



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

**DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA
MADERA DE PINO CANDELILLO (*Pinus maximinoi* H. E. Moore)
PROCEDENTE DE LA FINCA RÍO FRÍO, TACTIC,
ALTA VERAPAZ.**

Mario Roberto Fonseca Maldonado

Asesorado por

Inga. Qca. Telma Maricela Cano Morales

Ing. For. Msc. José Mario Saravia Molina

Guatemala, mayo de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA
MADERA DE PINO CANDELILLO (*Pinus maximoi* H. E. Moore)
PROCEDENTE DE LA FINCA RÍO FRÍO, TACTIC,
ALTA VERAPAZ.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARIO ROBERTO FONSECA MALDONADO

ASESORADO POR
INGA. QCA. TELMA MARICELA CANO MORALES
ING. FOR. MSC. JOSÉ MARIO SARAVIA MOLINA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MAYO DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benítez
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne 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:

**DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MADERA DE
PINO CANDELILLO (*Pinus maximinoi* H. E. Moore) PROCEDENTE DE LA
FINCA RÍO FRÍO, TACTIC, ALTA VERAPAZ,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Química, el 16 de febrero de 2006.

Mario Roberto Fonseca Maldonado

DEDICATORIA A

DIOS

Por ser mi luz y guía en las acciones que he tomado en mi vida. Y sobre todo, por darme la fuerza para alcanzar mis metas.

MIS PADRES

César Augusto Fonseca de León y Carmen Vilma Maldonado Castillo. Gracias por creer en mí, por su comprensión, gran esfuerzo y apoyo incondicional en todo momento.

MIS HERMANOS

Pedro José, Sandra Antonieta, Vilma Gabriela, Marta María y César Antonio Fonseca Maldonado. Con mucho cariño y que este triunfo sea también de ustedes.

MI SOBRINO

Julio Roberto Sierra Fonseca, para que este logro le sirva de ejemplo en el futuro.

MI ABUELA

María Antonieta Castillo Castillo por su amor y comprensión durante toda mi vida.

JOSÉ PABLO DE LEÓN BARRIOS (Q. E. P. D.)

Gracias por ser un gran amigo, por compartir tu amistad durante toda la vida y sobre todo por enseñarme que con esfuerzo todo es posible. Nunca te voy a olvidar, ya que siempre estarás en mi corazón.

AGRADECIMIENTOS A

MI TÍA

Vitalina de León, gracias por su apoyo y cariño en el transcurso de estos últimos años.

MIS PRIMAS

Roselva Wug y Verónica Barrios, gracias por su apoyo y por los momentos que hemos vivido juntos.

LA FAMILIA

BARRAGÁN GÁLVEZ

Por abrirme las puertas de su hogar y su corazón, gracias por el apoyo y cariño que me han brindado siempre.

INGA. TELMA CANO

Gracias por creer en mí, por darme la oportunidad de realizar este trabajo, por su amistad y apoyo incondicional.

MIS AMIGOS

Erickson Escobar, Aníbal Aja, Susana Aroche, Claudia Morales, Nora Deulofeu, Darío Barraza, Oscar Girón, Fernando Mérida, Gustavo Hidalgo, Lucy Palencia, Jacobo Lou, Karina Gaitan, Etelvina Tzep, Francisco Meléndez, Adrián Soberanis, David Cerezo, Alejandra Villatoro, Adela Marroquín, Krista Aguilar, Magda Juárez, Danilo Pérez, Francisco Granados, Mauricio de León, Roberto Barrios. Gracias por su apoyo, ayuda y sobre todo por su amistad en el transcurso de la carrera.

**MIS COMPAÑEROS DE
QUÍMICA INDUSTRIAL**

Ing. Jorge Godínez, Inga. Ericka Cano, Cinthya Ortiz, Mario Mérida, Manolo Muralles, y Francisco Paz. Gracias por su apoyo y amistad en la realización de este proyecto.

**MIS PADRINOS DE
GRADUACIÓN**

Gracias por el apoyo, la amistad y los consejos que siempre me han brindado.

