos.

Los aspectos más importantes que se mencionan como factores limitantes, para el crecimiento de la especie son: los suelos poco profundos, el mal drenaje, suelos compactados y la textura arcillosa. Por poseer hojas muy grandes que captan gran cantidad de agua de la precipitación, la especie puede provocar la erosión del suelo si se planta en sitios con pendiente sin utilizar algún sistema de control de escorrentía. En cuanto a las condiciones químicas

del suelo, el bajo contenido de calcio y magnesio, limitan el buen desarrollo de la especie. Las semillas de teca poseen un porcentaje de germinación que varía entre 40 y 80 %; además, requieren tratamientos de escarificación para acelerar y uniformizar la germinación.

2.6.2. Melina (*Gmelina arborea*)

La *Gmelina arborea* es una especie de rápido crecimiento, oportunista en los bosques húmedos y se clasifica como una pionera de vida larga. Su capacidad de rebrote es excelente y los brotes presentan un crecimiento rápido y vigoroso. Es caducifolia, en las zonas secas, puede llegar a medir 30 m de altura y presentar más de 80 cm de diámetro. Crece usualmente con un fuste limpio de 6 hasta 9 m y con una copa cónica.

La melina ha sido utilizada como leña en Malawi, Sierra Leona y Nigeria. En Costa Rica se ha usado como salineras. Poder calórico bueno (alrededor de 20 000 kJ/kg o 4 800 kcal/kg). Produce carbón que arde bien y sin humo, pero con abundante ceniza. La madera es susceptible al ataque de termitas.

2.6.2.1. Clasificación científica

Nombre científico: *Gmelina arborea*

Familia: Verbenaceae

Sinónimos: *Gmelina arborea* Linn

Nombres comunes: en América tropical se le conoce como melina, en Indonesia se le conoce como yemane y en la India gamari o gumadi. Otros nombres son gemelina, gmelina, gumhar, kashmir tree, malay beechwood, snapdragon, teca blanca, yemani (Birmania), so, so-maeo (Tailandia), kumhar, sewan (Pakistán), shivani (Indias central), ganar (Bangladesh).

2.6.2.2. Características de la melina

La madera presenta un color amarillento pálido, en ocasiones con tonalidades blancas, amarillas, cremas y rosadas. Existe poca diferenciación entre albura y duramen, lo que hace que el color sea uniforme. Los mejores sitios para melina se ubican en las partes bajas de los terrenos, donde por lo general tienen mayor disponibilidad de agua y nutrientes y los sitios con buenos contenidos de calcio y magnesio y los ubicados en áreas donde el uso anterior era charral o cultivos agrícolas.

Presenta una copa amplia en sitios abiertos, pero en plantación su copa es densa y compacta. La corteza es lisa o escamosa, de marrón pálida a grisácea; en árboles de 6-8 años de edad se exfolia en la parte engrosada de la base del tronco y aparece una nueva corteza, de color más pálido y lisa. Presenta una raíz en forma de sistema radical profundo, aunque puede ser superficial en suelos con capas endurecidas u otros limitantes de profundidad.

Tiene un fuste marcadamente cónico, por lo regular de 50-80 cm de diámetro, en ocasiones hasta de 143 cm, sin contrafuertes pero en ocasiones engrosado en la base. Las hojas de la melina son grandes (10-20 cm de largo), simples, opuestas, enteras, dentadas, usualmente más o menos acorazonadas, de 10-25 cm de largo y 5-18 cm de ancho, decoloradas, el haz verde y glabra, el envés verde pálido y aterciopelado, nerviación reticulada, con nervios secundarios entre 3 y 6 pares y estípulas ausentes.

La especie es de secado lento y no presenta problemas de agrietamiento durante el proceso, si se aplica un programa de secado. El lento proceso de secado y el alto contenido de extraíbles hacen difícil el uso de preservantes.

