



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

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA MADERA DE LA ESPECIE TECA
(TECTONA GRANDIS L.F.)**

Samuel Manolo Muralles Reyes

Asesorado por: Inga. Qca. Telma Maricela Cano Morales

Ing. For. M.Sc. José Mario Saravia Molina

Guatemala, junio de 2008



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG. 203.2008

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: **CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA MADERA DE LA ESPECIE TECA (TECTONA GRANDIS L.F.)**, presentado por el estudiante universitario **Samuel Manolo Muralles Reyes**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A handwritten signature in black ink, enclosed within a hand-drawn oval shape.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, junio de 2008



/gdech



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.

El Director de la Escuela de Ingeniería Química Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía, M.Sc. Después de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el trabajo de graduación del estudiante **Samuel Manolo Muralles Reyes** titulado: **“CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA MADERA DE LA ESPECIE TECA (TECTONA GRANDIS L.F.)”**, procede a la autorización del mismo, ya que reúne rigor, coherencia y calidad requeridos.

Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía M.Sc.
DIRECTOR ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA



Guatemala, junio de 2,008



Guatemala 28 de febrero de 2008.

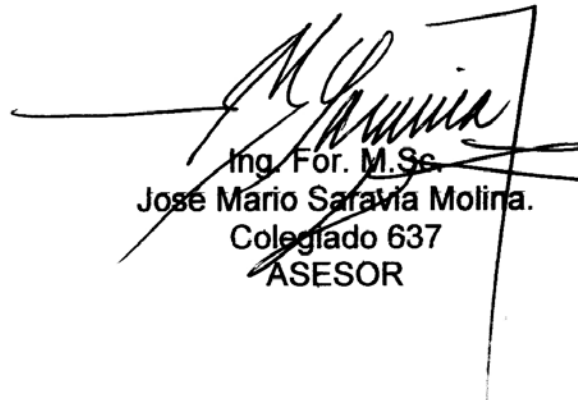
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Respetable Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para informarle que he revisado el informe final del trabajo de graduación titulado "**Caracterización Química de la Madera de la Especie Teca (*Tectona grandis L.f.*)**" desarrollado por el estudiante de Ingeniería Química Samuel Manolo Muralles Reyes, carné No. 2003-12573.

Después de haber realizado la revisión del informe en referencia, y de haberle hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Atentamente,


Ing. For. M.Sc.
Jose Mario Saravia Molina.
Colegiado 637
ASESOR





Guatemala 28 de febrero de 2008.


Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Respetable Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para informarle que he revisado el informe final del trabajo de graduación titulado "**Caracterización Química de la Madera de la Especie Teca (*Tectona grandis L.f.*)**" desarrollado por el estudiante de Ingeniería Química Samuel Manolo Murallès Reyes, carné No. 2003-12573.

Después de haber realizado la revisión del informe en referencia, y de haberle hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Atentamente,


Ing. Telma Maricela Cano Morales
Colegiado 433
ASESORA

Supervisora Sección Química Industrial
Centro de Investigaciones de Ingeniería/CII





Guatemala, 08 de mayo 2008.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Respetable Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para informarle que he revisado el informe final del trabajo de graduación titulado "**Caracterización Química de la Madera de la Especie Teca (*Tectona grandis L.f.*)**" desarrollado por el estudiante de Ingeniería Química Samuel Manolo Muralles Reyes, carné No. 2003-12573.

Después de haber realizado la revisión del informe en referencia, y de haberle hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Atentamente,

Ing. César Alfonso García Guerra
Colegiado 145
REVISOR

Jefe de la Sección de Química Industrial
Centro de Investigaciones de Ingeniería/CII





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 14 de mayo de 2008
Ref. EIQ.126.2008

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-028-08-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERO QUÍMICO al estudiante universitario **SAMUEL MANOLO MURALLES REYES**, identificado con carné No. **2003-12573**, titulado: **CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA MADERA DE LA ESPECIE TECA (Tectona Grandis L. F.)**, el cual ha sido asesorado por la Ingeniera Química, Telma Maricela Cano Morales como consta en el Acta.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice al **estudiante Muralles Reyes** proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑADA A TODOS"

Inga. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.

COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación



ESCUELA DE
INGENIERIA QUIMICA

C.c.: archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA MADERA DE LA ESPECIE TECA
(TECTONA GRANDIS L.F.)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

SAMUEL MANOLO MURALLES REYES

ASESORADO POR: INGA. QCA. TELMA MARICELA CANO MORALES

ING. FOR. M.SC. JOSÉ MARIO SARAVIA MOLINA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, JUNIO DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Inga. Teresa Lisely de León Arana
EXAMINADOR	Inga. José Manuel Tay Oroxom
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA MADERA DE LA ESEPCIE TECA (TECTONA GRANDIS L.F.),

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 21 de septiembre de 2007.


Samuel Manó Muralles Reyes

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS Y LA VIRGEN SANTÍSIMA

Por regalarme la vida. Por todas las bendiciones que derraman sobre mí cada día, y por estar siempre conmigo. Por permitirme convertirme un hombre de éxito y siempre ser humilde, recordándome de donde vengo y hacia donde voy.

MIS PADRES

María Herminia Reyes Aguilar de Muralles y Samuel Abelardo Muralles Gramajo. Gracias por su amor, por todos los sacrificios que hicieron para permitirme vivir este momento, y por su apoyo incondicional para lograr este éxito. Los Quiero Mucho.

MIS HERMANOS

Nadia Lourdes Muralles Reyes y Jorge Javier Alejandro Muralles Reyes, por comprenderme y aceptarme, y por su apoyo. Los Quiero Mucho.

A MIS ABUELOS

Berta Gramajo (Q.D.P.) y Roque Muralles (Q.D.P.), Cristina Aguilar y Mariano Reyes.

HELLEN SOSA

Gracias por tu amor, apoyo y motivación. Gracias por estar conmigo en esos momentos importantes y siempre. Te amo.

AGRADECIMIENTOS A:

- Mis tías** Marta Alicia Reyes Aguilar y Bernarda del Carmen Reyes Aguilar. Gracias por ser mis segundas madres, por todo su amor, y por apoyarme en los momentos que más las he necesitado. Las quiero mucho.
- Mis tíos** Leonel Muralles, Pedro Muralles, Noé Muralles. Marcos Reyes, Jaime Reyes, Manuel Reyes.
- Mi padre** Gracias por su amor papá, por todos sus sacrificios y por todas sus enseñanzas. Por ser mi ejemplo de San José. Lo quiero mucho papá.
- Mi madre** Gracias por su amor mamá, por enseñarme a ser buen cristiano y por estar alimentando constantemente mis sueños. Por ser mi ejemplo de la Virgen María. La quiero mucho mamá.
- Mis hermanos** Nadia y Javier, gracias por su amor y por todo su apoyo. Los quiero mucho.
- Mis primos** Leonel, Henry, Analy, Carolina, Kevin, Renato, Sara, Natalí, Sergio, Génesis, José Israel, Cecilia, Nelly, Marco Vinicio, Marco Antonio, Marta Cristina, Diego, Aníbal, Jaime Eduardo, Alberto José, Elena

María, Saúl, Ruth, Alex, Víctor Danilo, Juan Manuel, Guadalupe, Sofía, Francisco.

Julieta Gómez

Por su cariño y ayuda.

Inga. Telma Cano

Gracias por creer en mí y por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo y por su apoyo.

Ing. César García

Por su apoyo y confianza en la revisión de este trabajo.

Mis amigos

Francisco Paz, Luis Méndez, Enrique Labín, Roberto Calderón, Juan José Pineda; José Luis Morales. Por su contribución.

Mis compañeros de cierre

Por su compañerismo y ayuda en el transcurso de la carrera.

Mis compañeros de Química Industrial

Por su apoyo y amistad en el transcurso de este año.

Ing. José Mario Saravia

Por su apoyo y respaldo en el trabajo realizado.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
HIPÓTESIS	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Estructura de la madera	1
1.1.1 Estructura Macroscópica de la madera	2
1.1.2 Estructura Microscópica de la madera	4
1.1.2.1 Componente de la estructura Microscópica de la madera	6
1.2 Propiedades físicas de la madera	7
1.2.1 Anisotropía	7
1.2.2 Humedad de la madera. Relaciones agua-madera	8
1.2.3 Contenido de humedad	10
1.2.4 Hinchazón y merma de la madera	13
1.2.5 Coeficiente de contracción volumétrica	15
1.2.6 Punto de saturación de las fibras (P.S.F.)	16
1.2.7 Peso específico	17
1.2.8 Higroscopicidad	19
1.2.9 Homogeneidad	19
1.2.10 Durabilidad	20

1.2.11	Inflamación y combustión	20
1.3	Propiedades mecánicas de la madera:	21
1.3.1	Elasticidad – deformabilidad	21
1.3.2	Flexibilidad	22
1.3.3	Dureza	22
1.3.4	Cortadura	23
1.3.5	Hendibilidad	23
1.3.6	Desgaste	24
1.3.7	Resistencia al choque	24
1.3.8	Resistencia a la tracción	25
1.3.8.1	Factores que afectan a la resistencia a la tracción	25
1.4	Composición Química de la madera:	26
1.4.1	Celulosa	28
1.4.1.1	Estructura Química de la Celulosa	29
1.4.1.2	Función de la Celulosa	30
1.4.2	Hemicelulosa	31
1.4.2.1	Estructura Química de la Hemicelulosa	31
1.4.2.2	Función de la hemicelulosa	33
1.4.3	Lignina	33
1.4.3.1	Estructura Química de la Lignina	34
1.4.3.2	Función de la Lignina	36
1.4.4	Componentes no estructurales de la madera	36
1.4.4.1	Taninos	36
1.4.4.1.1	Estructura Química de los Taninos	37
1.4.4.1.2	Clasificación de los Taninos	38
1.4.4.1.2.1	Taninos Hidrolizables	38
1.4.4.1.2.2	Taninos condensados o Proantocianidinas	39
1.4.4.2	Sustancias extraíbles	39

1.4.4.2.1	Extractivos del follaje	41
A.	Sustancias solubles en agua	41
B.	Solubles en disolventes orgánicos	41
1.4.4.3	Aceites esenciales	42
1.4.4.4	Componentes inorgánicos y cenizas	43
1.5	Generalidades de la especie (<i>Tectona Grandis</i>)	44
1.5.1	Clasificación Científica	45
1.5.2	Características de la Teca	46
1.5.3	Requerimientos Ambientales	47
1.5.4	Características de la madera	48
1.5.5	Factores limitantes	49
1.5.6	Establecimiento	49
1.5.7	Manejo	50
1.6	Fundamentos teóricos con base a la metodología	52
1.6.1	Gravimetría	52
1.6.2	Volumetría	53
1.6.3	Secado	53
1.6.4	Calcinación	54
1.6.5	Lixiviación	56
2.	METODOLOGÍA	59
2.1	Metodología de Investigación	59
2.1.1	Recursos Humanos	59
2.1.2	Ubicación del material de estudio	59
2.1.3	Infraestructura física	59
2.1.4	Recursos físicos	60
2.1.5	Otros accesorios	62

2.2	Procedimientos analíticos	63
2.2.1	Preparación de las muestras	63
2.2.2	Determinación de humedad	64
2.2.3	Determinación de Taninos	66
2.2.4	Determinación de extraíbles	69
2.2.5	Determinación de Lignina	70
2.2.6	Determinación de celulosa	72
2.2.7	Determinación de cenizas	73
2.3	Diseño experimental	75
2.3.1	Diseño de tratamientos	75
2.3.2	Análisis estadístico	75
3.	RESULTADOS	79
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	85
	CONCLUSIONES	91
	RECOMENDACIONES	93
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
	REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	97
	BIBLIOGRAFÍA	99
	DATOS CALCULADOS	101
	DATOS ANÁLISIS ESTADÍSTICO	105
	DATOS ORIGINALES	109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de estructura Macroscópica de la madera	4
2.	Estructura Microscópica de la madera	5
3.	Equilibrio Higroscópico de la Madera con el aire	12
4.	Esquema de la composición Química de la madera	27
5.	Estructura Química de la Celulosa	29
6.	Estructura generalizada de Lignina	35
7.	Plantación de Teca	47
8.	Origen de las muestras a tres diferentes alturas del tronco	75
9.	Distribución de los resultados experimentales de concentración de Celulosa en función de la altura; determinada según norma ANSI/ASTM D 1103-60, llamada "Celulosa en madera", para Teca (<i>Tectona grandis L.f.</i>).	80
10.	Distribución de los resultados experimentales de concentración de Lignina en función de la altura; determinada según norma ANSI/ASTM D 1106-56, llamada "Lignina en madera", para Teca (<i>Tectona grandis L.f.</i>).	81
11.	Distribución de los resultados experimentales de concentración de Extraíbles en función de la altura; determinada según norma ANSI/ASTM D 1105-56, llamada "Preparación de Madera Libre de Extraíbles", para Teca (<i>Tectona grandis L.f.</i>).	82

12. Distribución de los resultados experimentales de concentración de Taninos en función de la altura; determinada según “Método de tara en vaina”, para Teca (*Tectona grandis L.f.*). 83
13. Distribución de los resultados experimentales de concentración de Cenizas en función de la altura; determinada según norma ANSI/ASTM D 1102-56, llamada “Cenizas en Madera”, para Teca (*Tectona grandis L.f.*). 81

TABLAS

I.	Cuadro de estado de la madera, según el % de humedad	13
II.	Clase de madera respecto al % de contracción total	15
III.	Clasificación de la madera con base al punto de saturación	16
IV.	Composición Química de la madera (% en peso)	28
V.	Variables para el diseño unifactorial	76
VI.	Análisis de varianza para el diseño unifactorial	78
VII.	Resultados generales de la caracterización química de la madera de Teca (<i>Tectona grandis L.f.</i>)	79
VIII.	Datos calculados para Celulosa	101
IX.	Datos calculados para Lignina	101
X.	Datos calculados para extraíbles	102
XI.	Datos calculados para Taninos	102
XII.	Datos calculados para cenizas	102
XIII.	Datos calculados para humedad	103
XIV.	Resultados del análisis de varianza para Celulosa	105
XV.	Resultados del análisis de varianza para Lignina	105
XVI.	Resultados del análisis de varianza para extraíbles	105
XVII.	Resultados del análisis de varianza para Taninos	106
XVIII.	Resultados del análisis de varianza para cenizas	106
XIX.	Resultados del análisis de varianza para humedad	106
XX.	Concentración promedio de los componentes con base a la altura	107

LISTA DE SÍMBOLOS

F_o	Fisher observada
F	Fisher tabulada
SSA	Suma de cuadrados para tratamientos o regiones.
SSE	Suma de cuadrados para el error.
SST	Suma de cuadrados total.
n	Repeticiones u observaciones.
N	Total de observaciones
H_o	Hipótesis nula
H_a	Hipótesis alternativa
μ_i	Media para cada parámetro.
g	gramos
mL	mililitros

m	Metros
ha	hectárea
%	Porcentaje
°C	Grado Celsius.
Σ	Sumatoria
cm	Centímetros
mm	Milímetros
L	Litros
msnm	Metros sobre el nivel del mar
pH	Potencial de hidrógeno
Yi	Sumatoria de los totales de las observaciones
y	Sumatoria de los promedios de las observaciones

GLOSARIO

Aceites esenciales:	Constituyen una mezcla de sustancias volátiles que pertenecen a diferentes clases de compuestos orgánicos. Predominan los terpenos y terpenoides oxigenados (alcoholes y ácidos).
Anhidra:	Que no contiene agua.
Axial:	Relativo al eje.
Biomolécula:	Las biomoléculas son las moléculas constituyentes de los seres vivos. Estan constituídas principalmente por carbono e hidrógeno, aunque también pueden estar presentes oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre
Calcinación:	Proceso en donde un cuerpo se somete al calor para eliminar las sustancias volátiles.
Coníferas:	Grupo de plantas de hojas perennes, en forma de escamas y fruto en forma cónica, como los pinos, los cipreses y los abetos.
Hidrocarburo:	Cada uno de los compuestos químicos resultantes de la combinación del carbono con el hidrógeno.

- Higroscópico:** Que tiene la propiedad de ceder o ganar humedad en intercambio con la humedad existente en el medio ambiente que la rodea, hasta alcanzarse un estado de equilibrio entre el valor de humedad relativa del aire y el contenido de humedad de madera.
- Ignífugo:** Que protege contra el fuego.
- Latifoliadas:** Árboles con un tronco con una ramificación desordenada, sus hojas son anchas y pueden ser perennes o caedizas.
- Radial:** Que tiene sus diversas partes dispuestas alrededor de un punto o de un eje, como los radios de una circunferencia.

RESUMEN

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.

Las muestras de madera utilizadas fueron molidas en el taller de Carpintería del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería y tamizadas en un tamiz No. 40 (0.42mm*0.42mm), recolectando la fracción que pasó por ella.

Los ensayos químicos realizados fueron los siguientes: Preparación de madera libre de sustancias extraíbles, según norma ANSI/ASTM D 1105-56; determinación de alfa celulosa en madera, según norma ANSI/ASTM D-1103-60; lignina en madera, según norma ANSI/ASTM D 1106-56; cenizas en madera; según norma ANSI/ASTM D 1102-56; taninos en madera, según metodología utilizada en estudios anteriores (ver Ref.1) y contenido de humedad en base húmeda.

Se analizaron 9 árboles a 3 diferentes alturas, siendo altura d.a.p. (diámetro a la altura del pecho 1.30 m) o basal, altura comercial media y alta o apical.

Para la Teca (*Tectona grandis L.f.*) se obtuvo los siguientes resultados: la concentración de celulosa se encuentra entre el 50.39% y el 71.10%, con un

promedio de 60.53%; la lignina se encuentra entre 23% y 32%, con un promedio de 26.37%.