ING. CÉSAR GARCÍA

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

ING. JOSÉ SARAVIA

Por su apoyo y respaldo en el trabajo realizado.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
HIPÓTESIS	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	
2.1 Los pinos	3
2.2 La madera, propiedades generales y específicas	11
2.3 Anatomía de la madera	15
2.3.1 Clasificación de las maderas	15
2.3.2 Estructura del tallo	15
2.3.3 Componentes del tallo	16
2.4 Características naturales de la madera	19
2.4.1 Composición química	19
2.4.1.1 Componentes de la pared celular de la madera	21
2.4.1.2 Componentes extraños de la madera	33
2.5 Fundamentación teórica de la especie Pino candelillo (<i>Pinus maximinoi</i> H. E. Moore)	48
2.5.1 Taxonomía de la planta	48
2.5.2 Descripción botánica	49

2.5.3	Descripción anatómica	51
2.5.4	Ecología de la planta	54
2.5.5	Características de la madera	55
2.5.6	Usos principales	56
2.6	Fundamentación teórica de la metodología	56
2.6.1	Lixiviación	56
2.6.2	Secado	58
2.6.3	Gravimetría	59
2.6.4	Volumetría	60
2.6.5	Calcinación	61
3.	METODOLOGÍA	
3.1	Metodología de investigación	63
3.1.1	Localización	63
3.1.2	Recursos	65
3.2	Metodología experimental	68
3.2.1	Obtención y preparación de las muestras	68
3.2.2	Determinación de Extraíbles	70
3.2.3	Determinación de Lignina	72
3.2.4	Determinación de Taninos	74
3.2.5	Determinación de Celulosa	77
3.2.6	Determinación de Cenizas	79
3.2.7	Determinación de Humedad	81
3.3	Diseño experimental	83
3.3.1	Diseño de tratamientos	83
3.3.2	Análisis estadístico	86

4. RESULTADOS	89
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	93
CONCLUSIONES	101
RECOMENDACIONES	103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
BIBLIOGRAFÍA	109
APÉNDICES	111

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Cono maduro y hojas adultas aciculares	7
2. Fin de crecimiento primario e inicio de crecimiento secundario	9
3. Diagrama esquemático del tallo en sección transversal	19
4. Esquema general de los componentes químicos de la madera	20
5. Estructura molecular de la celulosa	24
6. Proceso de obtención de la celulosa	26
7. Usos de la celulosa	26
8. Estructura molecular de la lignina	32
9. Estructura molecular de los taninos	44
10. Copa y hojas del pino candelillo	50
11. Fruto y semilla del pino candelillo	50
12. Traqueidas del pino candelillo	52
13. Rayos de xilema del pino candelillo	52
14. Conducto resinífero del pino candelillo	53
15. Anillos de crecimiento del pino candelillo	54
16. Origen de las muestras a tres diferentes alturas	85
17. Concentración promedio de celulosa y lignina	90
18. Concentración promedio de cenizas y taninos	90
19. Concentración promedio de extraíbles y humedad	91
20. Concentración promedio de celulosa en función de la altura	95
21. Concentración promedio de extraíbles en función de la altura	97
22. Concentración promedio de cenizas en función de la altura	99

23. Madera inmersa en solución de NaOH (Obtención de celulosa)	121
24. Filtrado de la mezcla (Obtención de celulosa)	121
25. Producto seco (Obtención de celulosa)	122
26. Obtención de lignina	122
27. Secuencia para la cuantificación de taninos	123
28. Muestras de extracto tánico seco	124
29. Muestras de madera y mufla para la calcinación	124
30. Muestras a calcinar y cenizas como producto	125