Las plantaciones de melina no prosperan en suelos muy erosionados o compactados, de topografía quebrada y muy superficial, en esos sitios los árboles muestran características indeseables como fustes torcidos, poca altura, muy ramificados y aspecto arbustivo, por esta razón, se sugiere plantar esta especie en suelos profundos, húmedos pero bien drenados y sin obstáculos de desarrollo radical.

La madera es utilizada para serrío, construcciones rurales y construcción en general, tarimas, leña, muebles, artesanía, cajonería, pulpa para papel, contrachapados, embalajes, postes, tableros, carpintería, tableros y aglomerados.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

- Edad de la madera
- Especie de la madera

3.2. Delimitación del campo de estudio

El campo de estudio de esta investigación está limitado a dos especies de árbol las cuales son teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*), además a trabajar solo dos edades de cada árbol, las cuales son 5 años (considerada madera joven) y 15 años (considerada madera vieja) para cada especie de árbol, usando vapor a presión y temperatura de la ciudad de Guatemala. La realización del curvado de la madera se llevó a cabo en la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala y la extracción del contenido de Lignina para cada especie se llevó a cabo en el Laboratorio de Química de Docencia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: María Teresa Castillo Pérez
- Asesor de Investigación Ing, Qc. Jorge Emilio Godínez Lemus

3.4. Recursos materiales disponibles

Para desarrollar el estudio de investigación se utilizaron equipos, cristalería, reactivos y otros materiales, descritos a continuación.

3.4.1. Equipo

- Cámara de vapor, hecha por la empresa TRACSA, con capacidad para 10 pies lineales de madera, ubicada en la sección Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 5. **Cámara de vapor**



Fuente: Sección Tecnología de la Madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.

- Juego de moldes para curvado de madera, hecha por la empresa TRACSA, ubicada en la sección Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 6. **Molde de curvado**



Fuente: Sección Tecnología de la Madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.

- Sierra circular de banco trifásica marca INVICTA modelo SCC-30 TEB 21, ubicada en la sección Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 7. **Sierra circular**



Fuente: Sección Tecnología de la Madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.

- Balanza analítica marca RADWAG modelo WLY-2/D2, capacidad máxima de 2 Kg y $d=0,01$ g, ubicada en la sección Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 8. **Balanza analítica**



Fuente: Sección Tecnología de la Madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.

- Balanza para determinación de humedad, marca RADWAG, modelo MAX 50/NH, capacidad máxima de 50 g, temperatura máxima de 160 °C y $d=0,01$ g, ubicada en la sección Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 9. **Balanza para determinación de humedad**



Fuente: Sección Tecnología de la Madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.

- Plancha de agitación y calentamiento marca ISOTEMP, FISHER SCIENTIFIC, modelo 11-100-49SH, 120 V, ubicada en la sección Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 10. **Plancha de agitación y calentamiento**



Fuente: Sección Tecnología de la Madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.

- Horno de temperatura máxima de 325 °C, marca PRECISIÓN SCIENTIFIC INC, modelo 645, 220 V, ubicada en la sección Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 11. **Horno utilizado para secar el serrín**



Fuente: Sección Tecnología de la Madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.

- Colector de sedimentos, marca POWERFUL MACHINERY, modelo SDC-4043, motor con capacidad de 3 Hp, 110 V, ubicada en la sección Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 12. **Colector de sedimentos para obtener serrín**



Fuente: Sección Tecnología de la Madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.

- Tamizadora No. 40, marca TYLER, ubicada en la sección de Suelos del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 13. **Tamizadora**



Fuente: Sección Tecnología de la Madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.

- Campana de extracción de 110 V, 900 Watts, marca SERPROMA con motor con capacidad de $\frac{3}{4}$ Hp.

Figura 14. **Campana de extracción**



Fuente: Sección Tecnología de la Madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.