Las sustancias extraíbles se encuentran entre 4.53% y 7.20%, con un promedio de 5.69%; los taninos se encuentra entre el 0.19% y el 0.95% en peso, con un promedio de 0.7334%; y las cenizas se encuentran entre 0.9% y 1.6%, con un promedio de 1.23%.

En el caso de los taninos el porcentaje obtenido se reportó por debajo de 1.0% en peso, debido a que se trabajó sólo con la madera de Teca y no con la corteza donde se encuentran los taninos en mayor concentración.

Se determinó que la concentración de celulosa no presentó una variación significativa en función de la altura. La concentración de los extraíbles no varía significativamente en función de la altura, así como tampoco lo hace la concentración de taninos. La concentración de cenizas tampoco presenta variación en función a la altura.

La humedad se analiza por aparte, ya que no es un componente propio de la estructura de la madera, pero importante conocer su contenido antes de su uso para evitar problemas que modifiquen las características físicas, mecánicas y químicas que se puedan producir en los tratamientos; por ello, para trabajar la madera se requiere un porcentaje de humedad menor al 6%. La concentración de humedad es la única que presentó variación significativa según la variación de alturas.

La caracterización química de la madera de Teca no demostró variación significativa en la concentración de sus componentes químicos en función de la altura, por lo tanto, se aprobó la hipótesis nula, H_0 .

HIPÓTESIS

Es posible realizar una caracterización química de los componentes lignina, celulosa, extraíbles y taninos. Y encontrar variaciones de composición en función de la distribución por altura del árbol de Teca (*Tectona grandis L.f.*).

HIPÓTESIS ESTADÍSTICA

Hipótesis Nula

No existe diferencia significativa en la concentración, como porcentaje en peso, de los componentes químicos seleccionados en función de las diferentes alturas establecidas del fuste o tronco, de la especie Teca (*Tectona grandis L.f.*)

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

Hipótesis Alternativa

Existe diferencia significativa en la concentración, como porcentaje en peso, de los componentes químicos seleccionados a diferentes alturas del fuste o tronco, de la especie Teca (*Tectona grandis L.f.*)

$$E_i = 1,2,3 / \mu_1 \neq \mu$$

OBJETIVOS

- **General**

Determinar la composición química de la madera del primer raleo de Teca (*Tectona grandis L.f.*) a nivel de laboratorio, proveniente de la plantación del municipio de Patulul, Suchitepéquez.

- **Específicos**

1. Determinar la composición química de la madera de Teca (*Tectona grandis L.f.*), aislando y cuantificando sus componentes principales.
2. Evaluar el efecto que tiene la composición química en función de la altura basal del árbol de Teca (*Tectona grandis L.f.*).
3. Evaluar el efecto que tiene la composición química en función de la altura media del árbol de Teca (*Tectona grandis L.f.*).
4. Evaluar el efecto que tiene la composición química en función de la altura apical del árbol de Teca (*Tectona grandis L.f.*).
5. Realizar un análisis de varianza (ANOVA); para comprobar si los valores de la composición química de la madera varían, en función de la altura, de manera significativa.

INTRODUCCIÓN

La madera contiene gran variedad de compuestos orgánicos, pero siempre hay compuestos de mayor importancia por su abundancia en la misma o por conferir propiedades importantes en su procesamiento. La madera se compone, en su mayor parte, de celulosa, hemicelulosa, lignina, extraíbles, polisacárido, considerado como el componente orgánico más abundante en el planeta. La lignina es un polímero fenólico de gran estructura y peso molecular, constituye el segundo componente más abundante en la madera.

Los extraíbles son compuestos orgánicos de gran variedad que se encuentran en cantidades relativamente menores a los compuestos anteriores y son constituidos por resinas, polifenoles, gomas, azúcares, entre otros. El grupo de polifenoles más significativo son los taninos que precipitan a las proteínas y evitan la putrefacción de las pieles por medio del curtimiento.

Las cenizas se encuentran en mínimas cantidades y están constituidos por componentes inorgánicos, tales como magnesio, sílice, calcio y otros minerales. La humedad de la madera constituye el contenido de agua en la materia misma y se puede representar su contenido en base húmeda o base seca.

El bosque guatemalteco tiene un uso insostenible y no presenta la relevancia económica que se espera, pues sólo aporta el 2% del PIB en Guatemala, a pesar de las características del suelo y clima, de la enorme biodiversidad y otros muchos recursos con que cuenta la nación.

La información que se genere por medio de este documento, con los otros componentes, físico, mecánico y anatómico, servirá para realizar una posterior evaluación del uso industrial de la madera de la especie a tratar para así poder ampliar el campo en donde se ha utilizado y tratar de dar el uso correcto a la madera.

1. MARCO TEÓRICO

La madera es una sustancia dura y resistente que constituye el tronco de los árboles; se ha utilizado durante miles de años como combustible, materia prima para la fabricación de papel, mobiliario, construcción de viviendas y una gran variedad de utensilios para diversos usos. Este noble material, fabricado por la naturaleza con un elevado grado de especialización.

La madera debe sus atributos a la complejidad de su estructura, con propiedades y características que dependen no sólo de su composición sino de su constitución, la manera en que están colocados u orientados los diversos elementos que la forman.

La madera no es un material homogéneo, está formado por diversos tipos de células especializadas que forman tejidos. Estos tejidos sirven para realizar las funciones fundamentales del árbol; conducir la savia, transformar y almacenar los alimentos. Por último, formar la estructura resistente o portante del árbol.

1.1 Estructura de la madera:

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

El origen vegetal de la madera, hace de ella un material con características peculiares que la diferencia de otros de origen mineral.

1.1.1 Estructura Macroscópica de la madera:

La madera posee diversos elementos característicos que lo forman, y además, se trata de un material homogéneo. Si se observa el tronco de un árbol, se ve que tiene forma casi cilíndrica, es decir, una forma troncocónica; y que está formado por sucesivas capas superpuestas, llamadas anillos.

En primer lugar se aprecia que entre la madera y la corteza existe una capa generatriz, llamada cambium, que produce madera hacia el interior y corteza hacia el exterior. En cada período vegetativo se forma una nueva capa o anillo que cubre la anterior.

La Médula es la parte central del árbol. Constituida por tejido flojo y poroso. Tiene un diámetro muy pequeño. Madera vieja y normalmente agrietada. Se suele desechar en los procesos de elaboración de la madera.

El Duramen es la madera de la parte interior del tronco. Constituido por tejidos que han llegado a su máximo desarrollo y resistencia. De coloración, a veces, más oscura que la exterior. Madera adulta y compacta. Es aprovechable. La duraminización, la transformación de albura a duramen, de la madera se caracteriza por una serie de modificaciones anatómicas y químicas, oscurecimiento, aumento de densidad y mayor resistencia frente a los ataques de los insectos.

El Albura se encuentra en la parte externa del tronco, bajo la corteza. Constituida por tejidos jóvenes en período de crecimiento (zona viva). Contiene mucha savia y materias orgánicas. De coloración más clara que el duramen, más porosa y más ligera, con mayor riesgo frente a los ataques bióticos.

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)
- Hacia el exterior: Liber

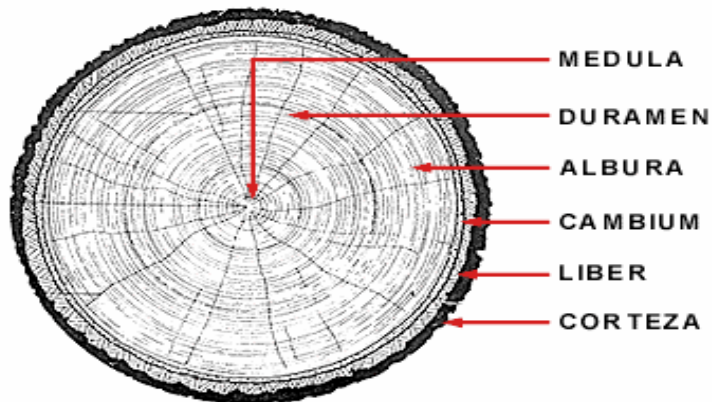
El Liber es la parte interna de la corteza. Es filamentosa y poco resistente. Madera embrionaria viva.

La Corteza es la capa exterior del tronco. Tejido impermeable que recubre el liber y protege al árbol.

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. Ejercen una función de trabazón. Almacenan y difunden las materias nutritivas que aporta la savia descendente. 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. Por ello constituyen las zonas de rotura a comprensión, cuando se ejerce el esfuerzo paralelamente a las fibras.

Los anillos anuales corresponde al crecimiento anual, consta de dos zonas claramente diferenciadas: Una formada en primavera: predominan en ella los vasos gruesos que conducen la savia bruta hasta las hojas. Color claro, pared delgada y fibras huecas y blandas. El otro formado en verano: tienen los vasos más pequeños y apretados. Sus fibras forman el tejido de sostén. Color oscuro denso y fibras de paredes gruesas.

Figura 1. Diagrama de estructura Macroscópica de la madera.



Fuente: Referencia Electrónica 1

1.1.2 Estructura Microscópica de la madera

Como se ha visto la madera no es un material homogéneo, está formado por diversos tipos de células especializadas que forman tejidos. Estos tejidos sirven para realizar las funciones fundamentales del árbol; conducir la savia, transformar y almacenar los alimentos y formar la estructura resistente o portante del árbol. La heterogeneidad de la madera será, en parte, la causa de sus propiedades.

Se puede considerar la madera como un conjunto de células alargadas en forma de tubos, paralelos al eje del árbol, muy variables, tanto en longitud y forma, como en el espesor de sus paredes y en las dimensiones interiores.

Estas células 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. La variedad de tipos de células y la forma de unirse, definen la infinidad de especies diferentes de madera que existen.

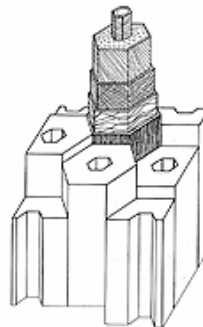
Las paredes de los tubos están formadas por una serie de capas compuestas por microfibrillas de celulosa enrolladas helicoidalmente alrededor del eje con inclinación diferente en cada capa, y todas ellas, embebidas en un material amorfo. Prácticamente insoluble, que es la lignina.

Todo ello hace de la madera un material resistente y ligero, que puede competir favorablemente con otros materiales utilizados en la construcción, en cuanto a la relación resistencia-peso específico

Es muy habitual asimilar estas células a un pilar hueco de hormigón armado, en la que la lignina, hace las veces de hormigón y las microfibrillas de celulosa, las del acero.

Figura 2. Representación de estructura Microscópica de la madera.

Analogía de la madera con el concreto armado.



Fuente: Referencia Electrónica 1

1.1.2.1 Componente de la estructura Microscópica de la madera

En el sentido axial se distinguen:

a) 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.

b) 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).

c) 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.

Esta especialización entre estructura y función sólo existe en los árboles frondosos; en los resinosos, todas las fibras son de carácter especial, llamadas traqueidas, de paredes más o menos espesas según la época del año en que se han formado.

En el sentido radial hay menos células, y estas se disponen por bandas o láminas delgadas (radios medulares), intercaladas entre las fibras y los vasos, a los que cruzan en ángulo recto, dirigiéndose desde la corteza hasta el centro del árbol.

En esas bandas de células llamadas radios celulares o mallas, almacenan y difunden, como las células del parénquima, las materias nutritivas que arrastra la savia descendente. En ciertas especies se encuentran en ambos sentidos, axial y radial, unos canales secretores de resina.

De lo anterior se desprende que la madera es un material heterogéneo y anisótropo, por tanto, sus propiedades variarán según la dirección que se considere.

1.2 Propiedades físicas de la madera:

Las principales propiedades de la madera son su resistencia, su dureza, su rigidez y su densidad. Esta última suele indicar propiedades mecánicas, ya que cuanto más densa es la madera, su composición es más fuerte y dura. Entre sus cualidades resalta su resistencia a la compresión –que puede llegar a ser superior a la del acero- a la flexión, al impacto y a las tensiones.

1.2.1 Anisotropía

Dado que la madera es un material formado por fibras orientadas en una misma dirección, es un material anisótropo, es decir, que ciertas propiedades físicas y mecánicas no son las mismas en todas las direcciones que pasan por un punto determinado, si no que varían en función de la dirección en la que se aplique el esfuerzo.

Se consideran tres direcciones principales con características propias:

a) Dirección axial: Paralela a las fibras y por tanto al eje del árbol. En esta dirección es donde la madera presenta mejores propiedades.

b) Dirección radial: Perpendicular al axial, corta el eje del árbol en el plano transversal y es normal a los anillos de crecimiento aparecidos en la sección recta.

c) Dirección tangencial: Localizada también en la sección transversal pero tangente a los anillos de crecimiento o también, normal a la dirección radial.

1.2.2 Humedad de la madera. Relaciones agua-madera.

Es la propiedad más importante, pues influye sobre todas las demás, propiedades físicas, mecánicas, mayor o menor aptitud para su elaboración, estabilidad dimensional y resistencia al ataque de seres vivos.

El agua es el vehículo de transporte que utilizan las plantas para su alimento, esto, unido a la higroscopicidad de la madera, hace que esta tenga normalmente en su interior cierta cantidad de agua, que es necesario conocer antes de su uso, debido a las modificaciones que produce en las características físicas y mecánicas.

El agua en la madera, puede estar presente de tres formas diferentes:

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

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

c) Agua libre: Es la que llena el lumen de las células o tubos (vasos, traqueidas, etc.) Es absorbida por capilaridad.

El agua libre, una vez perdida por la madera, ya no puede ser recuperada a partir de la humedad atmosférica. Para recuperarla, habrá de ser por inmersión directa en el agua. El agua libre no tiene mas repercusión que la ocupación física de los huecos, y por consiguiente no influye en la hinchazón o merma de la madera ni en las propiedades mecánicas.

Las dos últimas, impregnación y libre son las que constituyen la humedad de la madera. La humedad es la cantidad de agua que contiene la madera expresada en % de su peso en estado anhidro o húmedo.

1.2.3 Contenido de humedad:

Definimos como contenido de humedad o simplemente humedad de la madera h , a la relación del peso del agua contenida en la madera, al peso de la madera anhidra y se calcula de la siguiente forma:

$$h = \frac{Ph - Po}{Po} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

En la que Ph representa el peso de la madera que estamos estudiando, Po el peso de la madera anhidra y se multiplica por 100 para así obtener el % de contenido de humedad de la madera referida al peso seco.

En algunos casos (industria de la pasta para papel), interesa obtener el % de contenido de humedad de la madera referida al peso húmedo con lo que la fórmula para obtenerlo será:

$$x = \frac{Ph - Po}{Ph} \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

La humedad no es constante en todo el espesor de la pieza, siendo menor en el interior y teniendo más humedad la albura que el duramen.

La madera contiene más agua en verano que en invierno. Es un material higroscópico, lo cual significa que absorbe o desprende agua en función del ambiente que le rodea.

Expuesta al aire pierde agua y acaba estabilizándose a una humedad que depende de las condiciones del ambiente: temperatura y humedad.

Si estas condiciones varían, también variará su contenido de humedad. La humedad de la madera tiende a estar en equilibrio con el estado del aire ambiente. Este equilibrio no es el mismo si la madera está secándose, que si está absorbiendo agua.

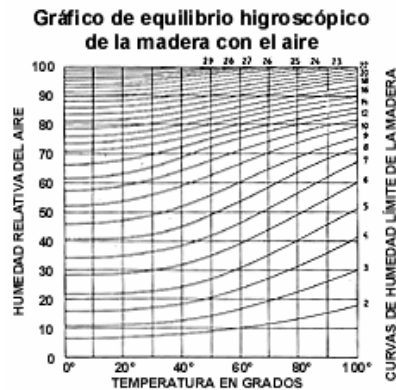
El primer tipo de agua que elimina la madera es el agua libre; esta pérdida se hace prácticamente sin variación de las características físicas - mecánicas (varia su densidad aparente).

Desaparecida el agua libre, queda el agua de impregnación de la pared celular (satura las fibras de la madera) y que al disminuir por medio de la evaporación o secado modifica las propiedades físico - mecánicas (su dureza y la mayoría de las resistencias mecánicas aumentan) y el volumen de la pieza de madera disminuye como consecuencia de la disminución de volumen de las paredes de cada una de sus células.

La humedad de la madera depende, ahora, de las condiciones higrotérmicas del ambiente. A cada par de valores de temperatura y humedad relativa del aire corresponde, en la madera, una humedad comprendida entre el 0% y el 30% (punto de saturación de las fibras, aproximadamente), que recibe el nombre de "Humedad de Equilibrio Higroscópico". Este "Punto de saturación de las fibras " (P.S.F.) o más exactamente Punto de saturación de la pared celular, nos indica la máxima humedad que puede contener una madera sin que exista agua libre.

Una vez que haya descendido de este punto, la madera no volverá a tomar agua libre si no es por inmersión.

Figura 3. Gráfica de equilibrio Higroscópico de la madera con el aire.



Fuente: Referencia Electrónica 1.

Este P.S.F. es de gran importancia, ya que supone una frontera a las variaciones dimensionales, variación de resistencias, etc. Su valor es del orden del 30%, pudiendo sufrir pequeñas variaciones de unas especies a otras.

Las maderas con P.S.F. bajo, tienen estabilizadas sus características mecánicas cuando son empleadas en atmósferas húmedas. Por el contrario si dichas maderas se emplean en atmósferas de humedad baja, se deformarán cuando varíe dicha humedad. (Maderas nerviosas). Las maderas de P.S.F. altos son, en general, utilizadas en un medio con un % de humedad muy inferior a la que corresponde al P.S.F., excepto en el caso en que se encuentren sumergidas. Se moverán siempre bajo la influencia de las variaciones de humedad pero son, en general, poco nerviosas.

Tabla I. Cuadro de estado de la madera, según el % de humedad.