3.4.2. **Cristalería**

- Balones esmerilados de 1 000 mL
- Condensador de bolas boquilla 24/40
- Pipetas de 10 mL, y de 5 mL
- Beackers de 100 mL, 250 mL y 600 mL
- Probetas graduadas 100 mL y 10 mL
- Matraces de 250 mL, y 100 mL
- Embudos de vidrio
- Varillas de agitación
- Probeta de 10mL, 50mL, 250mL, 500mL, y de 500 mL
- Bureta graduada de 25 mL
- Kitasato
- Desecadora

- Equipo Soxhlet para extracción

3.4.3. Reactivos

- Agua desmineralizada
- Alcohol etílico (C₂H₅OH) al 95 % grado reactivo
- n-hexano (C₆H₁₄) grado reactivo
- Hidróxido de Sodio
- Ácido Sulfúrico (H₂SO₄) al 96 %
- Sílice

3.4.4. Otros materiales

- Dedales de extracción de celulosa MARCA Whatman No. de catálogo 2800339, 35 mm. de diámetro externo, 33 mm. de diámetro interno, 94 mm de longitud.
- Caja de papel filtro Whatman No 4.
- Perillas de succión.
- Mangueras de hule.
- Papel Parafilm.
- Piceta.
- Agitadores magnéticos.

3.5. Técnica cualitativa y cuantitativa

- Para la determinación de extraíbles de la madera (ceras, resinas, lípidos, polvo, insectos y cualquier tipo de interferencia que puede afectar a la

extracción) se utilizó la Norma de ensayo ASTM D1105-56 “Standard Test Method for Preparation of Extractive-Free Wood”.

- Para la determinación del contenido de lignina se utilizó la Norma de ensayo ASTM D1106-56 “Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood”.
- Para el curvado de la madera se utilizó el método del proyecto FODECYT 025-2010 “Evaluación de la Influencia del tiempo de vaporizado y tiempo de prensado en el proceso de curvado de vapor de madera sólida de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) obtenida en el primer raleo como alternativa tecnológica para el desarrollo agroindustrial”.

3.6. Recolección de la información

Las variables fueron recolectadas y documentadas en las etapas de recolectar la materia prima, caracterización química de la materia prima y elaboración de probetas curvadas a vapor. A continuación se detalla la metodología experimental.

3.6.1. Recolectar la materia prima

Se recolectó el serrín por medio del colector de sedimentos para cada especie y edad de árbol. El serrín recolectado se tamizó con un tamizador No. 40 y se secó hasta obtener un contenido de humedad menor al 5 %.

3.6.2. Caracterización química de la materia prima

Para la caracterización de la lignina se utilizaron las siguientes normas de ensayo: Determinación de extraíbles, Norma, ASTM D1105-56 “Standard Test Method for Preparation of Extractive-Free Wood” y para la determinación del contenido de lignina, la Norma ASTM D1106-56 “Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood”.

3.6.3. Curvado a vapor de las probetas

Para el curvado a vapor de las probetas de madera de cada especie y edad de árbol se utilizó el procedimiento descrito en el proyecto FODECYT 025-2010 “Evaluación de la Influencia del tiempo de vaporizado y tiempo de prensado en el proceso de curvado de vapor de madera sólida de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) obtenida en el primer raleo como alternativa tecnológica para el desarrollo agroindustrial”.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los datos obtenidos de cada especie de árbol y edad fueron tabulados, ordenados y procesados por medio de tablas.

3.7.1. Ordenamiento de la información

Los datos recopilados durante la fase experimental se ordenaron en tablas.

3.7.2. Procesamiento de la información

Los resultados obtenidos en la caracterización química de la lignina y elongación en el curvado a vapor para cada especie y edad de árbol se manejaron por medio de tablas.

3.7.3. Programas a utilizar para análisis de datos

- Microsoft Office Excel 2007, 32 bits. SP3. Parte de Microsoft Office XP Professional. © 2007 Microsoft Corporation.

3.8. Análisis estadístico

Para realizar un análisis estadístico de los datos a obtener, se determinaron el número de corridas a realizar y el análisis de varianza con los datos obtenidos del estudio.

3.8.1. Determinación del número de corridas

El número de corridas necesarias en el procedimiento experimental del contenido de lignina y el curvado a vapor de las probetas se determinó de la siguiente manera:

$$N = \frac{Z_{\alpha/2}^2 PQ}{E^2} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

N= número de corridas

$Z_{\alpha/2}$ = confiabilidad

P= probabilidad de éxito

Q= probabilidad de fracaso

E= error

Para obtener resultados y análisis confiables y porcentaje mínimo de error, se obtuvo el número de corridas utilizando los siguientes valores:

$Z_{\alpha/2} = 1,96$

P= 0,96

Q= 0,04

E= 0,225

$$N = \frac{1,96^2 * 0,96 * 0,04}{0,225^2} = 3$$

Por lo tanto son necesarias 3 corridas para cada tratamiento, para desarrollar la fase experimental del contenido de lignina y el curvado a vapor de cada especie y edad de árbol.

3.8.2. Media aritmética

Para cada edad y especie de árbol se determinará la media de las 3 corridas, para comparar los valores entre las edades de cada especie de árbol.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N}$$

Ecuación 2

Donde:

\bar{X} = media aritmética

x_i = valor de cada corrida

N= número de corridas

3.8.3. Análisis de varianza (ANOVA)

Para determinar si existe un efecto significativo en el contenido de lignina y la edad del árbol, se realizó un análisis de varianza (ANOVA), para cada especie de árbol. Se utilizó un análisis de varianza por medio de un diseño unifactorial en un solo sentido completamente aleatorio con la distribución de Fisher, es unifactorial por ser solo la edad del árbol la variable, se tienen dos tratamientos, en este caso las edades de cada especie de árbol y seis repeticiones. El arreglo matricial es de doce series para cada especie de árbol. Los datos se arreglaron como sigue:

Tabla I. **Tratamientos para la determinación del contenido de lignina**

Tratamientos	Número de observaciones	
1	Y_{11}	Y_{12}
2	Y_{21}	Y_{22}

Fuente: elaboración propia.

Las operaciones para el análisis de varianza se resumen en la siguiente tabla, así como las fórmulas para el cálculo de suma de cuadrados. Los tratamientos o edades fueron, adoptando la variable “ k ”, las repeticiones de la misma especie fueron 6, adoptando la variable n . El valor F es comparado con un valor F crítico tabulado y así aceptar o rechazar la hipótesis nula de la investigación.

Tabla II. **Análisis de varianza**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F calculada
Tratamientos	SSA	k - 1	$S_1^2 = \frac{SSA}{(k - 1)}$	$F = \frac{S_1^2}{S^2}$
Error	SSE	k(n-1)	$S^2 = \frac{SSE}{k(n - 1)}$	
Total	SST	k(n - 1)		

Fuente: elaboración propia.

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de varianza son:

$$SST = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2$$

$$SSA = n \sum_{i=1}^K (\bar{Y}_i - \bar{Y}_{..})^2$$

$$SSE = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 = SST - SSA$$

Dónde:

y_i = suma de las medidas en la i-ésima muestra

y = suma de todas las medidas, gran total

n = número de repeticiones

k = número de observaciones o tratamientos

i = 1, 2, ... a

j = 1, 2, ... b

k = 1, 2, ... c

4. RESULTADOS

Se realizó un análisis químico gravimétrico para cuantificar los porcentajes de lignina, para cada especie de árbol y edad presentes, utilizando la Norma ASTM D1106-56 “Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood”. Para la determinación de la elongación por medio del radio de curvatura se utilizó el procedimiento descrito en el proyecto FODECYT 025-2010 “Evaluación de la Influencia del tiempo de vaporizado y tiempo de prensado en el proceso de curvado de vapor de madera sólida de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) obtenida en el primer raleo como alternativa tecnológica para el desarrollo agroindustrial”, para cada especie y edad de árbol.