Tipo de Madera	% Humedad
Madera empapada	Hasta un 150% de humedad aproximadamente (sumergida en agua)
Madera verde	Hasta un 70% de humedad (madera en pie o cortada en monte)
Madera saturada	30% de humedad (sin agua libre, coincide con P.S.F.)
Madera semi-seca	Del 30% al 23% de humedad (madera aserrada)
Madera comercialmente seca	Del 23% al 18% (durante su estancia en el aire)
Madera secada al aire	Del 18% al 13% (al abrigo de la lluvia)
Madera desecada (muy seca)	Menos del 13% (secado natural o en clima seco)
Madera anhidrida	0% (en estufa a 103° C. Estado inestable)

Fuente: Referencia Electrónica 1

1.2.4 Hinchazón y merma de la madera

Es la propiedad que posee la madera de variar sus dimensiones y por tanto, su volumen cuando su contenido de humedad cambia.

Cuando una madera se seca por debajo de P. S. F., se producen unos fenómenos comúnmente llamados "movimientos, trabajo o juego de la madera"; Si el fenómeno es de aumento de volumen, se designa con el nombre de "Hinchazón" y si ocurre el fenómeno inverso de disminución de volumen "Merma".

El aumento de volumen con la humedad es, prácticamente, proporcional a la misma, hasta un punto que coincide aproximadamente con el 25% de humedad, sigue el aumento de volumen, pero con incrementos cada vez menores, hasta el punto de saturación de las fibras (PSF) a partir que el volumen permanece prácticamente constante, (deformación máxima).

La contracción volumétrica total, mide la contracción volumétrica entre los estados de saturación y anhidro.

$$B\% = \frac{V_s - V_o}{V_o} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

B%= Contracción volumétrica total.

V_s= Volumen de la probeta saturada de agua

V_o= Volumen de la probeta en estado anhidro.

La contracción volumétrica entre dos estados de humedad viene dado por el porcentaje de variación de volumen entre los dos estados.

La medida de contracción volumétrica no es suficiente para determinar la calidad de una madera. Es preciso saber como se comporta bajo la influencia de las variaciones de humedad próximas a la humedad normal, que es, en general, la que corresponde al ambiente de empleo de la madera.

Tabla II. Clase de madera respecto al % de contracción total.

Clase de Madera	% Contracción Total	Tipo de Comparación
Gran contracción	20 al 15%	Madera en rollo con grandes fendas de desecación que deberán aserrarse antes del secado (haya, fresno, roble)
Contracción media	15 al 10%	Madera en rollo con fendas medias, pudiendo ser conservada en rollo para apeos, postes, andamiaje. (resinosas, acacias, caoba de África)
Pequeña contracción	10 al 5%	Madera en rollo con pequeñas fendas que se puede secar antes de su despiece, desenrollo etc.(nogal, chopo etc.)

Fuente: Referencia Electrónica 1

1.2.5 Coeficiente de contracción volumétrica

Dicho coeficiente mide la variación del volumen de la madera cuando su humedad varía un 1%.

Este coeficiente $V\%$ (casi constante entre los estados anhidro y de saturación de las fibras) caracteriza las maderas:

$$V\% = \frac{V_h - V_o}{V_o \times H} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

H = Humedad de la madera.

Vo= Volumen en estado anhidro

Vh= Volumen con una humedad H%

a) Maderas de débil contracción $0,15\% < V < 0,35\%$ (poca nerviosa) maderas de carpintería y ebanistería.

b) Maderas de contracción media: $0,35\% < V < 0,55\%$ (maderas de construcción).

c) Maderas de fuerte contracción: $0,55\% < V < 1\%$ (nerviosa) emplear en medios de humedad constante.

1.2.6 Punto de saturación de las fibras (P.S.F.)

El punto de saturación de las fibras (P.S.F.) representa el % de humedad de la madera cuando se ha alcanzado la máxima hinchazón; si disminuye la humedad también lo hará el volumen, pero si aquella aumenta, el volumen permanece prácticamente constante:

Tabla III. Clasificación de la madera con base al punto de saturación.

Clase	Punto Saturación
Bajo	Inferior a 25%
Normal	de 25 a 35%
Elevado	Superior a 35%

Fuente: Referencia Electrónica 1

1.2.7 Peso específico

Por definición el peso específico es:

$$\text{Peso específico} = \frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Al ser un material poroso podemos considerar o no los poros para determinar el peso específico. Dada esta naturaleza porosa y las variaciones de peso y volumen, en función del contenido de humedad, hay que especificar las condiciones en que se verifican las medidas del peso específico.

Si se consideran los poros se contempla el volumen aparente y se obtiene el peso específico aparente

Si se considera solo la masa leñosa (deducimos el volumen de poros) obtenemos el peso específico real.

Se establecen como puntos de comparación los valores de 0% y 12% de humedad. Al primero se llama peso específico anhidro y al segundo es la humedad normal, según normas internacionales.

El peso específico de la pared celular (peso específico real, sin considerar los poros), es prácticamente constante en todas las especies, y es del orden de $1,55 \text{ gr} / \text{cm}^3$

Este es el límite, máximo teórico, que podría alcanzar una madera, en la que los huecos celulares los hubiese reducido a cero. Las diferencias entre las maderas se deben pues a la mayor o menor proporción de dichos huecos.

$$P_{real} = \frac{P}{V_{real}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

P_{real} = Peso específico real

P = Peso

V_{real} = Volumen real

- Dado que puede variar el contenido de humedad mucho, el agua puede hacer variar el peso específico.

- Como el contenido de agua nos hace variar el volumen, también nos cambia el peso específico.

- Por todo ello, el peso específico debe referirse siempre, si es posible a la humedad del 12% aceptada internacionalmente.

Esto no quiere decir que siempre tengamos que hacer el cálculo con maderas con el 12% de humedad, sino que podemos hacerlo con cualquier humedad y referirlo después al 12% mediante la fórmula siguiente.

$$P_{12} = P_h - (h - 12)P_h \frac{1 - V}{100} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

P_{12} = Peso específico aparente con 12% de humedad.

P_h = Peso específico para una madera con el h% de humedad.

V = Coeficiente de contracción volumétrica.

1.2.8 Higroscopicidad

Higroscopicidad es la variación del peso específico, cuando la humedad varía un 1%, se le denomina higroscopicidad :

$$h = \frac{(1 - V) \times Pe}{100} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

V = coeficiente de contracción volumétrica

h = higroscopicidad

Pe = peso específico

1.2.9 Homogeneidad

Una madera es homogénea cuando su estructura y la composición de sus fibras resulta uniforme en cada una de sus partes (Ejemplos: Peral, manzano, tilo, boj, arce, etc.)

Son poco homogéneas:

- Las maderas con radios medulares muy desarrollados (Ej. encina, fresno)

- Las maderas con anillos anuales de crecimiento con notables diferencias entre la madera de primavera y la de otoño (Ej. abeto,...)

1.2.10 Durabilidad

Es una propiedad muy variable, pues depende de muchos factores: el medio ambiente, la especie de la madera, la forma de apeo, las condiciones de la puesta en obra, la forma de secado, las alteraciones de la humedad y sequedad, el contacto con el suelo (empotrada en terrenos arcillosos y en arena húmeda se conserva mucho tiempo, en arenas y calizas, duran poco), el agua (sumergida en agua dulce se conserva mucho tiempo), su tratamiento antes de ser usada, su protección una vez puesta en obra (pinturas, etc.) A más densidad mayor duración. Son maderas durables: La encina, el roble, la caoba, el haya, tec.

1.2.11 Inflamación y combustión

Las maderas arden, lo cual desde el punto de su utilización como combustible, es una cualidad, pero para su empleo en la construcción y decoración es un defecto.

Las reacciones que se producen son las siguientes:

La celulosa de la madera, constituyente de la fibra vegetal, al arder se combina con el oxígeno del aire, dejando un pequeño residuo ceniciento, procedente de la lignina y de las sales minerales; cuando el oxígeno es abundante y la temperatura suficiente la destrucción es casi total, pero si la combustión es incompleta por carencia de estos factores, la celulosa sufre una deshidratación y la madera queda convertida en carbón vegetal, carente de resistencia.

Con el pintado y mejor con la impregnación de sustancias ignífugas, se reduce considerablemente la inflamabilidad y combustibilidad de las maderas.

1.3 Propiedades mecánicas de la madera:

1.3.1 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.

La manera de medir deformaciones es a través de su módulo de elasticidad, según la fórmula:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad

σ = tensión

ε = deformación

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 4000 a 5000 Kg / cm.2

El valor del módulo de elasticidad E en el sentido de las fibras será de 80.000 a 180.000 Kg / cm.2

1.3.2 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 esta 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.

1.3.3 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 mas duras se pulen mejor.

1.3.4 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.

1.3.5 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 nos interesa que la madera que vamos a usar tenga una gran resistencia a la hienda.

1.3.6 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.

1.3.7 Resistencia al choque

Nos 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.

Máxima axial

Mínima 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.

1.3.8 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.

1.3.8.1 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.

- Inclínación 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.

1.4 Composición Química de la madera:

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 resto 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: % restante

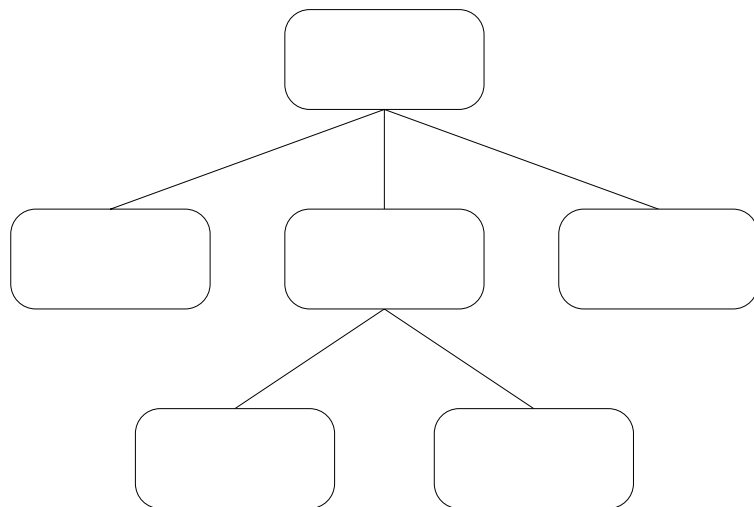
La madera está compuesta de forma general por tres grupos de sustancias, las que conforman la pared celular, donde se encuentran las principales macromoléculas, celulosa, hemicelulosa (poliosas) y ligninas, que están presente en todas las maderas; el otro grupo lo conforman las sustancias de baja masa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

La madera está formada por componentes estructurales y no estructurales, los estructurales son los que componen la pared celular y los no estructurales son denominados como sustancias extraíbles.

La proporción de estos componentes varía con la especie, entre la madera de árboles de la misma especie y en diferentes partes del propio árbol, en la madera de la albura y duramen, en dirección radial y longitudinal.

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.

Figura 4. Esquema de la composición Química de la madera



Fuente: Referencia Electrónica 2

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

Según estudios realizados la composición química de la madera, es como la muestra la siguiente tabla.

Tabla IV. Composición Química de la madera (% en peso)

Componentes	Coníferas	Latifoliadas
Holocelulosa	59.8-80.9	71.0-89.1
Celulosa	30.1-60.7	31.1-64.4
Poliosas	12.5-29.1	18.0-41.2
Pentosas	4.5-17.5	12.6-32.3
Lignina	21.7-37.0	14.0-34.6
Extractivos, (agua caliente)	0.2-14.4	0.3-11.0
Extractivos, (agua fría)	0.5-10.6	0.2-8.9
Extractivos, (éter)	0.2-8.5	0.1-7.7
Cenizas	0.02-1.1	0.1-5.4

Fuente: Referencia 4.

1.4.1 Celulosa

La 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 terrestres.

La celulosa es la sustancia más frecuente en la pared de las células vegetales, ya descubierta en 1838. La celulosa es la biomolécula más abundante de los seres vivos.

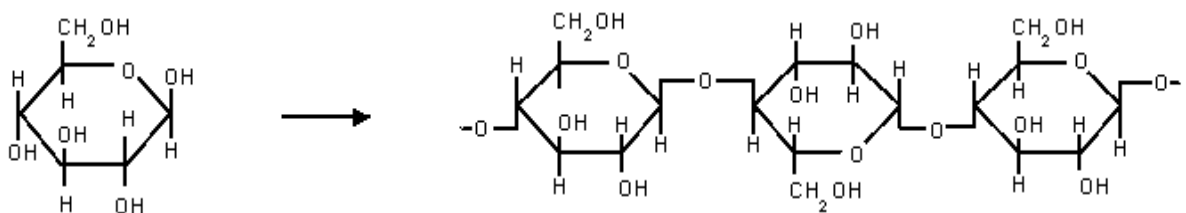
La celulosa constituye la materia prima del papel y de los tejidos de fibras naturales. También se utiliza en la fabricación de explosivos, celuloide, seda artificial, barnices. Está presente en las plantas solamente los rumiantes lo ingieren.

1.4.1.1 Estructura Química de la Celulosa

La celulosa se forma por la unión de moléculas de β -glucosa, mediante enlaces β -1,4-O-glucosídico. Es una hexosana que por hidrólisis da glucosa. La celulosa es una larga cadena polimérica de peso molecular variable, con fórmula empírica $(C_6H_{10}O_5)_n$, con un valor mínimo de $n = 200$.

La celulosa tiene una estructura lineal o fibrosa, en la que se establecen múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas de glucosa, haciéndolas impenetrables al agua, lo que hace que sea insoluble en agua, y originando fibras compactas que constituyen la pared celular de las células vegetales.

Figura 5. Estructura Química de la Celulosa



Fuente: Referencia Electrónica 3

1.4.1.2 Función de la Celulosa

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 ejemplo más puro de celulosa es el algodón con un porcentaje mayor al 90%. El cáñamo también es una fuente de celulosa de alta calidad. A pesar de que está formada por glucosas, los animales no pueden utilizar a la celulosa como fuente de energía, ya que no cuentan con la enzima necesaria para romper los enlaces β -1,4-glucosídicos, sin embargo, es importante incluirla en la dieta humana (fibra dietética) porque al mezclarse con las Heces, facilita la digestión y defecación, así como previene los malos gases.

En el intestino de los rumiantes, de otros herbívoros y de termitas, existen microorganismos, muchos metanógenos, que poseen una enzima llamada celulasa que rompe el enlace β -1,4-glucosídico y al hidrolizarse la molécula de celulosa quedan disponibles las glucosas como fuente de energía.

Hay microorganismos (bacterias y hongos) que viven libres y también son capaces de hidrolizar la celulosa. Tienen una gran importancia ecológica, pues reciclan materiales celulósicos como papel, cartón y madera. De entre ellos, es de destacar el hongo *Trichoderma reesei*, capaz de producir cuatro tipos de celulasas: las 1,4- β -D-glucancelobiohirolasas CBH i y CBH II y las endo-1,4- β -D-glucanasa EG I y EG II. Mediante técnicas biotecnológicas se producen esas enzimas que pueden usarse en el reciclado de papel, disminuyendo el coste económico y la contaminación.

1.4.2 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.

1.4.2.1 Estructura Química de la Hemicelulosa

Las maderas están conformadas por azúcares neutros de seis átomos de carbono: glucosa, manosa, galactosa y de cinco átomos de carbono: la xilosa y arabinosa. Algunas poliosas contienen adicionalmente ácido urónico. Se pueden encontrar los mananos, glucomananos, glucanos, xiloglucanos, ramnogalactouronanos, y en los xilanos encontramos los arabinoxilanos y O-acetil- 4- O- metilglucuronoxilano..

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.

En las maderas de fibra corta o latifolias, sólo pueden separarse dos tipos de hemicelulosa en cantidades significativas y por extracción alcalina directamente de la madera, ellas son los xilanos y los arabinogalactanos.

En las latifolias puede encontrarse el O-acetil- 4-O- metilglucuronoxilano que son las más abundantes, cantidades de glucomananos, entre 1-3% de arabinogalactano, y aparecen glucanos entre 0-3% con enlaces β 1-3.

Las hemicelulosas son importantes en la madera y su localización cobra singular significación, pues todas las células contienen de 50-60% de carbohidratos a excepción de las células del parénquima de las latifolias que pueden llegar a poseer hasta 80% de O-acetil-4-O-metilglucuronoxilano.

Se conoce que las hemicelulosas se encuentran a lo largo de toda la pared celular, desde la lámina media, hasta la capa S_3 de la pared secundaria. Las hemicelulosas presentes en estas paredes son: β (1-3), β (1-4) glucanos, calosa β (1-3), que normalmente se encuentran en pequeñas cantidades y se acumulan como respuesta a una lesión o durante la deformación de las placas cribosas en el floema.

1.4.2.2 Función de la hemicelulosa

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

Las hemicelulosas 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.

1.4.3 Lignina

La 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.

Se caracteriza por ser un complejo aromático (no carbohidrato) del que existen muchos polímeros estructurales (ligninas). Resulta conveniente utilizar el término lignina en un sentido colectivo para señalar la fracción lignina de la fibra. Después de los polisacáridos, la lignina es el polímero orgánico más abundante en el mundo vegetal. Es importante destacar que es la única fibra no polisacárido que se conoce.

Las ligninas son polímeros insolubles en ácidos y solubles en álcalis fuertes como el hidróxido de sodio, que no se digieren ni se absorben y tampoco son atacados por la microflora del colon. Pueden ligarse a los ácidos biliares y otros compuestos orgánicos (por ejemplo, colesterol), retrasando o disminuyendo la absorción en el intestino delgado de dichos componentes.