Tabla III. **Contenido de lignina y elongación por el radio de curvatura**

Especie	Edad	Composición (%)	Elongación (m)
melina (<i>Gmelina arborea</i>)	5 años	18,20	33,67
melina (<i>Gmelina arborea</i>)	15 años	20,01	27,33
teca (<i>Tectona grandis</i>)	5 años	23,60	34,25
teca (<i>Tectona grandis</i>)	15 años	26,20	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Análisis de varianza del contenido de lignina respecto a la edad de árbol de cada especie**

Especie de árbol	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	Valor F calculado	Valor crítico F	Hipótesis nula (H₀)
melina (<i>Gmelina aroórea</i>)	5,22267	1	5,22267	196,00	4,96	Rechazada
teca (<i>Tectona grandis</i>)	10,14	1	10,14	95,66	4,96	Rechazada
Total	15,2667	2				

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN

El contenido de lignina fue determinado utilizando la Norma ASTM D1106-56 “Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood” para cada especie de árbol y edad respectiva obteniendo la tendencia que a mayor edad, mayor es el contenido de lignina presente en el árbol.

La facilidad de curvado, se determinó a partir de los datos de la elongación de la madera curvada mediante radio de curvatura en las probetas de madera para cada especie y árbol, la cual se utilizó el procedimiento descrito en el proyecto FODECYT 025-2010 “Evaluación de la Influencia del tiempo de vaporizado y tiempo de prensado en el proceso de curvado de vapor de madera sólida de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) obtenida en el primer raleo como alternativa tecnológica para el desarrollo agroindustrial”, utilizando el tiempo de curvado para la especie de melina de 60 minutos y para la especie de teca un tiempo de 25 minutos, en ambas especie su tiempo de prensado con sargentos en forma de “U” fue de 2 horas, obteniendo los radios de curvatura descritos en el tabla III.

Se observó que en la especie del árbol teca a una edad de 15 años la pieza de madera no curvó, sus fibras cedieron antes de llegar a darle la forma en “U” requerida para esta investigación, determinando que no basta con saber el contenido de lignina en el árbol para determinar si la pieza de madera puede curvarse. Se debe tomar en consideración la parte física de la madera, por ejemplo las orientación de las vetas de la madera, siendo ésta es una variable importante al momento de curvar madera a vapor, ya que éstas deben estar lo

más alienadas posible, para evitar el rompimiento de las fibras al momento de aplicar la fuerza para curvar la madera.

Según el análisis de varianza presentado en la tabla IV, se observa que tanto para la especie teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) el resultado de la distribución de Fisher rechaza en ambas especies la hipótesis nula planteada.

De lo anterior se concluyó que el contenido de lignina no es el único factor a considerar al momento de curvar la madera, se debe tomar en cuenta la disposición del tejido de la madera.

CONCLUSIONES

1. El contenido de lignina en la madera es directamente proporcional a la edad del árbol.
2. En el curvado de madera a vapor se debe tomar en consideración la orientación de la vetas en la madera para evitar el rompimiento de las fibras de la misma al momento de aplicar fuerza y curvar la madera a vapor.
3. La distribución de Fisher utilizada en el análisis de varianza, rechaza la hipótesis nula propuesta.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio sobre la orientación de las vetas en las piezas de madera para determinar la importancia real de éstas al momento de curvar madera a vapor.
2. Elaborar un estudio histológico del árbol para determinar si este factor influye en el curvado de la madera a vapor.
3. Efectuar un estudio entre las propiedades físicas de la madera y la influencia que tienen en el curvado de madera a vapor.
4. Desarrollar un estudio entre la edad del árbol y el tiempo de curvado-prensado de la madera curvada a vapor.
5. Realizar un estudio de comparación entre el grosor de las probetas de madera y la influencia que tienen al momento de curvar madera a vapor.
6. Elaborar un estudio económico de los curvados químicos de madera y el curvado de madera a vapor.
7. Desarrollar un estudio para determinar si las propiedades físicas de la madera influyen en un curvado de madera con productos químicos como en amoníaco líquido o resina de fenol-formaldehído de bajo peso molecular.

BIBLIOGRAFÍA

1. ÁLVAREZ GODOY, Esther. *Extractivos del árbol* [en línea] <<http://www.ecoportal.net/content/view/full/39302>> [Consulta: 3 de septiembre de 2012].
2. ARAYA LÓPEZ, Cristian Martín. *Determinación de características de curvado de madera sólida para las especies Nothofagus Pumilio (Lenga) y Laurelia Philipiana (Tepa)*. Santiago de Chile: Universidad Tecnológica Metropolitana, 2005. 110 p.
3. CAMPOS CISNEROS, Maxwell. *Madera* [en línea] <<http://www.monografias.com/trabajos48/maderas/maderas2.htm>> [Consulta: 10 de agosto de 2012].
4. *Celulosa* [en línea] <<http://es.wikipedia.org/wiki/Celulosa>> [Consulta: 3 de septiembre de 2012].
5. GONZÁLEZ Daniel. *Estudio de la madera para la construcción* [en línea] <<http://html.rincondelvago.com/estudio-de-la-madera-para-laconstruccion.html>> [Consulta: 10 de agosto de 2012].
6. *Lignina* [en línea] <<http://www.ecured.cu/index.php/Lignina>> [Consulta: 3 de septiembre de 2012].
7. *Madera* [en línea] <http://html.rincondelvago.com/madera_8.html> [Consulta: 3 de septiembre de 2012].

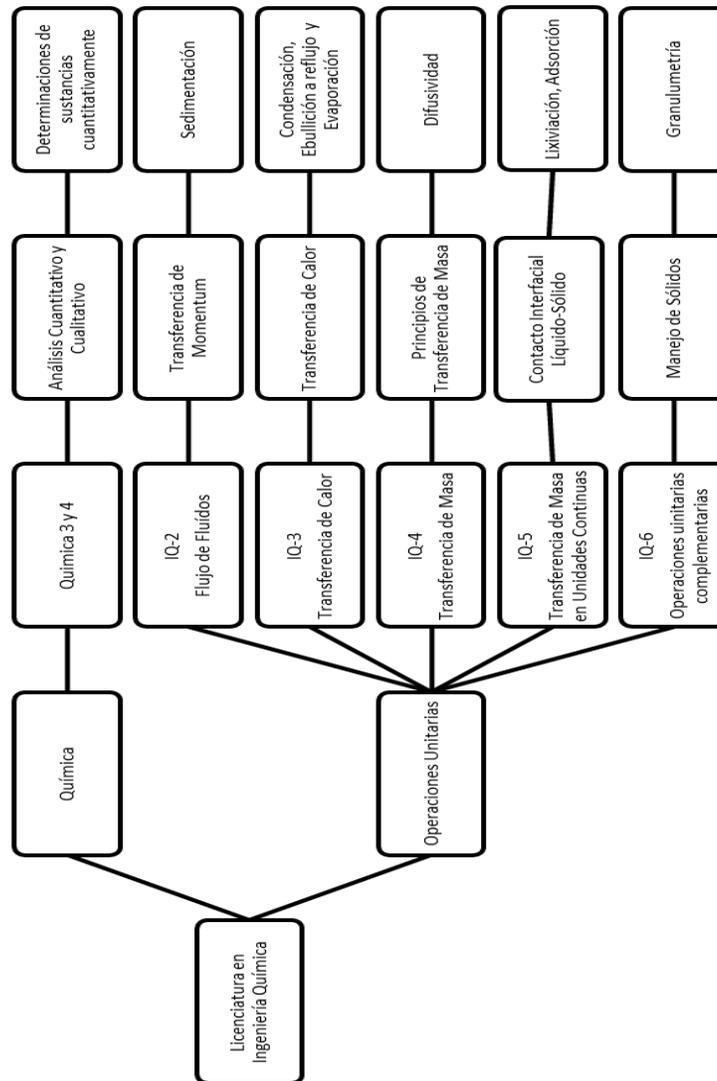
8. MELTZER, Robert L. *Annual Book of ASTM Standards*. Parte 22, madera y adhesivos. Estados Unidos de América: Sociedad Americana de ensayos y materiales, 1979. p. D 1105-56 y D1106-56.
9. MILLER, James N.; MILLER, Jane C. *Estadística y quimiometría para química analítica*. Madrid: Pearson Educación, S.A., 2002. 296 p.
10. MYERS, Raymond; WALPOLE, Ronald; MYERS, Sharon. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6a ed. México: Pearson Educación, 1999. 752 p.
11. MURALLES REYES, Samuel Manolo. *Caracterización química de la madera de la especie teca (Tectona grandis L.F.)*. Trabajo de graduación de Ing. Químico. Universidad San Carlos Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 142 p.
12. PAZ FONG, Francisco José. *Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer raleo en árboles de melina (Gmelina arborea roxb.), de una plantación proveniente del departamento de Izabal*. Trabajo de graduación de Ing. Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 122 p.
13. PINILLOS CUETO, Enrique. *Doblado de madera* [en línea] <<http://www.mexicandesign.com/revista/cueto.htm>> [Consulta: 5 de septiembre de 2012].