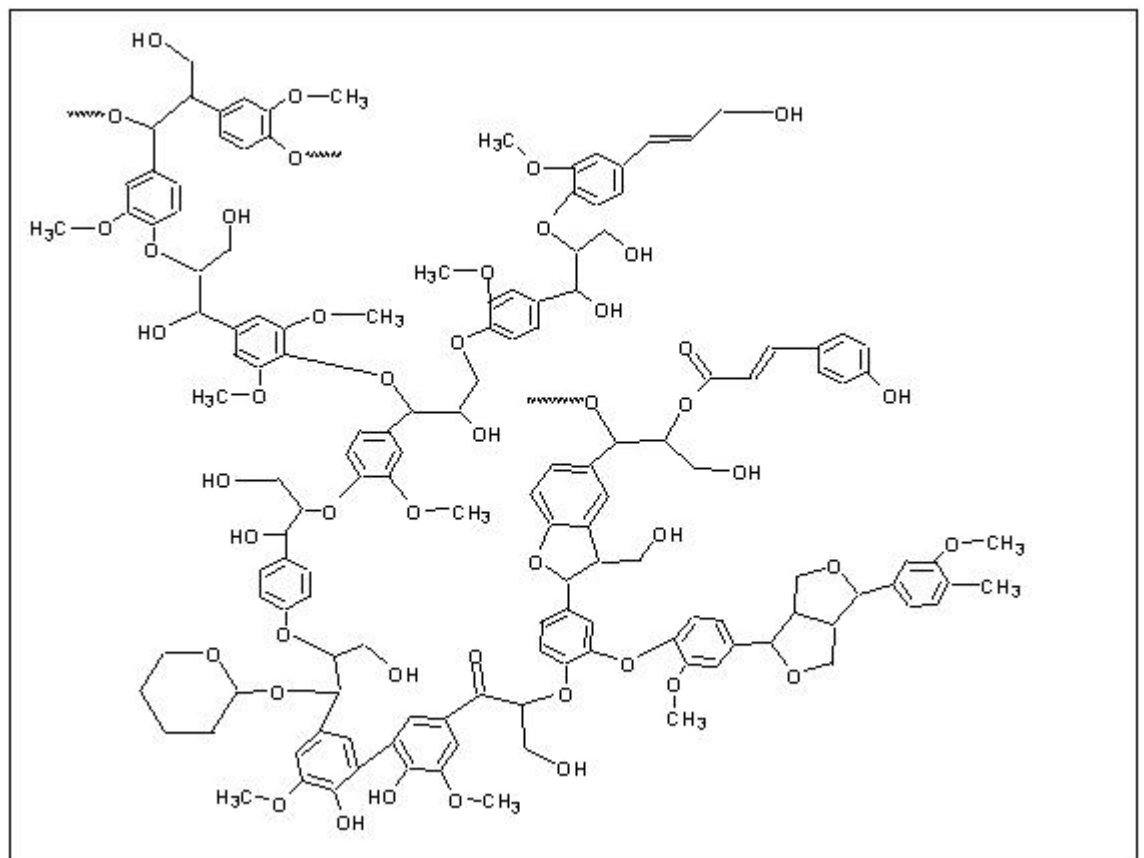
El grado de lignificación afecta notablemente a la digestibilidad de la fibra. La lignina, que aumenta de manera ostensible en la pared celular de la planta con el curso de la maduración, es resistente a la degradación bacteriana, y su contenido en fibra reduce la digestibilidad de los polisacáridos fibrosos.

1.4.3.1 Estructura Química de la Lignina

La molécula de lignina es una molécula, con un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropiólicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico). El acoplamiento aleatorizado de estos radicales da origen a una estructura tridimensional, polímero amorfo, característico de la lignina.

La lignina es el polímero natural más complejo en relación a su estructura y heterogenicidad. Por esta razón no es posible describir una estructura definida de la lignina; sin embargo, se han propuesto numerosos modelos que representan su estructura.

Figura 6. Estructura generalizada de Lignina



Fuente: Referencia Electrónica 7.

1.4.3.2 Función de la Lignina

Este componente de la madera realiza múltiples funciones que 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

1.4.4 Componentes no estructurales de la madera

1.4.4.1 Taninos

Los taninos son sustancias que se producen en diversas partes de las plantas, como son: corteza, frutos, hojas, raíces y semillas; a pesar de tener un origen común, la especificidad de las plantas le da a los taninos diferencias en color, calidad y concentración.

Los taninos conocidos también por ácidos tánicos y por azúcares, son glúcidos con propiedades colorantes, solubles en agua y en alcohol, que se encuentran, en mayor o menor cantidad, en el interior de todas las plantas en estado sólido. Se encuentran en los poros de la superficie de la madera.

Los taninos son compuestos polifenólicos, mas o menos complejos, de origen vegetal, masa molecular relativamente elevada, sabor astringente, conocidos y empleados desde hace muchos siglos por su propiedad de ser capaces de convertir la piel en cuero, es decir de curtir las pieles. Esto se debe a su capacidad para unirse a macromoléculas como hidratos de carbono y proteínas. Precipitan con sales de metales pesados, proteínas y alcaloides.

Etimológicamente, el término viene de tanne que es el nombre del abeto en alemán, y de cuya corteza se abastecía tradicionalmente la industria de la piel en Alemania, líder en el sector

1.4.4.1.1 Estructura Química de los Taninos

La fórmula $C_{14}H_{14}O_{11}$, considerada por lo general como la del tanino común, es tan sólo una aproximación. Los taninos se encuentran en muchos árboles y las mejores materias primas para su obtención las constituyen las agallas de roble y la corteza del zumaque.

Los taninos tienen un ligero olor característico y un color que va desde el amarillo al castaño oscuro. La exposición a la luz oscurece su color. Todos los taninos tienen un sabor amargo y son astringentes. Se disuelven con facilidad en agua, acetona o alcohol, pero son insolubles en benceno, éter o cloroformo. Cuando se calientan a 210 °C, se descomponen, y producen pirogalol y dióxido de carbono.

La propiedad química que determina la mayoría de sus aplicaciones es la rápida precipitación que se produce al mezclarlos con albúmina, con gelatina y con un buen número de sales alcaloideas y metálicas. La capacidad de los taninos de transformar las proteínas en productos resistentes a la descomposición determina su uso como agentes curtidores. Las sales férricas reaccionan con los taninos y dan lugar a productos negros azulados que se utilizan como tintas. Los taninos se emplean como mordientes para la aplicación de tintes en tejidos, aprestos para papeles o sedas y coagulantes de gomas. Las propiedades de precipitación de los taninos se utilizan para clarear o limpiar vinos y cerveza. Resultan muy útiles en medicina, porque pueden usarse como astringente.

1.4.4.1.2 Clasificación de los Taninos

Clásicamente se han distinguido dos tipos de taninos.

1.4.4.1.2.1 Taninos Hidrolizables

Taninos hidrolizables, llamados también gálicos o pirogálicos. Estos taninos como su denominación indica se hidrolizan con facilidad tanto por ácidos y álcalis por vía enzimática y son generalmente de formación patológica. Se localizan en algunas Dicotiledóneas especialmente en Fagaceae, Anacardiaceae y Leguminosae. Se encuentran en este grupo los taninos gálicos propiamente dichos que son polímeros del ácido gálico, ésteres de un poliol, generalmente de la glucosa con varias moléculas de ácido gálico y los taninos elágicos o elagitaninos también ésteres pero en este caso del ácido hexahidroxidifénico y sus derivados. El ácido hexahidroxidifénico se forma por acoplamiento oxidativo de dos moléculas de ácido gálico.

1.4.4.1.2.2 Taninos condensados o Proantocianidinas (no hidrolizables)

Se conocen también como no hidrolizables, ya que se hidrolizan con dificultad y por el contrario, el tratamiento con calor y ácidos minerales origina polímeros de alto peso molecular (flobáfenos). Este tipo de taninos se producen en el metabolismo normal de los vegetales por lo que se consideran fisiológicos y se encuentran ampliamente repartidos en el reino vegetal.

Químicamente se forman por condensación de catequinas o catecoles (flavanoles) con uniones directas C-C entre las moléculas, generalmente en 4-8 ó 4-6 y no contienen azúcares en su estructura. Biogenéticamente proceden del metabolismo de los flavonoides, se forman a partir de una flavanona por hidroxilación en el C-3.

1.4.4.2 Sustancias extraíbles

Además de celulosa, hemicelulosas y lignina, los árboles contienen otras sustancias en menor proporción, que no entran en la composición de las paredes celulares. Estos son los extractivos. Químicamente están compuestos por hidrocarburos alifáticos y aromáticos, terpenos, fenoles, ácidos grasos y resinosos, resinas, grasas, esterinas, aceites esenciales y otros. La cantidad y composición de ellos depende de la especie, la parte del árbol, la época del año, las condiciones de crecimiento y otros factores.

Todas las especies de madera y la mayoría de los vegetales contienen cantidades variables de algunas sustancias químicas diferentes a los carbohidratos y a la lignina que constituyen la pared celular. De acuerdo con el punto de vista con el que se estén tratando, reciben diversos nombres:

- Componentes extraños de la madera, porque son diferentes a los compuestos que constituyen la pared celular.

- Sustancias extraíbles o solubles.

- Extractivos

- Sustancias volátiles, porque muchas de estas sustancias son volátiles o imparten características de olor a la madera.

- Constituyentes menores

Los extraíbles que se encuentran en los tejidos vegetales son sustancias tales como terpenos, fenoles, taninos, minerales, azúcares, hidrocarburos alifáticos y aromáticos, ácidos alifáticos y aromáticos, esterinas, aceites esenciales, ácidos grasos y resinosos, resinas, grasas y otros.

Existe una considerable variación en la distribución de los extraíbles en un árbol; ellos se encuentran distribuidos en follaje, madera, corteza y raíces. La corteza y las raíces son las partes donde se encuentran en mayor concentración los extraíbles

1.4.4.2.1 Extractivos del follaje

Oscilan entre 30-36 %. Pueden dividirse en dos grandes grupos: las sustancias solubles en agua y los solubles en disolventes orgánicos

A. Sustancias solubles en agua

El follaje contiene considerable cantidad (hasta 30 %) de sustancias solubles en agua, los cuales pertenecen a diferentes clases de compuestos, que pudieran clasificarse de la siguiente forma: Vitaminas (C, B1, B2, B6, H, ácido fólico), compuestos nitrogenados (proteicos y no proteicos), ácidos, sustancias fenólicas, azúcares (mono y oligosacáridos) y cenizas (macro y microelementos)

B. Solubles en disolventes orgánicos

La composición química de las sustancias solubles en disolventes orgánicos es muy variada. En disolventes orgánicos fundamentalmente se extraen grasas, resinas y ácidos grasos, ésteres de estos ácidos, cera, fitoesterinas.

Según Tamchuk, tanto la cantidad como la composición de estas sustancias dependen del disolvente en que son extraídos. En la literatura aparecen bajo diferentes formas de nombrar: lípidos, sustancias solubles en grasas, sustancias resinosas, grasa bruta y otros.

Según Yagodin y las ideas actuales, las sustancias que forman los organismos vivos, insolubles en agua, pero solubles en disolventes orgánicos (cloroformo, éter, benceno y otros) y que contienen en sus moléculas radicales alquílicos superiores, se denominan lípidos. Estas sustancias son hidrocarburos, alcoholes, aldehídos, derivados de ácidos grasos (glicéridos, ceras, fosfo, glico, sulfolípidos), vitaminas solubles en grasas (A, D, E, K) y sus derivados, clorofila, carotenoides, esterinas, etc. La inclusión de estas sustancias en la composición de los lípidos se explica porque ellos con frecuencia se encuentran en las membranas y aparecen junto a los fosfolípidos y en los extractos con disolventes utilizados para la extracción de las grasas.

1.4.4.3 Aceites esenciales

Según Tamchuk, los aceites esenciales son productos de la actividad vital de las plantas formadas por mezclas complejas de diferentes sustancias, líquidas incoloras o ligeramente coloreadas de amarillo, con olor específico y sabor ardiente.

Según Jolkin, constituyen una mezcla de sustancias volátiles que pertenecen a diferentes clases de compuestos orgánicos. Predominan los terpenos y terpenoides oxigenados (alcoholes y ácidos), algunos fenoles, éteres, aldehídos, cetonas y lactonas. Los terpenos son hidrocarburos de composición $C_{10}H_{16}$ (derivados del isopreno C_5H_{10}). En los aceites esenciales aparecen monoterpenos, diterpenos ($C_{20}H_{32}$) y sesquiterpenos ($C_{15}H_{24}$).

Los aceites esenciales protegen al árbol de enfermedades causadas por hongos e insectos y la mayor utilización industrial la alcanzan en perfumería para proporcionar aroma a los productos. El contenido de aceite esencial es función de la edad del árbol, aumentando conforme la edad del árbol aumenta.

1.4.4.4 Componentes inorgánicos y cenizas

Los componentes inorgánicos o sustancias minerales, varían en el árbol en dependencia de la parte que se estudie. Altos contenidos pueden encontrarse en las hojas, ramas, corteza, raíces, por lo que es común encontrar diferencias entre las maderas de latifoliadas y las de coníferas; diferencias existen entre la madera joven y vieja. Las condiciones del suelo y la edad influyen en los contenidos de sustancias minerales.

Cuando la madera está seca y calentada alrededor de 280°C, comienza espontáneamente a fraccionarse, produciendo carbón más vapor de agua, ácido acético y compuestos químicos más complejos, fundamentalmente en la forma de alquitranes y gases no condensables, que consisten principalmente en hidrógeno, monóxido y bióxido de carbono.

Se deja entrar aire en el horno o fosa de carbonización para que parte de la madera se quemé, y el nitrógeno de este aire estará también presente en el gas.

El oxígeno del aire se consume en la quema de parte de la madera arriba de la temperatura de 280°C liberando energía, por lo que se dice que esta reacción es exotérmica.

Este proceso de fraccionamiento espontáneo o carbonización, continua hasta que queda sólo el residuo carbonizado llamado carbón vegetal. A menos que se proporcione más calor externo, el proceso se detiene y la temperatura alcanza un máximo de aproximadamente 400°C. Sin embargo, este carbón contiene todavía apreciables cantidades de residuos alquitranosos, junto con las cenizas de la madera original.

Usualmente se lleva a cabo la producción de cenizas en un rango de 580°C a 600°C según las normas para su determinación. El contenido de cenizas en el carbón es de alrededor 30% en peso, y el balance es carbono fijo, alrededor del 67-70%.

1.5 Generalidades de la especie (*Tectona Grandis*)

Tectona Grandis es originaria de Birmania, Tailandia y algunas partes de la India. Se ha identificado a Trinidad y Tobago como el primer país del continente americano donde fue introducida la especie; de ahí, fue distribuida a otros países. En América Central, por conveniencia, se identifican dos procedencias: Tennascrim (Birmania)- Trinidad y Tobago y Sri Lanka- Panamá.

En el área centroamericana, inicia la floración entre los cinco y los ocho años, a partir de esta fecha comienza 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 1250 a 2500 mm y altitudes entre los 0 y 1000 msnm.

Entre los factores limitantes más importantes para la especie se consideran los suelos poco profundos, compactados o arcillosos, con bajo contenido de calcio o magnesio, con pendiente, mal drenaje y altitudes mayores a 1000 msnm.

La madera posee gran resistencia al ataque de hongos e insectos; por sus excelentes características, se considera como una de las más valiosas del mundo.

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.

La teca es un árbol de la familia de las Verbenáceas 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.

1.5.1 Clasificación Científica

A. Nombre Científico: Tectona Grandis

B. Reino: Plantae

C. División: Magnoliophyta

D. Clase: Magnoliopsida

E. Orden: Lamiales

F. Familia: Verbenaceae

G. Género: Tectona

H. Nombres comunes: El nombre común mas 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.

1.5.2 Características de la Teca

La *Tectona grandis* es una especie latifoliada de la familia Verbenaceae. 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.

Las hojas son opuestas, grandes, de 11 a 85 cm de largo y de 6 a 50 cm de ancho, con pecíolos gruesos, limbos membranáceos o subcoriáceos, nervios prominentes en ambas caras. Inflorescencia en panículas erectas terminales de 40 cm hasta 1 m de largo. Pedicelos de 1 a 4 mm de largo. Brácteas grandes foliáceas. Bracteólas numerosas, linealanceladas. Flores de cáliz campanulado, color amarillo verdoso, estilo blanco amarillento, más o menos pubescente con pelos ramificados, estigma blanco amarillento bífido. Ovario ovado o cónico, densamente pubescente, con cuatro celdas.

Figura 7. Plantación de Teca.



Fuente: Referencia Electrónica 9.

1.5.3 Requerimientos Ambientales:

En su área de distribución natural la especie crece en sitios con temperaturas entre 13 °C y 35°C, con una media de 24 °C. Sin embargo, varios autores sugieren para un óptimo desarrollo, una temperatura media de 25°C. Asimismo, Rodríguez, indica que el ámbito puede ser entre 40°C y 12,5°C.

La experiencia en América Central, recomienda sin embargo, considerar límites térmicos observados en Honduras. El primero entre 25°C y 28°C clasificado como bueno y el segundo entre 20°C y 25°C clasificado como malo, porque fuera de estas condiciones la especie no prospera adecuadamente.

En general, se requiere una precipitación entre 1000 y 1800 mm/año. Sin embargo la experiencia en América Central indica que el rango varía entre 1250 y 2500 mm/año, con una estación seca bien definida de tres a cinco meses. En Centro América se ha plantado en sitios cuya precipitación varía de 889 hasta 3689 mm/año; situación un tanto similar a la de su sitio de origen, donde la precipitación va de 760 a 5080 mm/año.

Además prefiere los suelos de textura franco-arenosos o arcillosos con pH neutro o ácido.

1.5.4 Características de la madera:

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.

1.5.5 Factores limitantes

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.

1.5.6 Establecimiento

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. El tratamiento más utilizado es el secado y remojo alterno, hasta que inicie la germinación.

El trasplante se realiza en bancales o eras a un distanciamiento de 20 cm x 20 cm, donde las plantas permanecen de cuatro a 12 meses, para obtener pseudoestacas de 1 a 2 cm de diámetro, 5 a 15 cm de tallo y 15 a 25 cm de raíz. Para mejorar el color y vigor de las planta, se recomienda fertilizar con N, P, K, Ca, Mg y S (fórmula completa) utilizando 1,0 kg para cada 10 000 arbolitos en cada aplicación.

En plantación, la preparación del terreno y el control de malezas es vital, ya que la especie es exigente a la luz. También es sensible a la humedad y competencia por malezas, recomendándose al menos tres limpiezas el primer año, dos el segundo y una el tercer. La fertilización a nivel de plantación no puede recomendarse como una práctica rutinaria, debido a resultados contradictorios.

El espaciamiento para plantación tradicional ha variado entre 1,5 y 4,6 m en cuadro, siendo el de 3 x 3 m el más utilizado actualmente, mientras que para el sistema Taungya se usan espaciamientos mayores a los tres metros. La especie es también utilizada en sistemas agroforestales.

1.5.7 Manejo

Existen diferencias marcadas en cuanto a crecimiento, como consecuencia de las diversas calidades de sitio, edad, densidad de plantación y manejo. En general, se reporta un crecimiento anual que varía entre 10 y 25 m³/ha/año.

La evaluación de índice de sitio se ha basado en la determinación directa, a través de diferentes tipos de altura. Se consideran sitios buenos los que tiene más de 18 m de altura promedio, a una edad base de 10 años.

De las variables ambientales analizadas, la precipitación influye favorablemente en la calidad de sitio. En el cálculo de volumen y rendimiento, se ha utilizado principalmente, la altura y el d.a.p. para estimar el volumen con y sin corteza por calidad de sitio.

Para teca se han propuesto varios sistemas de aclareo basados en la altura total de los árboles, el índice de esparcimiento relativo de Hart (S%) y el área basal. En el primer caso se propone realizar un aclareo cuando los árboles alcancen ocho metros de altura, cortando en forma semimecánica el 50% de los árboles y la segunda intervención cuando la altura alcance los 15 m, dejando una densidad de 500 árboles/ha. Algunos autores han utilizado el índice de espaciado relativo de Hart (S%) para prescribir aclareos en un rango de 20 a 28%. Cuando se utiliza el área basal como criterio para realizar los aclareos, se deja que la plantación alcance 20 ó 25 m²/ha y se reduce de 14 a 17 m²/ha.

Generalmente, las podas son necesarias cuando se quiere madera libre de nudos, en estos casos se deben elegir los mejores árboles y podarlos hasta un tercio de la altura del árbol, aunque la teca, en densidades normales, presenta una buena poda natural.

La especie regenera en forma aceptable cuando los frutos caen en un suelo libre de malezas; también, rebrota en forma vigorosa.

1.6 Fundamentos teóricos con base a la metodología

1.6.1 Gravimetría

El análisis gravimétrico consiste en determinar la cantidad proporcionada de un elemento, radical o compuesto presente en una muestra, eliminando todas las sustancias que interfieren y convirtiendo el constituyente o componente deseado en un compuesto de composición definida, que sea susceptible de pesarse. Los cálculos se realizan con base en los pesos atómicos y moleculares, y se fundamentan en una constancia en la composición de sustancias puras y en las relaciones ponderales (estequiometría) de las reacciones químicas.

El análisis gravimétrico se realiza por el método de precipitación. En este método el analito es convertido en un precipitado poco soluble, luego se filtra, se purifica, es convertido en un producto de composición química conocida y se pesa. Para que este método pueda aplicarse se requiere que el analito cumpla ciertas propiedades:

- Baja solubilidad
- Alta pureza al precipitar
- Alta filtrabilidad
- Composición química definida al precipitar

1.6.2 Volumetría

El análisis volumétrico es una técnica de análisis químico cuantitativo. Se basa en la medida del volumen de una disolución de concentración conocida necesario para reaccionar completamente con el compuesto a determinar (analito).

El proceso de adición de volúmenes de la disolución conocida se denomina valoración. Generalmente la disolución con el reactivo conocido (disolución patrón) se coloca en una bureta y la disolución del analito en un Erlenmeyer. La disolución patrón se añade gota a gota hasta que ha reaccionado con todo el analito. Entonces se mide el volumen consumido y mediante un cálculo estequiométrico sencillo se puede calcular la cantidad del compuesto problema.

El final de la valoración se aprecia por un cambio brusco de alguna propiedad de la disolución en el Erlenmeyer, generalmente un cambio de color que se ve a simple vista. Para que se produzca este cambio es preciso poner en la disolución del Erlenmeyer una pequeñísima cantidad de una sustancia llamada indicador. El final de la valoración se denomina punto de equivalencia o punto final.

1.6.3 Secado

El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo. El secado es habitualmente la etapa final de una serie de operaciones y con frecuencia, el producto que se extrae de un secador para empaquetado.

Existen varios tipos de operaciones de secado, que se diferencian entre sí por la metodología seguida en el procedimiento de secado; puede ser por eliminación de agua de una solución mediante el proceso de ebullición en ausencia de aire; también puede ser por eliminación de agua mediante adsorción de un sólido, y por reducción de del contenido de líquido en un sólido, hasta un valor determinado mediante evaporación en presencia de un gas.

Los sólidos que se secan pueden tener formas diferentes -escamas, gránulos, cristales, polvo, tablas o láminas continuas- y poseer propiedades muy diferentes.

El producto que se seca puede soportar temperaturas elevadas o bien requiere un tratamiento suave a temperaturas bajas o moderadas. Esto da lugar a que en el mercado exista un gran número de tipos de secadores comerciales. Las diferencias residen fundamentalmente en la forma en que se mueven los sólidos a través de la zona de secado y en la forma en la que se transmite calor.

En general, el secado significa la remoción de cantidades de agua relativamente pequeñas de cierto material. En el secado, el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire.

1.6.4 Calcinación

La calcinación permite eliminar sustancias volátiles fuertemente absorbidas por un cuerpo, en donde se necesita que el mismo este libre de componentes ajenos a él.

Las razones para calcinar son la imposibilidad de asegurar una forma de composición constante del precipitado por simple secado, el empleo de electrolitos volátiles a altas temperaturas y la eliminación del agua retenida por oclusión o por fuerte adsorción al material.

Las termobalanzas permiten investigar temperaturas óptimas de calcinación, así como intervalos de temperatura que posibiliten el proceso para precipitado conforme al aumento de temperatura, desde temperaturas ambiente hasta más de los mil grados Celsius.

El material que contenga el cuerpo analizado debe soportar las temperaturas de calcinación, como ejemplo el uso de crisoles en lugar de papel filtro. El valor de la temperatura de ser el óptimo, debido a que mayor temperatura el precipitado puede tener pérdida por sublimación, volatilización o por descomposición.

El caso más común de alteración al precipitado es la adsorción de humedad, que se presenta en la mayoría de precipitados recién secados, así como adsorción de dióxido de carbono de la atmósfera, que se evita con desecadoras con atmósfera libre del gas. Por ello se deben agregar los precipitados a desecadoras con suficiente material desecante, como silica gel, para evitar que el agua altere los resultados.

1.6.5 Lixiviación

La lixiviación es un proceso en el cual se extrae uno o varios solutos de un sólido, mediante la utilización de un disolvente líquido. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos pueden difundirse desde el sólido a la fase líquida, lo que produce una separación de los componentes originales del sólido.

Algunos ejemplos son:

- El azúcar se separa por lixiviación de la remolacha con agua caliente.
- Los aceites vegetales se recuperan a partir de semillas, como los de soya y de algodón mediante la lixiviación con disolventes orgánicos.
- La extracción de colorantes se realiza a partir de materias sólidas por lixiviación con alcohol o soda.

Dentro de esta tiene una gran importancia en el ámbito de la metalurgia, ya que se utiliza mayormente en la extracción de algunos minerales como oro y plata. También se utiliza en Tecnología Farmacéutica.

Según Treybal, la lixiviación es la disolución preferente de uno o más componentes de una mezcla sólida por contacto con un disolvente líquido. Esta operación unitaria, es una de las más antiguas en la industria química. (Ref. 3)

Por lo general, se desea realizar la lixiviación a temperaturas lo más elevadas posible. Las temperaturas elevadas producen la mayor solubilidad del soluto en el disolvente y, en consecuencia, concentraciones finales mayores en el licor de lixiviación. A temperaturas elevadas la viscosidad del líquido es menor y mayores las difusividades; esto incrementa la rapidez de lixiviación. En el caso de algunos productos naturales, como las remolachas, las temperaturas muy elevadas pueden producir la lixiviación de cantidades excesivas de solutos indeseables o de deterioro químico del sólido.

2. METODOLOGÍA

2.1 Metodología de Investigación

2.1.1 Recursos Humanos

Investigador: Samuel Manolo Muralles Reyes

Asesora: Inga. Qca. Telma Maricela Cano Morales

Coasesor: Ing. For. Msc. José Mario Saravia Molina

Revisor: Ing. Qco. César Alfonso García

2.1.2 Ubicación del material de estudio

Las muestras fueron recolectadas en el Municipio de Patulul ubicado en el departamento de Suchitepéquez. Patulul se encuentra a 331 metros sobre el nivel del mar; con latitud de $14^{\circ}25'15''$ y longitud de $91^{\circ}09'35''$.

2.1.3 Infraestructura física

La investigación se realizó en la sección de Química Industrial del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

2.1.4 Recursos físicos

REACTIVOS

- Agua desmineralizada, marca Salvavidas.
- Alcohol etílico (C_2H_5OH) al 95% grado reactivo. Densidad 0.75 kg/L. Peso molecular 46.07 g/mol. Envase de 2.5 L. Casa proveedora MERCK KGaA.
- n-hexano (C_6H_{14}) grado reactivo. Envase de 4L. Código h1055-4. Peso molecular 86.18 g/mol. Casa proveedora RGH.
- Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) al 96% grado reactivo. Densidad 1.84 kg/L. Peso molecular 98.08 g/mol. Envase: 2.5L. Casa proveedora MERCK KGaA.
- Ácido Acético glacial (CH_3COOH). Envase: 2.5L. Casa proveedora MERCK KGaA.
- Sulfito de Sodio (Na_2SO_3) grado analítico. Envase 500 g. Peso molecular 126 g/mol. Casa proveedora MERCK KGaA.
- Hidróxido de Sodio ($NaOH$) grado analítico. Peso molecular 40 g/mol. Envase 1 kg. Casa proveedora MERCK KGaA.
- Sílice. Casa proveedora MERCK KGaA.
- Permanganato de Potasio ($KMnO_4$) grado analítico.
- Índigo de carmín grado analítico ($C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$). Peso molecular 466.36 g/mol. Envase 25g. Casa proveedora MERCK KGaA.

EQUIPO

- Molino de martillos, motro Kohlbach (modelo 184T), potencia de 5 hp.
- Horno eléctrico de flujo convectivo por gravedad marca Termolyne.

- Balanza Adventurer OHAUS con capacidad máxima de 150 g y exactitud de 3 decimales.
- Horno Cole Parmer de 120 V y 800 W. 50/60 Hz.
- Planchas de calentamiento con agitación, marca Corning, modelo Pc-400, 120 V/100 V, rango 0-480°C, 0-1100 rpm.
- Bomba de vacío, marca Gast, modelo 0523-V4F-6588DX, vacío hasta 30 inHg, manómetros analíticos.
- Medidor de humedad OHAUS con capacidad máxima de 200 g y exactitud de 4 decimales.
- Mufla Termolyne de hasta 1100°C.
- Campana de extracción de 110 V y 900 Watts, marca Serproma, de motor con capacidad de $\frac{3}{4}$ Hp.
- Computadora con procesador Pentium 4.
- Impresora Canon PIXMA

MATERIALES

Cristalería

- Equipos Soxhlet, balón esmerilado de 500 mL y condensador, marca Comin-Pirex.
- Pipetas de 10 mL, de 50 mL, de 1 mL y de 5 mL.
- Vasos de precipitado de 100 mL, de 50 mL, de 1000 mL, de 500 mL, de 250 mL, marca Pirex.
- Matraces de 250 mL, de 500 mL, de 1000 mL.
- Balones de 1000 mL, de 500 mL, de 250 mL marca Kimex, de 100 mL.
- Condensadores para balón de 1000 mL, 20/40.
- Varillas de agitación.
- Probeta de 500 mL, de 250 mL, de 100 mL, de 50 mL, de 10 mL.

- Bureta de 25 mL y de 10 mL.
- Desecadora marca Fisherbrand.
- Crisoles de porcelana.
- Cajas Petri, diámetro de 10 cm.
- Kitasato.
- Filtro de porcelana.
- Viales color ámbar de 8 mL.

2.1.5 Otros accesorios

- 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.
- Pinza larga.
- Pinza corta.
- Caja de Papel Filtro Whatman No 4.
- Perillas de succión.
- Embudo (metal).
- Termómetros de 0 a 100°C (de inmersión total).
- Manta color marfil, apertura de 0.25 mm² aproximadamente.
- Pesa muestra de aluminio.
- Mangueras de hule.
- Papel Parafilm.

2.2 Procedimientos analíticos

La materia prima se recolectó en el municipio de Patulul, en el departamento de Suchitepéquez. El muestreo se realizó en el mes de agosto durante la época de invierno.

El clima presenta una temperatura media de 23.9 °C. Los suelos son jóvenes, profundos y fértiles. La textura del suelo superficial es franca y franco arcillosa, ligeramente ácido, color oscuro y de un espesor que varía de treinta hasta cincuenta centímetros. Los subsuelos son de textura franco arcillosa a franca, ligeramente ácidos, color café amarillento, de profundidad de uno a dos metros.

Las muestras recolectadas se separaron en fragmentos del material en base a la altura, identificándose como altura basal, media y apical. Se recolectaron 9 árboles para poder realizar 9 tratamientos o repeticiones. Los árboles tenían una edad promedio de 4 años, provenientes de un bosque controlado.

2.2.1 Preparación de las muestras

La recolección de muestras se llevó a cabo en el municipio de Patulul, en el departamento de Suchitepéquez.

Las muestras de madera se tomaron de árboles de la misma especie a tres diferentes alturas. Se tomaron tres muestras de cada árbol provenientes de las distintas alturas. Las muestras se limpiaron de polvo y otras impurezas, eliminando la corteza de las mismas.

Después de secar la madera al aire, ésta se molió, haciendo esto en un molino de martillos trifásico de 5 caballos de fuerza. El aserrín obtenido se secó al aire, para luego ser tamizado con un tamiz No. 40, léase, de secciones de 0.42 mm por 0.42 mm. Se almacenó las muestras en bolsas herméticas debidamente identificadas por árbol y altura.

Caracterización química de la madera:

2.2.2 Determinación de humedad

Se utilizó una balanza analítica.

Alcance

El método cubre la determinación del contenido de humedad en madera.

Principio

En sí, el contenido de humedad (cH) es la cantidad de agua que existe en una pieza de madera, expresada como un porcentaje del peso que tendría ésta en condición completa; se representa mediante la siguiente relación

$$cH = \frac{\text{Pesodelagu acontentida}}{\text{Pesodemade ratotal}} * 100 \quad (\text{Ecuación 10})$$

Aparatos

Balanza analítica, sensible a 0.1 mg, horno para secar con temperatura controlada de 80 y 120°C y desecadora.

Muestra

Para determinar humedad en base húmeda y se necesita 1 g de madera seca y tamizada con un tamiz No. 40.

Procedimiento

1. Colocar un crisol, con capacidad suficiente para la muestra de aserrín, en un horno a 80°C +/- 0.5 durante 2 horas; luego trasladar hacia una desecadora donde se enfriará por 20 minutos.
2. Pesar y anotar; introducir el crisol de nuevo durante 1 hora y luego a la desecadora por 20 minutos, hasta obtener peso constante.
3. Pesar 2 g de muestra y colocarlos en el crisol preparado anteriormente e introducirlo dentro del horno a 80°C +/- 0.5°C durante 2 horas, luego trasladar hacia una desecadora donde se enfriará por 20 minutos.
4. Pesar y anotar; introducir el crisol de nuevo durante 1 hora y luego a la desecadora por 20 minutos, hasta obtener peso constante.
5. La humedad se determina por:

$$\% \text{Humedad} = 100 - \left(\frac{P.B. - P.T.}{P.M.} * 100 \right) \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

P.B. = Peso bruto

P.T. = Peso tara (crisol)

P.M. = Peso de la muestra

2.2.3 Determinación de Taninos

El procedimiento se obtuvo del trabajo de graduación “Caracterización Química de la Madera del Primer Raleo de Pino Caribe”, según el Ing. Escobar (Ref.1). Consta de extracción con maceración mecánica y análisis volumétrico.

Alcance

El método abarca la determinación de taninos en madera.

Principio

La estructura del tanino posee grupos oxidrilo, por ser polifenoles, que a su vez reaccionan con el ion sodio del sulfito, permitiendo así solubilizar a los taninos en solución acuosa con el sulfito de sodio.

Aparatos

Se necesitan vaso de precipitados, bureta, probeta, earlenmeyers, planchas con agitación, termómetros. Balanza analítica, sensible a 0.1mg, horno con temperatura controlada entre 100 y 105°C y desecadora.

Reactivos

Sulfito de Sodio, Sodio Sulfito anhidro (106657 Merck KGaA) al 4% en solución acuosa. Índigo de Carmín (104724 Merck KGaA). Permanganato de Potasio en solución 0.1 N Titrisol (109935 Merck KGaA).

El Índigo de Carmín se prepara de la siguiente manera: disolver 6 g de Na Indigotin Disulfonato en 500 mL de agua, calentar por una hora y luego enfriar. Agregar 50 mL de Ácido Sulfúrico, diluir a 1 litro y filtrar.

Muestra

Aserrín seco, reducido por molino y tamizado por medio de una tamiz No. 40.