14. PROYECTO FODECYT 25-2010. *Evaluación de la influencia del tiempo de vaporizado y tiempo de prensado en el proceso de curvado a vapor de madera sólida de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) obtenida en el primer raleo como alternativa tecnológica para el desarrollo agroindustrial*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Sección Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería, 2012. 150 p.
15. ROWELL, Roger M. *Handbook wood chemistry and wood composites*. USA: Taylor & Francis Group, 2005. 750 p.
16. SCHEINING, Lon. *The complete manual of wood bending* [en línea] <<http://www.leevalley.com>> [Consulta: 5 de septiembre de 2012].
17. TSOUMIS, George. *Science and technology of wood*. New York, Van Nostrand Reinhold, 1982. 450 p.
18. United States Department of Agriculture. *Wood handbook, wood as an engineering material*. General Technical Report FPL-GTR-113. USA: USDA. 250 p.

APÉNDICE A

REQUISITOS ACADÉMICOS

Figura 1. Requisitos académicos

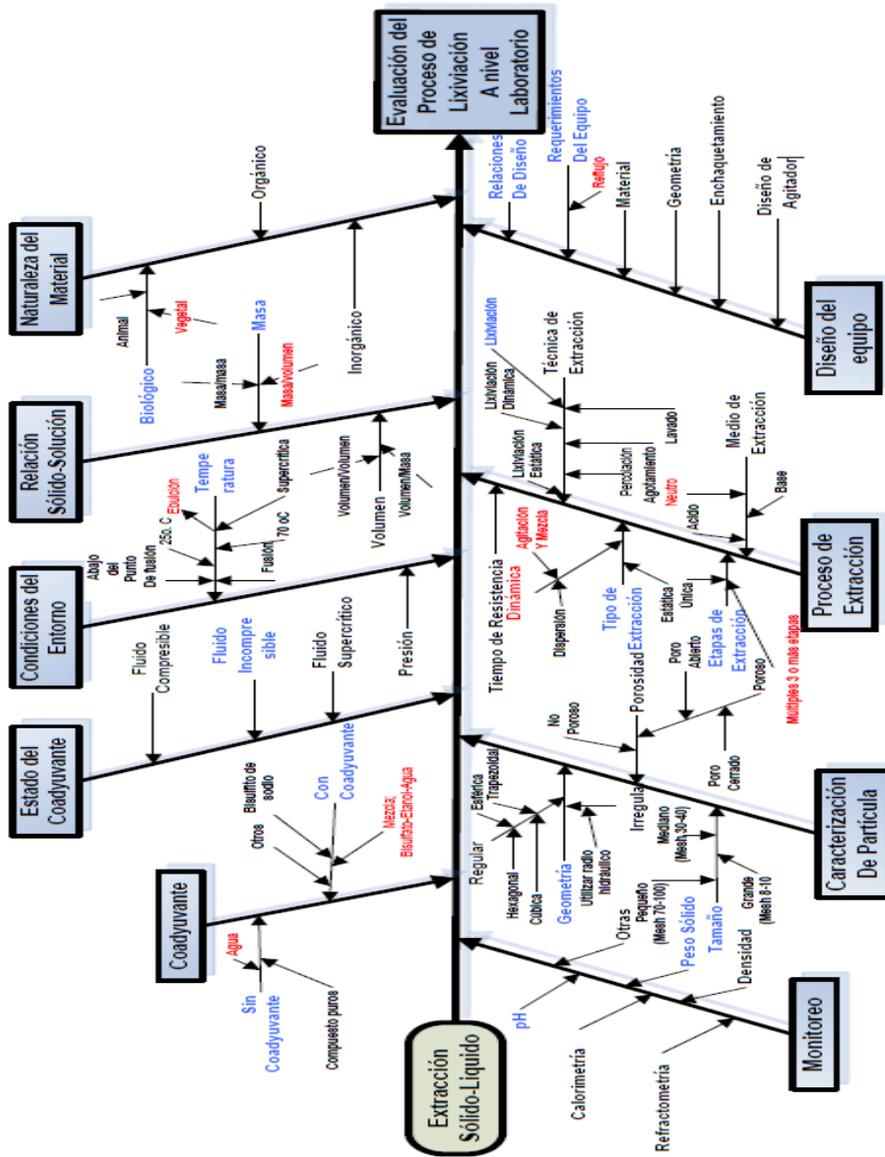


Fuente: elaboración propia.

APENDICE B

DIAGRAMA DE ISHIKAWA