Procedimiento

Extracción con Maceración Mecánica

1. Preparar solución acuosa al 4% en peso de sulfito de sodio.
2. Tomar 4 g de madera seca y tamizada, colocarlos en un vaso de precipitado de 100 mL.
3. Agregar un volumen adecuado de la solución de sulfito de sodio, hasta cumplir una relación entre 3:1 a 4:1. En caso de ser necesario, agregar más solución hasta homogenizar.
4. Calentar la mezcla durante 45 minutos con agitación a 70°C, sin pasarse de dicha temperatura.
5. Filtrar la muestra con una manta. Llevar el material soluble a un vaso de precipitado de 50 mL y evaporar en un secador eléctrico. Transferir el material sólido a un pesa muestra y secar hasta peso constante.

Determinación de % de Taninos y Extracto Tánico. Método de Tara en vaina.

1. Tomar 1 g del extracto obtenido (extracto tánico) y colocarlo en un earlenmeyer de 250 mL, agregar 100 mL de agua destilada y agitar hasta disolver.
2. Colocar la muestra en una plancha de calentamiento y llevar a ebullición por 4 horas a reflujo. Luego entibiar la muestra.
3. Tomar 12.5 mL de la solución líquida y adicionar 10 mL de indicador índigo de carmín, luego adicionar 375 mL de agua destilada.
4. Titular con permanganato de potasio 0.1 N hasta observar un color amarillo.
5. Preparar un blanco con agua, adicionando todos los reactivos en las mismas condiciones y titular sin la muestra.
6. El porcentaje de taninos en madera se obtiene por:

$$\%Tanino = (mlo - mlb) * .105 \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

mlo = mililitros utilizados de permanganato de potasio

mlb = mililitros del blanco obtenidos

Nota: La ecuación se obtuvo en base a los 4 g de muestra iniciales y a la siguiente relación: 4,2 mg de tanino = 1mL * 0.1 N Permanganato de Potasio.

2.2.4 Determinación de extraíbles

Para ello se siguió la designación ANSI/ASTM D 1105-56, llamada "Preparación de madera libre de extraíbles". (Ref. 2)

Alcance

El método abarca el trato previo de madera para aplicarla como libre de extraíbles.

Principio

Son sustancias que no son parte de la madera en si. Solubles en solventes neutros.

Aparatos

Equipo de extracción Soxhlet, dedales de porosidad media, balanza analítica sensible a 0.1 mg, horno con temperatura controlada entre 100 y 105°C y desecadora. También pinzas de metal largas, papel Parafilm, teflón y grasa para cristalería.

Reactivos

Alcohol etílico al 95%, etanol absoluto (100983 Merck KGaA); n-Hexano al 95% (104368 Merck KGaA).

Muestra

Aserrín seco, reducido por molino y tamizado por un tamiz No. 40.

Procedimiento

Según la Norma ANSI/ASTM D 1105-56, llamada “Preparación de Madera Libre de Extraíbles”. (Ref. 2)

2.2.5 Determinación de Lignina

Para ello se siguió la norma ANSI/ ASTM D 1106-56, llamada “Lignina en madera”. Antes de determinar el porcentaje de celulosa se debe determinar el contenido de lignina en la madera, ya que el método para determinar celulosa es indirecto y el dato de lignina permite obtener contenido de celulosa en material libre de extraíbles. (Ref. 2)

Alcance

El método abarca la determinación directa de lignina, por gravimetría, en madera.

Principio

La lignina es el residuo insoluble que queda al hidrolizar los carbohidratos por medio del trato con ácidos fuertes. Por ello se trabaja madera libre de extraíbles, ya que algunos extraíbles pueden permanecer insolubles al ataque ácido.

Los tratamientos preliminares para eliminar extraíbles que aún permanecen son ataque con alcohol, para remover taninos catecol; mezcla benceno-alcohol o hexano, para remover resinas, ceras, grasas y aceites; y en algunos casos con agua caliente para remover materiales solubles en agua.

Aparatos

Sistema a reflujo de balón de fondo plano con condensador, mangueras, plancha de calentamiento para ebullición, teflón, cronómetro, pipetas, perillas de succión, plancha con agitación, bomba de vacío. Balanza analítica, sensible a 0.1 mg, horno para secar con temperatura controlada de 80 y 120°C y desecadora. Guantes y lentes protectores.

Reactivos

Ácido sulfúrico al 72%, preparado a partir de ácido sulfúrico al 95-97%, gravedad específica a 20/4°C 1.6338 (100732 Merck KGaA): verter 184 ml del ácido en 66 mL de agua desmineralizada, con agitación lenta, en baño con agua fría (CUIDADO, LIBERA MUCHO CALOR). Estandarizar la solución con una de NaOH, con el indicador naranja de metilo.

Muestra

La muestra es obtenida de madera libre de extraíbles (revisar el método anterior de madera libre de extraíbles).

Procedimiento

Según la norma ANSI/ ASTM D 1106-56, llamada “Lignina en madera”

2.2.6 Determinación de celulosa

Para ello se siguió la norma ANSI/ASTM D 1103-60, llamada “Celulosa en Madera”. Tal norma indica que se debe tratar madera libre de lignina pero el procedimiento se discontinuó, entonces se aplicó la norma y por diferencia con el dato de lignina anterior se obtuvo la celulosa presente en la madera. (Ref. 2)

Alcance

El método abarca la determinación indirecta de celulosa de la madera.

Principio

La celulosa es un polisacárido, formado principalmente por glucosa, de modo que por su gran estructura resiste el ataque alcalino, en cambio la hemicelulosa no.

Aparatos

Se necesitan vaso de precipitados, cronómetro, pipetas, perillas de succión, varilla de agitación, balde para baño María, balones aforados, bomba de vacío, balanza analítica sensible a 0.1mg, horno para secar con temperatura controlada de 100 y 105°C y desecadora. Guantes y lentes protectores.

Reactivos

Hidróxido de sodio en lentejas puro (106462 Merck KGaA), ácido acético (108450 Merck KGaA).

Muestra

La muestra es obtenida de madera libre de extraíbles (revisar el método de madera libre de extraíbles).

Procedimiento

Según la Norma ANSI/ASTM D 1103-60, llamada “Alfa-celulosa en Madera”.

2.2.7 Determinación de cenizas

Para ello se siguió la norma ANSI/ASTM D 1102-56, llamada “Cenizas en Madera”. (Ref. 2)

Alcance

El método abarca la determinación de cenizas en madera, residuo presente como % en peso después de la oxidación de 585 a 600°C.

Principio

Los materiales no volátiles de la madera se resisten a la oxidación a alta temperatura, por lo tanto la calcinación elimina estos materiales volátiles de un cuerpo determinado.

Aparatos

Crisoles de porcelana o silica con capacidad de 30mL (preferible) o más, horno mufla con pirómetro para mantener la temperatura, balanza analítica sensible a 0.1 mg, horno para secar y desecadora. También pinzas de metal largas.

Muestra

Aserrín seco, reducido por molino y tamizado por medio de un tamiz No. 40.

Procedimiento

Según la norma ANSI/ASTM D 1102-56, llamada "Cenizas en Madera".
(Ref. 2)

2.3 Diseño experimental

2.3.1 Diseño de tratamientos

Se utilizó una variable independiente (unifactorial), en este caso la altura del árbol Teca. El arreglo fue en un solo sentido. Para la variable de altura de toma de muestra se utilizó madera del árbol Teca (*Tectona Grandis*) tomada a lo largo del árbol a 1.3 m del suelo (DAP = diámetro a la altura del pecho) o basal, a la altura comercial del fuste (D6) o apical y a una altura media entre el DAP y el D6.

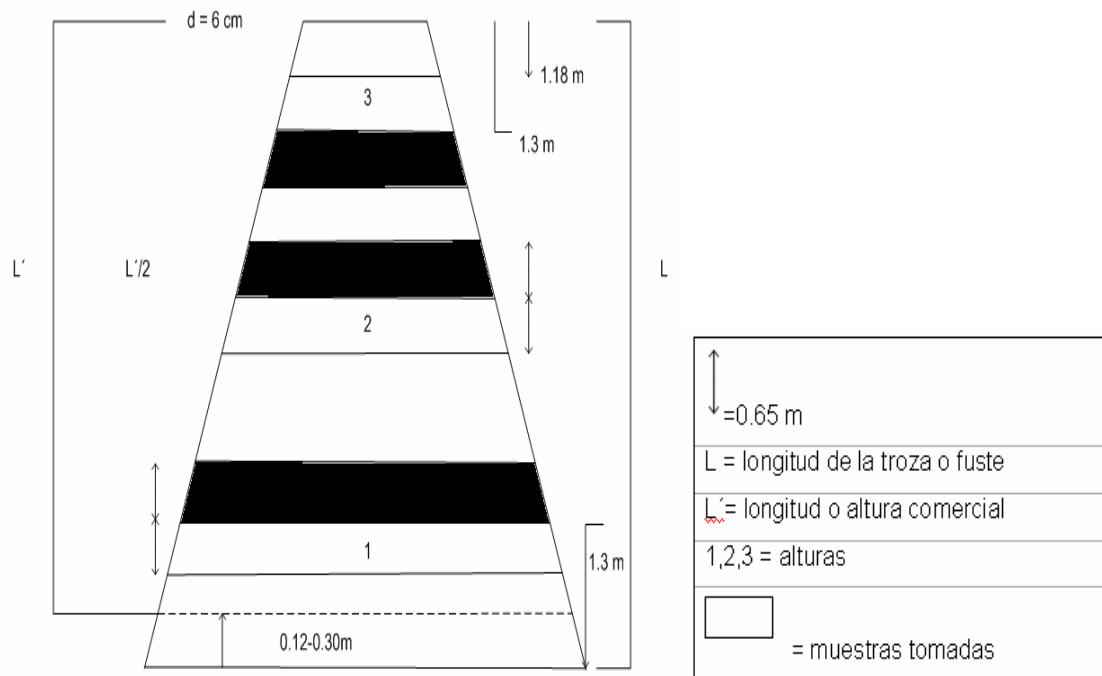
El número de tratamientos que se realizaron se determinaron de la siguiente manera: 3 alturas para la muestra = 3 niveles o tratamientos.

Para cada tratamiento se llevaron a cabo 9 repeticiones para la determinación de las 6 variables de respuesta: humedad, taninos, extraíbles, lignina, celulosa y ceniza. Las corridas que se realizaron son 27 (9*3) para la especie a estudiar. Se empleó el método unifactorial en un solo sentido por ser concreto y sencillo.

2.3.2 Análisis estadístico

Para cada componente químico a determinado se utilizó un análisis de varianza por medio de un diseño unifactorial en un solo sentido completamente aleatorio con la distribución de Fisher, esto debido a que se tratan más de dos niveles. Siendo unifactorial por ser solo la altura, se tienen tres tratamientos o niveles, en este caso alturas, y nueve repeticiones, en este caso árboles de la misma especie. El arreglo matricial es de veintisiete series para cada componente a determinar. Los datos se arreglaron como sigue:

Figura 8. Origen de las muestras a tres diferentes alturas del tronco



Fente: Ref. 3.

Tabla V. Variables para el diseño unifactorial

Tratamientos	No. de Observaciones			Total	Promedio
1	$Y_{1,1}$	$Y_{1,2}$	$Y_{1,3}$	Y_1	y_1
2	$Y_{2,1}$	$Y_{2,2}$	$Y_{2,3}$	Y_2	y_2
3	$Y_{3,1}$	$Y_{3,2}$	$Y_{3,3}$	Y_3	y_3
A	$Y_{a,1}$	$Y_{a,2}$	$Y_{a,3}$	Y_a	y_a
				Y_i	y

Fuente: Referencia 3.

Donde:

Y_a = es el total de las observaciones bajo el i -ésimo tratamiento

y = es el promedio de las observaciones bajo el i -ésimo tratamiento

Y_1 = es la suma de todas las observaciones

Generalmente el procedimiento para el diseño consiste en seleccionar una repetición completa del experimento, con un solo factor con a niveles. Las observaciones pueden representarse por medio de un modelo estadístico lineal.

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, a ; j = 1, 2, \dots, N$$

Donde:

y_{ij} = observación

μ = media general

τ_i = efecto del tratamiento i -ésimo

ε_{ij} = error aleatorio

Como el interés es probar la igualdad de los efectos del tratamiento, siendo

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ al menos una } i$$

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 alturas fueron 3, adoptando la variable a ; las repeticiones o árboles de la misma especie fueron 9, adoptando la variable N .

Tabla VI. Análisis de varianza para el diseño unifactorial

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media Cuadrática	F_0
Tratamientos	$\sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{N} - \frac{y^2}{aN}$	$a - 1$	$\frac{(SS_{tratamientos})}{(a - 1)}$	$\frac{(MS_{tratamientos})}{(MS_E)}$
Error	SS_E (por sustracción)	$N - a$	$\frac{(SS_E)}{(N - a)}$	
Total	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^N y_{ij}^2 - \frac{y^2}{aN}$	$N - 1$		

Fuente: Ref. 3.

La hipótesis nula de ningún efecto de tratamiento se prueba mediante la razón de Fisher, que se define como:

$$F = \frac{MS_{tratamientos}}{MS_E} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde $MS_{tratamientos}$ es la media cuadrática de los tratamientos y MS_E es la media cuadrática del error; y que para un nivel de confianza $\alpha = 0.05$ y con 2 grados de libertad para tratamientos (3-1) y 24 para el error (27-3) se tiene un valor de F_{est} de 3.40, el cual se comparó con los valores de F_0 menores a F comprueba la hipótesis nula y el rechazo de la hipótesis alternativa.

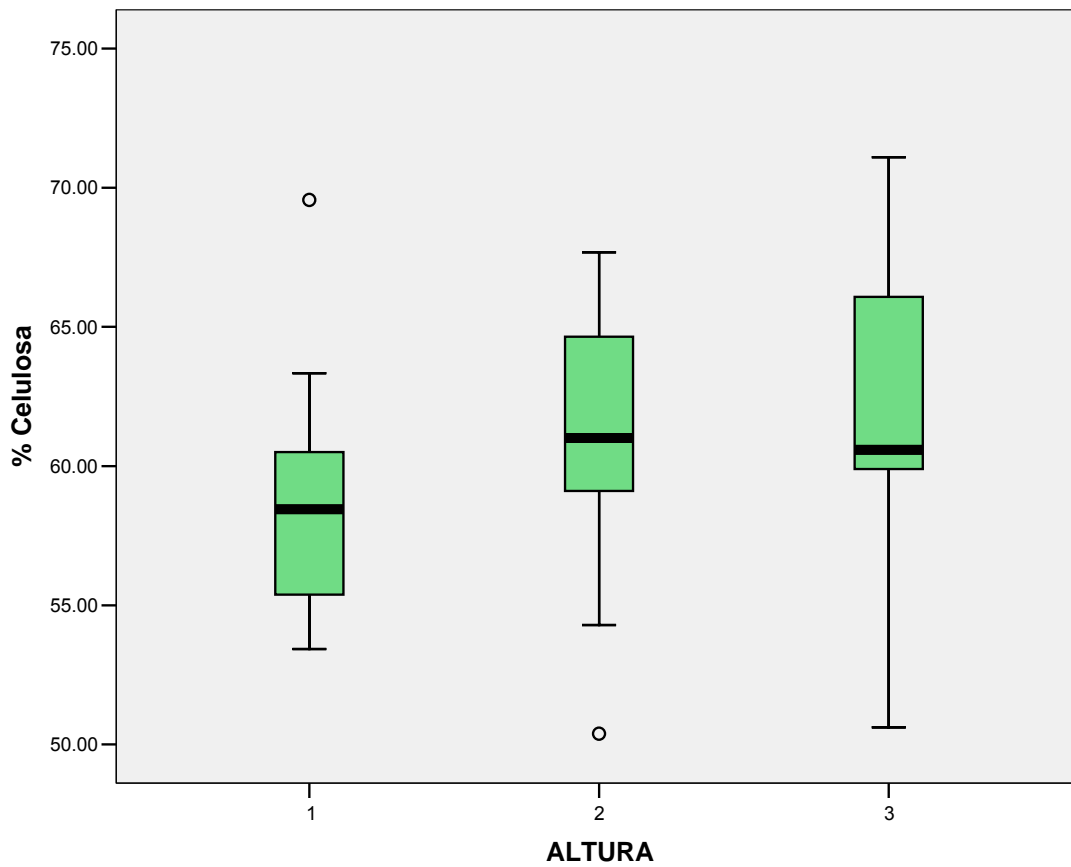
3. RESULTADOS

Tabla VII. Resultados generales de la caracterización química de la madera de Teca (*Tectona grandis L.f.*).

Árbol	Altura	% Humedad	% Cenizas	% Taninos	% Extraíbles	% Lignina	% Celulosa
1	1	3.50	1.50	0.3990	5.47	24.00	63.34
	2	2.75	1.20	0.5460	6.00	24.00	67.68
	3	3.10	1.30	0.7035	5.20	24.00	71.10
2	1	3.54	1.50	0.5985	5.47	26.00	60.50
	2	3.15	1.30	0.8295	4.93	26.00	64.65
	3	3.45	1.60	0.7350	4.93	25.00	59.89
3	1	2.95	1.40	0.1995	6.13	27.00	55.38
	2	3.20	1.30	0.3885	4.53	28.00	62.05
	3	3.50	1.30	0.8085	5.33	27.00	60.59
4	1	3.10	1.00	0.7245	5.47	31.00	56.72
	2	3.80	1.10	0.8820	4.67	27.00	59.11
	3	4.00	1.20	0.8820	4.80	25.00	59.98
5	1	4.15	1.60	0.7980	4.80	26.00	54.26
	2	4.19	1.30	0.7665	4.93	32.00	50.39
	3	4.10	1.50	0.8400	6.27	32.00	50.62
6	1	2.29	1.20	0.7560	6.27	31.00	53.43
	2	2.35	1.20	0.7875	6.40	28.00	54.29
	3	2.84	1.20	0.8295	5.33	27.00	67.21
7	1	2.14	1.00	0.7770	5.73	25.00	58.45
	2	2.30	1.10	0.8190	6.13	24.00	66.65
	3	2.85	0.90	0.9450	6.53	25.00	62.62
8	1	2.35	1.20	0.9345	5.87	26.00	59.30
	2	3.54	1.00	0.9450	6.13	23.00	61.01
	3	3.84	1.00	0.9450	6.93	24.00	66.08
9	1	2.89	0.90	0.9030	6.00	24.00	69.56
	2	3.44	1.10	0.5460	6.13	25.00	60.07
	3	3.60	1.20	0.5145	7.20	26.00	59.39
	Promedio	3.22	1.2	0.7334	5.69	26.37	60.53
	Desviación Media	± 0.504	0.16	0.1467	0.599	1.948	4.161
	Desviación Estándar	± 0.608	0.20	0.1916	0.708	2.544	5.442

Fuentes: Datos Calculados.

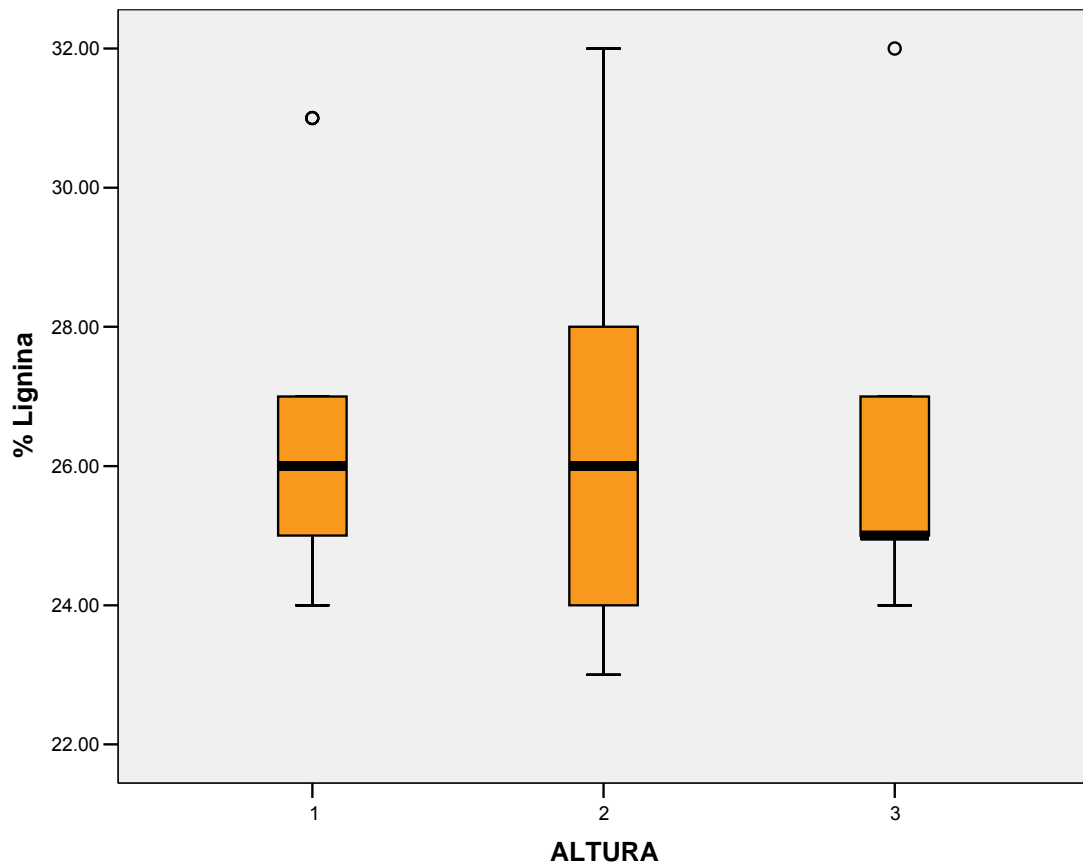
Figura 9. Distribución de los resultados experimentales de concentración de Celulosa en función de la altura; determinada según norma ANSI/ASTM D 1103-60, llamada “Celulosa en madera”, para Teca (*Tectona grandis L.f.*).



Fuente: Análisis Estadístico

La figura 9 presenta un valor mínimo de 50.39% y un máximo de 71.10%.

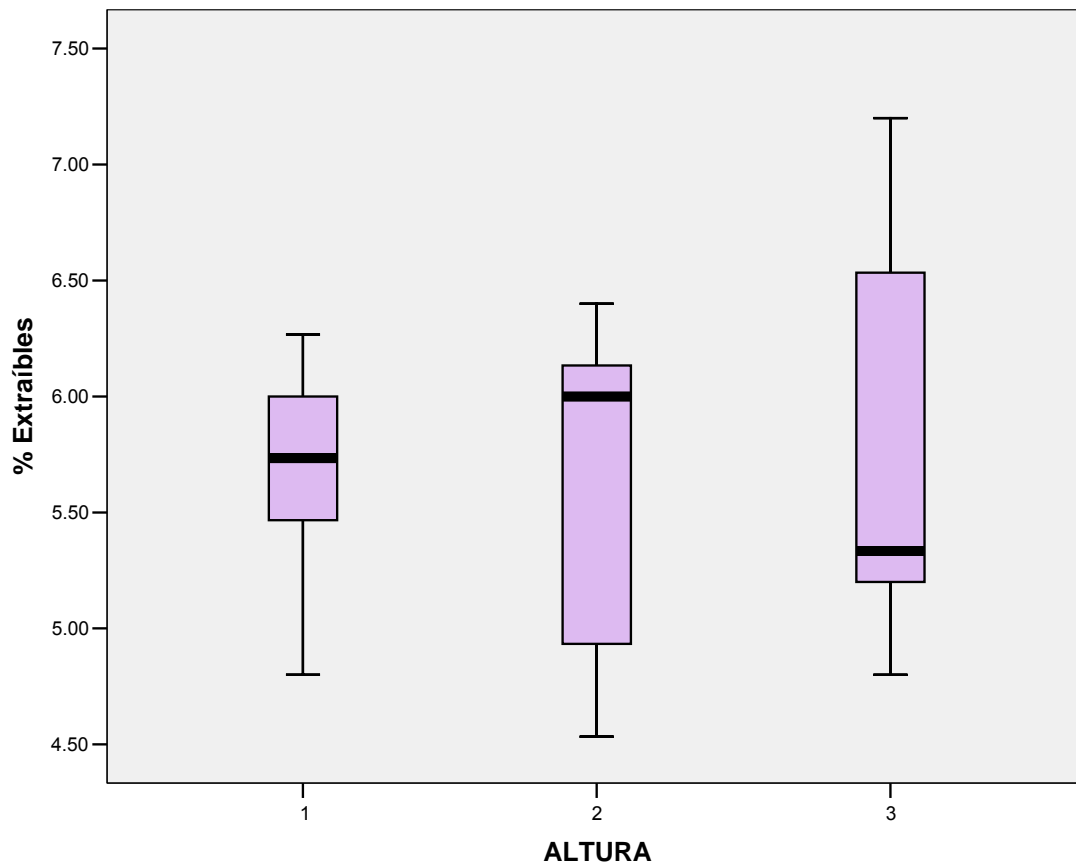
Figura 10. Distribución de los resultados experimentales de concentración de Lignina en función de la altura; determinada según norma ANSI/ASTM D 1106-56, llamada “Lignina en madera”, para Teca (*Tectona grandis L.f.*).



Fuente: Análisis Estadístico

La figura 10 presenta un valor mínimo de 23.00% y un máximo de 32.00%.

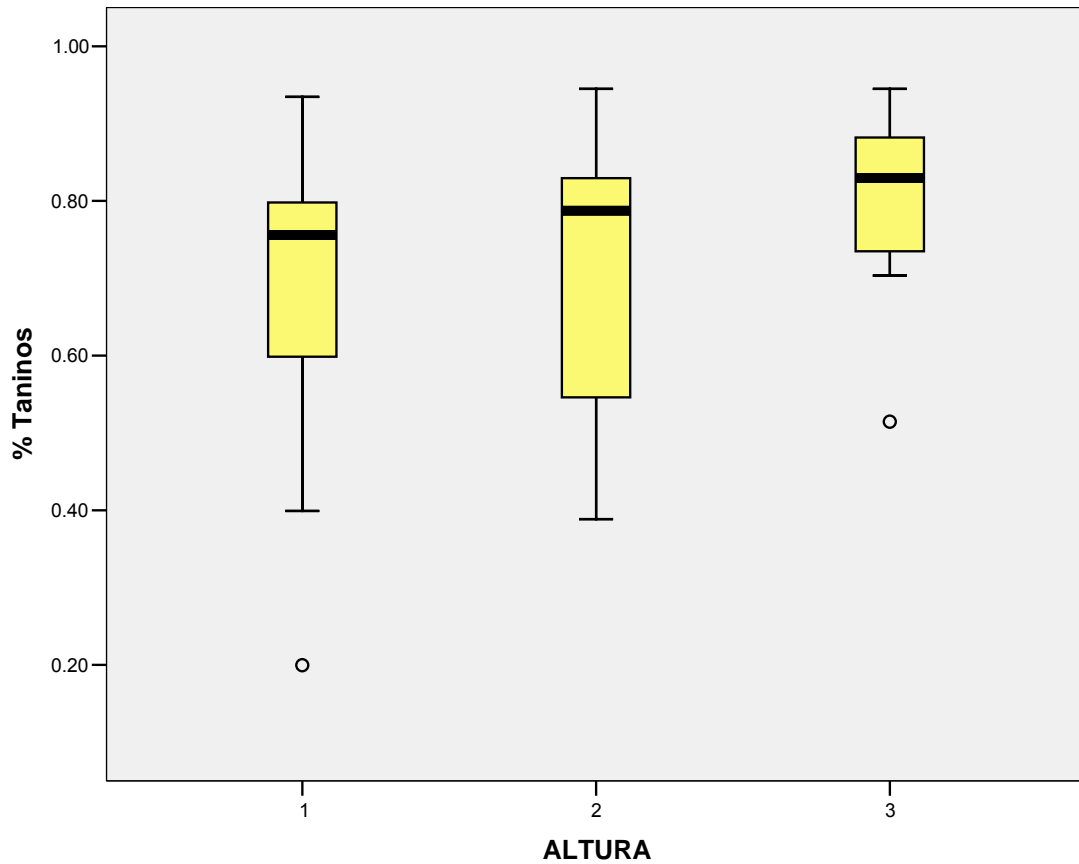
Figura 11. Distribución de los resultados experimentales de concentración de Extraíbles en función de la altura; determinada según norma ANSI/ASTM D 1105-56, llamada “Preparación de Madera Libre de Extraíbles”, para Teca (*Tectona grandis L.f.*).



Fuente: Análisis Estadístico

La figura 11 presenta un valor mínimo de 4.53% y un máximo de 7.20%.

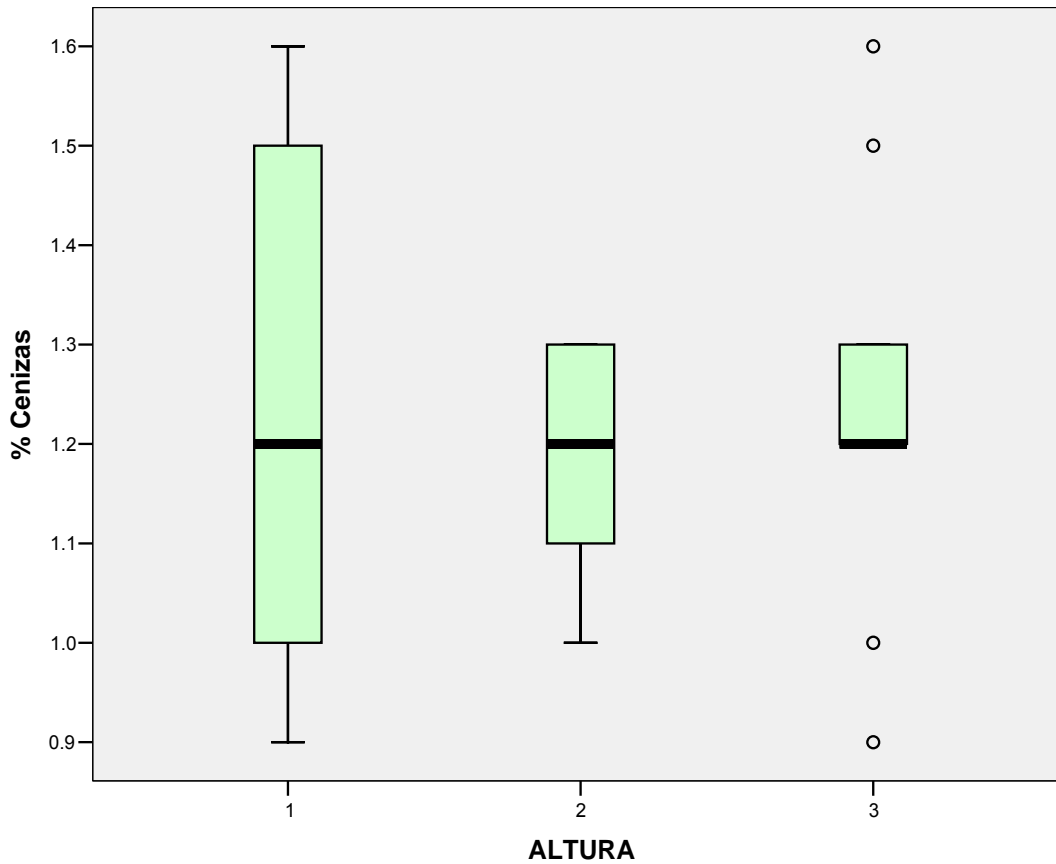
Figura 12. Distribución de los resultados experimentales de concentración de Taninos en función de la altura; determinada según “Método de tara en vaina”, para Teca (*Tectona grandis* L.f.).



Fuente: Análisis Estadístico

La figura 12 presenta un valor mínimo de 0.1995% y un máximo de 0.9450%.

Figura 13. Distribución de los resultados experimentales de concentración de Cenizas en función de la altura; determinada según norma ANSI/ASTM D 1102-56, llamada “Cenizas en Madera”, para Teca (*Tectona grandis L.f.*).



Fuente: Análisis Estadístico

La figura 13 presenta un valor mínimo de 0.90% y un máximo de 1.60%.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente trabajo de graduación trata la investigación sobre la caracterización química en la madera Teca (*Tectona grandis L.f.*), en donde se determinaron concentraciones (como porcentaje en peso) de cinco componentes químicos, así como el contenido de humedad del mismo. Entre los componentes químicos se tienen los Taninos, Extraíbles, Lignina, Celulosa y Cenizas.

La humedad se analiza por aparte, ya que no es un componente propio de la estructura de la madera, pero importante conocer su contenido antes de su uso para evitar problemas que modifiquen las características físicas, mecánicas y químicas que se puedan producir en los tratamientos; por ello para trabajar la madera se requiere un porcentaje de humedad menor al 6%.

La tabla VII, de la sección de Resultados, presenta los datos generales para los cinco componentes químicos determinados y el contenido de humedad para las veintisiete muestras tratadas. Se utiliza la desviación estándar para calcular la variación de los datos de la muestra y la desviación media para calcular la variación de los datos promedios obtenidos.

Se trabajaron 9 árboles de la misma especie y se hizo énfasis en la altura a la cual fueron tomadas las muestras, siendo la troza basal del diámetro a la altura del pecho, la troza media y la troza apical o de punta, siendo nombradas como altura 1,2 y 3 o simplemente basal, media y apical respectivamente.

La concentración de taninos se encuentra entre el 0.19% y el 0.95% \pm 0.1916% en peso, con un promedio de 0.7334% \pm 0.1467%; las sustancias extraíbles se encuentran entre 4.53% y 7.20% \pm 0.708%, con un promedio de 5.69% \pm 0.599%, la lignina se encuentra entre 23% y 32% \pm 2.544%, con un promedio de 26.37% \pm 1.948%.

La celulosa se encuentra entre el 50.39% y el 71.10% \pm 5.442, con un promedio de 60.53% \pm 4.161%; y las cenizas se encuentran entre 0.9% y 1.6% \pm 0.199%, con un promedio de 1.23% \pm 0.157%.

Los resultados obtenidos concuerdan con los rangos registrados en la literatura para árboles de especies latifoliadas, figurando la madera de Teca (*Tectona grandis L.f.*) entre ellas. Los datos de la tabla IV de la sección Marco Teórico son los siguientes: Extraíbles entre 0.3% y 11.0%, Lignina entre 14.0 % y 34.6%, Celulosa entre 31.1% y 64.4%, y Cenizas entre 0.1 y 5.4%. (Ref. 4).

Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza para un sistema unifactorial por medio de la Distribución de Fisher (Ref. 6). Los datos que se obtuvieron para celulosa indican que en promedio la variación de su contenido con respecto a la altura no es significativa, con ello se indica que la composición de celulosa es relativamente la misma en cualquier parte del árbol.

En la figura 9, de la sección de Resultados, se ilustra la composición en % en peso de la celulosa en función de la altura, mediante un diagrama de caja y alambres. Esta figura nos muestra la distribución de los datos obtenidos para la celulosa y nos indica que la mayoría de los datos se encuentran cerca del valor central y dentro del rango de $\pm 2\sigma$ de variación.

Este resultado es respaldado por el análisis de varianza que se aplicó a los datos obtenidos, datos presentados en la tabla XIV del apéndice B. El valor observado para la prueba de Fisher es de 1.099, siendo menor al valor tabulado de 3.400, confirmando así que la variación no es significativa; la probabilidad de ocurrencia en cuanto a la hipótesis nula es de 0.357. Los valores medio de la tabla XX, en el Apéndice B, indican que en la altura 3 se encuentra en mayor cantidad el componente, y le siguen la altura 2 y la altura 1.