Figura 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

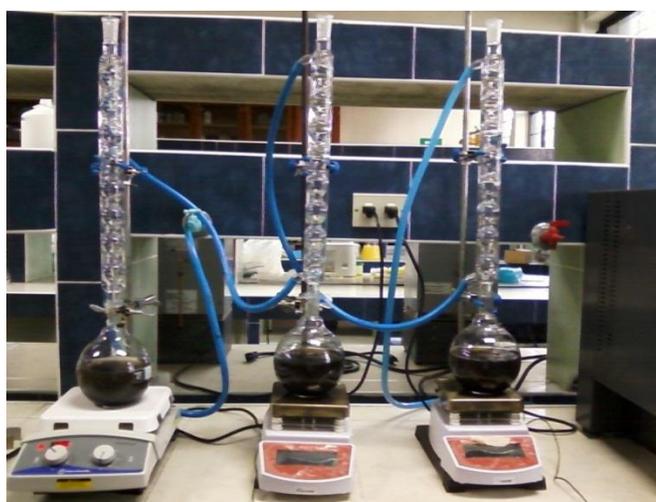
ANEXOS

Figura 3. **Equipo para realizar la extracción de extraíbles**



Fuente: Laboratorio de Química de Docencia, Facultad de Ingeniería.

Figura 4. **Equipo para realizar la extracción de lignina**



Fuente: Laboratorio de Química de Docencia, Facultad de Ingeniería.

Figura 5. **Equipo de filtración para obtener la lignina**



Fuente: Laboratorio de Química de Docencia, Facultad de Ingeniería.

Figura 6. **Muestras a secar en el horno**



Fuente: Laboratorio de Química de Docencia, Facultad de Ingeniería.

Figura 7. **Probetas en el proceso de curvado después de sacarlas de la cámara de vaporizado**



Fuente: Sección Tecnología de la Madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.

Figura 8. **Probeta de madera teca (*Tectona grandis*), se aprecia las vetas no alineadas**



Fuente: Sección Tecnología de la Madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.

Figura 9. **Probeta de madera curvada**



Fuente: Sección Tecnología de la Madera, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.