En la figura 10, de la sección de Resultados, se ilustra la composición en % en peso de la lignina en función de la altura, mediante un diagrama de cajas y alambres. Esta figura nos muestra la distribución de los datos obtenidos para la lignina y nos indica que la mayoría de los datos se encuentran cerca del valor central y dentro del rango de $\pm 2\sigma$ de variación. Esta figura también nos muestra que hay algunos datos que se salen de este rango, esto es debido a que los datos obtenidos dependen mucho de la consistencia del método utilizado en el análisis, es decir, que se aplique el método de igual manera a cada uno de los ensayos. Aunque la figura muestre datos fuera del $\pm 2\sigma$ de variación, al realizar el análisis estadístico se demuestra que la variabilidad no depende de los datos puntuales, sino que depende del conjunto de datos obtenidos; esto se explica con el análisis de varianza.

El análisis de varianza para la lignina se muestra en la tabla XV, en donde los datos presentan que la composición de lignina no varía significativamente conforme a la altura. Esto se indica por medio de la comparación de los valores para la prueba de Fisher, dando como resultado la aceptación de la hipótesis nula, H_0 , como el caso de la composición de celulosa.

El valor observado de Fisher es de 0.192, siendo el valor teórico de Fisher de 3.400, indicando que el valor observado es menor que el tabulado y por ello la variación no es significativa. La probabilidad de ocurrencia es de 0.827; es decir, que la probabilidad es alta en cuanto a la hipótesis nula.

La tabla XX, en el Apéndice B, muestra las medias de la composición de lignina para las tres alturas, indicando que hay una mayor cantidad en la altura 1, seguida por la altura 2 y la 3. Considérese que ya se concluyó que a pesar de que hay variación se considera no significativa según el análisis estadístico.

Al igual que la celulosa, la lignina funciona como un pilar para soportar los tejidos de la planta, siendo importante que su concentración se mantenga a pesar de la variación de diámetros de la troza de una altura a otra. Como la parte basal esta presentado mayor contenido que la media se denota la rigidez en la altura 1 para sostener el árbol.

En la figura 11, de la sección de Resultados, se ilustra la composición en % en peso de las sustancias extraíbles en función de la altura, mediante un diagrama de caja y alambres. Esta figura nos muestra la distribución de los datos obtenidos para las sustancias extraíbles y nos indica que la mayoría de los datos se encuentran cerca del valor central y dentro del rango de $\pm 2\sigma$ de variación.

La tabla XVI, del apéndice B, presenta los resultados del análisis de varianza para las sustancias extraíbles. El valor de Fisher observado es de 0.568, siendo el valor de Fisher teórico de 3.400; indicando que el contenido de sustancias extraíbles no varía de forma significativa en función a la altura, con una probabilidad de ocurrencia de 0.578.

La tabla XX, en el Apéndice B, muestra las medias de los datos, en donde se puede apreciar que a medida que en la altura 3 hay una mayor concentración de extraíbles, y le siguen la altura 1 y 2.

En la figura 12, de la sección de Resultados, se ilustra la composición en % en peso de taninos en función de la altura, mediante un diagrama de caja y alambres. Esta figura nos muestra la distribución de los datos obtenidos para los taninos y nos indica que la mayoría de los datos se encuentran cerca del valor central y dentro del rango de $\pm 2\sigma$ de variación.

La figura 12, al igual que en el caso de la lignina (Fig. 10), también nos muestra que hay algunos datos que están fuera del $\pm 2\sigma$ de variación. Lo anterior no afecta, ya que no se considera significativo según el análisis estadístico.

La tabla XVII muestra el análisis de varianza para la concentración de taninos. El valor de Fisher observado es de 1.1712, cuando el valor de Fisher teórico es de 3.400, siendo este último mayor que el valor observado; se acepta entonces la hipótesis nula, H_0 , denotando que no hay una variación significativa.

La probabilidad de ocurrencia es de 0.212, siendo baja debido al valor alto de Fisher observado. Los datos obtenidos demuestran que la concentración de taninos en madera de Teca son bajos, como es de esperarse ya que la mayor concentración de taninos se encuentra en la corteza de los árboles.

Los valores medios de taninos puros de la tabla XX, en el Apéndice B, demuestran que los taninos en la madera de Teca se concentran en la parte alta o altura 3 del árbol.

CONCLUSIONES

1. Los principales componentes químicos del árbol de Teca (*Tectona grandis* L.f.), tienen una composición promedio, en % en peso, de: celulosa 60.53% \pm 4.161%, lignina 26.37% \pm 1.948%, extraíbles 5.69% \pm 0.599%, taninos 0.7334% \pm 0.1467%, y cenizas 1.23% \pm 0.157%.
2. La celulosa es el componente químico más abundante en la madera de Teca en cualquier altura, ya que su concentración se encuentra entre 50.39% y el 71.10% en peso, con una desviación estándar de 5.442%; y no presentó variación significativa en función de la altura del árbol.
3. La lignina es el segundo componente químico en abundancia y su concentración se encuentra entre 23% y 32% en peso, con una desviación estándar de 2.544%; sin presentar una variación significativa en función a la altura.
4. Las sustancias extraíbles se encuentran entre 4.53% y 7.20% en peso, con una desviación estándar de 0.708%; y no presentaron variación significativa en función de la altura.
5. Los taninos se encuentran entre 0.19% y el 0.95% en peso, con una desviación estándar de 0.1916%; y no presentaron variación significativa en función de la altura.
6. Las cenizas, se encuentran entre 0.9% y 1.6%, con una desviación estándar de 0.199%; y no presentaron variación significativa en función de la altura.

7. Se ratificó que la hipótesis nula, H_0 , era prevaleciente; utilizando la prueba de Fisher como método de análisis para los resultados obtenidos en la Caracterización Química de la Madera de la Especie Teca (*Tectona grandis* L.f.).

RECOMENDACIONES

1. Promover la investigación para realizar la caracterización química de otras especies forestales, incluyendo maderas de coníferas y latifoliadas, para comparar las concentraciones de los componentes químicos.
2. Realizar estudios de la caracterización química de maderas latifoliadas y coníferas en función a las diferentes estaciones climáticas del año.
3. Utilizar estudios como el presente, para hacer de los bosques del territorio nacional un recurso natural renovable. Dándole un enfoque industrial, con el fin de aprovechar al máximo la composición química de la madera, como por ejemplo, en la industria del papel.
4. Buscar métodos alternativos para la determinación de los componentes químicos de la madera, con el objetivo de hacer estos estudios más precisos y exactos, optimizando recursos, tiempo y mejorando el rendimiento de las futuras investigaciones.
5. Promover el estudio de la composición química de la madera así como la composición química de la corteza, ya que en esta última es donde se concentra la mayoría de taninos; los cuales son sustancias muy importantes para la industria de curtición de pieles.
6. Determinar la concentración de potasio y sodio de las cenizas obtenidas en este estudio, y de esta manera evaluar el contenido de humedad del árbol en función del gradiente de concentración de dichos elementos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Escobar Toledo, Ericksson Roberto. Caracterización Química de la Madera del Primer Raleo de Pino Caribe (*Pinus caribaea* (Morelet) var. *Hondurensis* (Barret y Golfari)) A Nivel Laboratorio Proveniente de la Finca Semuc 6, El Estor, Izabal. Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Guatemala C.A. 2005. pp. 1-78.
2. Meltzer, Robert L. **1979 Annual Book of ASTM Standards.** Parte 22-Madera y Adhesivos. Estados Unidos de América: Sociedad Americana de Ensayos y Materiales, 1979. pp. D 1109-60, D 1103-60, D 1105-56, D 1106-56.
3. Treybal, Robert E. **Transferencia de Masa.** Segunda edición. México: Editorial McGraw-Hill. pp.789-791.
4. Tsoumis, George. **Science and Technology of Wood.** Primera Edición. Estados Unidos de América: Editorial Van Nostrand Reinhold New Cork, 1982. pp. 34-38.
5. Chang, Raymond. **Química.** Séptima edición. Editorial McGraw-Hill. México 2002. pp.133-139.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

1. **Estudio de la Madera para la Construcción.**
González, Daniel. España.
<http://html.rincondelvago.com/estudio-de-la-madera-para-la-construccion.html>
2. <http://www.textoscientificos.com/papel/estructura-madera>
3. <http://es.wikipedia.org/wiki/Celulosa>
4. **Apuntes sobre la Composición Química de la Madera.**
Igarza Orea, Uvaldo; Carballo, Rosa y Cordero, Elena.
Facultad de Forestal y Agronomía. Universidad de Pinar del Río, Cuba.
<http://www.monografias.com/trabajos15/composicion-madera/composicion-madera.shtml#COMPOSIC>
5. http://es.wikipedia.org/wiki/Madera#La_composici.C3.B3n_de_la_madera
6. http://www.papelnet.cl/madera/propiedades_madera.htm
7. <http://academic.scranton.edu/faculty/CANNM1/inorganic/imageNMM.JPG>
8. <http://www.ecoportal.net/content/view/full/39302>
9. <http://www.mtfazendas.com.br/FotosNoticias/teca.jpg>

10. <http://es.wikipedia.org/wiki/Lixiviaci%C3%B3n>

11. http://es.wikipedia.org/wiki/An%C3%A1lisis_gravim%C3%A9trico

12. <http://es.wikipedia.org/wiki/Volumetr%C3%ADa>

BIBLIOGRAFÍA

1. Instituto Geográfico Nacional. Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas. **Atlas Nacional de Guatemala**. Taller Litográfico Nacional. Guatemala, Guatemala. 1972. pp. 2.11, 3.15, 3.2.
2. Guardiola, J. L. y Amparo, G. L. **Fisiología Vegetal, Nutrición y Transporte**. Editora Síntesis. Valencia, España. 1995. pp.27-63
3. Jolkin, Y. I. **Tecnología de las producciones hidrolíticas**. Editorial Lesnaya Prom. Moscú. 1989. pp. 496
4. Tamchuk, R. I. y Tamchuk, G. N. **El follaje y su utilización en la agricultura**. Editorial Lesnaya. 1973. pp.360
5. Yagodin, V. I. **Fundamentos de la Química y la Tecnología para el tratamiento del follaje**. Editorial Leningrad Universitieta. 1981. pp 47-50.
6. Browning, B.L. **Methods of wood chemistry**. Intersci, Public. N.Y. Londres, Inglaterra. 1967 vol. 2, p.800,.
7. Fengel, D., Wegener, G. **"Wood Chemistry, Ultraestructure Reaction"**, Walter de Gruyter, Berlín. 1984. p.2-220
8. Bland, D.E., **"The composition and Analysis of eucalyptus wood"** Appita, Vol. 38, N°4. 1985 p.291-294

APÉNDICE A

DATOS CALCULADOS

Tabla VIII. Datos calculados para Celulosa.

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	63.34	60.50	55.38	56.72	54.26	53.43	58.45	59.30	69.56	530.94	58.99
2	67.68	64.65	62.05	59.11	50.39	54.29	66.65	61.01	60.07	545.89	60.65
3	71.10	59.89	60.59	59.98	50.62	67.21	62.62	66.08	59.39	557.48	61.94
										1634.31	60.53 ± 4.161

Fuente: Datos Originales.

Tabla IX. Datos calculados para Lignina.

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	24.00	26.00	27.00	31.00	26.00	31.00	25.00	26.00	24.00	240.00	26.67
2	24.00	26.00	28.00	27.00	32.00	28.00	24.00	23.00	25.00	237.00	26.33
3	24.00	25.00	27.00	25.00	32.00	27.00	25.00	24.00	26.00	235.00	26.11
										712.00	26.37 ± 1.1948

Fuente: Datos Originales.

Tabla X. Datos calculados para extraíbles.

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	5.47	5.47	6.13	5.47	4.80	6.27	5.73	5.87	6.00	51.20	5.69
2	6.00	4.93	4.53	4.67	4.93	6.40	6.13	6.13	6.13	49.87	5.54
3	5.20	4.93	5.33	4.80	6.27	5.33	6.53	6.93	7.20	52.53	5.84
										153.60	5.69 ± 0.599

Fuente: Datos Originales.

Tabla XI. Datos calculados para Taninos.

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	0.3990	0.5985	0.1995	0.7245	0.7980	0.7560	0.7770	0.9345	0.9030	6.0900	0.6767
2	0.5460	0.8295	0.3885	0.8820	0.7665	0.7875	0.8190	0.9450	0.5460	6.5100	0.7233
3	0.7035	0.7350	0.8085	0.8820	0.8400	0.8295	0.9450	0.9450	0.5145	7.2030	0.8003
										19.8030	0.7334 ± 0.1467

Fuente: Datos Originales.

Tabla XII. Datos calculados para cenizas.

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	1.50	1.50	1.40	1.00	1.60	1.20	1.00	1.20	0.90	11.30	1.26
2	1.20	1.30	1.30	1.10	1.30	1.20	1.10	1.00	1.10	10.60	1.18
3	1.30	1.60	1.30	1.20	1.50	1.20	0.90	1.00	1.20	11.20	1.24
										33.10	1.23 ± 0.157

Fuente: Datos Originales.

Tabla XIII. Datos calculados para humedad.

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	3.5	3.54	2.95	3.1	4.15	2.29	2.14	2.35	2.89	26.91	2.99
2	2.75	3.15	3.2	3.8	4.19	2.35	2.3	3.54	3.44	28.72	3.19
3	3.1	3.45	3.5	4	4.1	2.84	2.85	3.84	3.6	31.28	3.48
										86.91	3.22 ± 0.504

Fuente: Datos Originales.

APÉNDICE B

DATOS ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Tabla XIV. Resultados del análisis de varianza para Celulosa.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media Cuadrática	Fo	F	P
Tratamientos	39.326	2	19.663	1.099	3.400	0.357
Error	286.392	24	17.900			
Total	769.961	26				

Fuente: Análisis Estadístico.

Tabla XV. Resultados del análisis de varianza para Lignina.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media Cuadrática	Fo	F	P
Tratamientos	1.407	2	0.704	0.192	3.400	0.827
Error	58.593	24	3.662			
Total	168.296	26				

Fuente: Análisis Estadístico.

Tabla XVI. Resultados del análisis de varianza para extraíbles.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media Cuadrática	Fo	F	P
Tratamientos	0.395	2	0.198	0.568	3.400	0.578
Error	5.566	24	0.348			
Total	13.049	26				

Fuente: Análisis Estadístico.

Tabla XVII. Resultados del análisis de varianza para Taninos.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media Cuadrática	Fo	F	P
Tratamientos	0.070	2	0.035	1.1712	3.400	0.212
Error	0.328	24	0.020			
Total	0.954	26				

Fuente: Análisis Estadístico.

Tabla XVIII. Resultados del análisis de varianza para cenizas.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media Cuadrática	Fo	F	P
Tratamientos	0.032	2	0.016	1.117	3.400	0.352
Error	0.228	24	0.014			
Total	1.032	26				

Fuente: Análisis Estadístico.

Tabla XIX. Resultados del análisis de varianza para humedad.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media Cuadrática	Fo	F	P
Tratamientos	1.071	2	0.536	4.571	3.400	0.027
Error	1.875	24	0.117			
Total	9.626	26				

Fuente: Análisis Estadístico.

Tabla XX. Concentración promedio de los componentes con base a la altura.

Altura	% Humedad	% Cenizas	% Taninos	% Extraíbles	% Lignina	% Celulosa
Basal	2.99	1.26	0.6767	5.69	26.67	58.99
Media	3.19	1.18	0.7233	5.54	26.33	60.65
Apical	3.48	1.24	0.8003	5.84	26.11	61.94

Fuente: Análisis Estadístico.

APÉNDICE C

DATOS ORIGINALES

Tabla XXI. Datos Originales para la determinación de la composición química de la madera de Teca (*Tectona grandis L.f.*)

Árbol	Altura	% Humedad	% Cenizas	% Taninos	% Extraíbles	% Lignina	% Celulosa
1	1	3.50	1.50	0.3990	5.47	24.00	63.34
	2	2.75	1.20	0.5460	6.00	24.00	67.68
	3	3.10	1.30	0.7035	5.20	24.00	71.10
2	1	3.54	1.50	0.5985	5.47	26.00	60.50
	2	3.15	1.30	0.8295	4.93	26.00	64.65
	3	3.45	1.60	0.7350	4.93	25.00	59.89
3	1	2.95	1.40	0.1995	6.13	27.00	55.38
	2	3.20	1.30	0.3885	4.53	28.00	62.05
	3	3.50	1.30	0.8085	5.33	27.00	60.59
4	1	3.10	1.00	0.7245	5.47	31.00	56.72
	2	3.80	1.10	0.8820	4.67	27.00	59.11
	3	4.00	1.20	0.8820	4.80	25.00	59.98
5	1	4.15	1.60	0.7980	4.80	26.00	54.26
	2	4.19	1.30	0.7665	4.93	32.00	50.39
	3	4.10	1.50	0.8400	6.27	32.00	50.62
6	1	2.29	1.20	0.7560	6.27	31.00	53.43
	2	2.35	1.20	0.7875	6.40	28.00	54.29
	3	2.84	1.20	0.8295	5.33	27.00	67.21
7	1	2.14	1.00	0.7770	5.73	25.00	58.45
	2	2.30	1.10	0.8190	6.13	24.00	66.65
	3	2.85	0.90	0.9450	6.53	25.00	62.62
8	1	2.35	1.20	0.9345	5.87	26.00	59.30
	2	3.54	1.00	0.9450	6.13	23.00	61.01
	3	3.84	1.00	0.9450	6.93	24.00	66.08
9	1	2.89	0.90	0.9030	6.00	24.00	69.56
	2	3.44	1.10	0.5460	6.13	25.00	60.07
	3	3.60	1.20	0.5145	7.20	26.00	59.39