TABLAS

I.	Composición química de la madera (%)	21
II.	Variables para el diseño unifactorial en un sólo sentido	86
III.	Análisis de varianza para el diseño unifactorial en un sólo sentido	88
IV.	Resultados generales de la composición química de la madera de Pino Candelillo (<i>Pinus maximinoi</i> H. E. Moore)	89
V.	Datos calculados para celulosa	111
VI.	Datos calculados para lignina	111
VII.	Datos calculados para extraíbles	111
VIII.	Datos calculados para taninos	112
IX.	Datos calculados para cenizas	112
X.	Datos calculados para humedad	112
XI.	Resultados del análisis de varianza para celulosa	113
XII.	Resultados del análisis de varianza para lignina	113
XIII.	Resultados del análisis de varianza para extraíbles	113
XIV.	Resultados del análisis de varianza para taninos	114
XV.	Resultados del análisis de varianza para cenizas	114
XVI.	Resultados del análisis de varianza para humedad	114
XVII.	Concentración promedio de los componentes determinados	115
XVIII.	Datos originales para la determinación de celulosa y lignina	117
XIX.	Datos originales para la determinación de taninos y extraíbles	118
XX.	Datos originales para la determinación de cenizas y humedad	119

LISTA DE SÍMBOLOS

msnm	Metros sobre el nivel del mar
A.C.S	American Chemical Society
pH	Potencial de hidrógeno
°C	Grado Celsius
uma	Unidad de masa atómica
gr/cm³	Gramos por centímetro cúbico
ml	Mililitros
cm	Centímetros
m	Metros

mm	Milímetros
Dap	Diámetro a la altura del pecho
D6	Altura comercial del fuste
A	Nivel de confianza estadística
H₀	Hipótesis nula
H₁	Hipótesis alterna
μ_i	Media de poblaciones
F₀	Fisher observada
F_t	Fisher tabulada

GLOSARIO

Aceites esenciales	Constituyen una mezcla de sustancias volátiles, en donde predominan los terpenos y terpenoides oxigenados (alcoholes y ácidos).
Ácidos grasos	Compuestos orgánicos pertenecientes a los ácidos carboxílicos. Presentes en aceites y grasas como mezclas de ésteres grasos y glicerina.
Alcaloides	Componentes distribuidos ampliamente en la planta, constituidos heterocíclicamente conteniendo nitrógeno.
α-celulosa	Componente biológico de mayor abundancia en el planeta, constituyente fundamental del papel. Polisacárido que forma la pared de las células vegetales.
Análisis gravimétrico	Análisis cuantitativo de una sustancia por medio de la obtención de un peso.
Análisis volumétrico	Análisis cuantitativo que consta de la medición del volumen de reactivo que hay que gastar hasta que ocurre una reacción en el líquido analizado.

Calcinación	Proceso en donde un cuerpo se somete al calor para eliminar las sustancias volátiles.
Colofonia	Resina sólida, producto de la destilación de la trementina, empleada en farmacia y para otros usos.
Extraíbles	Compuestos de composición química variada, tales como grasas, gomas, resinas, aceites esenciales, azúcares, alcaloides, almidones y taninos.
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 la humedad relativa del aire, y el contenido de humedad de la madera.
INAB	Siglas para Instituto Nacional de Bosques.
Lignina	Compuesto de naturaleza aromática de alto peso molecular, con una probable asociación con los polisacáridos de la madera.
Oleoresina	Líquido procedente de varias plantas, en donde en un aceite volátil se disuelve resina.
Silviquímicos	Compuestos químicos similares a los extraíbles de la madera.

Sustancias pécticas	Son carbohidratos que se encuentran en las membranas de células hembra jóvenes.
Taninos	Sustancia astringente, de sabor amargo, contenida en la corteza mayormente de ciertos árboles, encino, olmo, sauce, en la uva y otros materiales biológicos. Se emplea en la medicina, curtición de pieles entre otros usos.
Terpenos	Son hidrocarburos de composición $C_{10}H_{16}$ (derivados del isopreno C_5H_{10}). En los aceites esenciales aparecen monoterpenos.
Tropolones	Polifenoles contenidos en los extraíbles de la madera.

RESUMEN

Se caracterizó químicamente la madera de la especie *Pinus maximinoi* H. E. Moore, de seis años de edad, procedente de la Finca Río Frío, situada en el municipio de Tactic, del departamento de Alta Verapaz.

Las muestras de madera utilizadas fueron molidas en el taller de Carpintería del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería y tamizadas en una malla 40 mesh, recolectando la fracción que pasó por ella.

Los ensayos químicos realizados son los siguientes: Preparación de madera libre de sustancias extraíbles según norma ANSI/ASTM D1105-56, Determinación de Alfa Celulosa en madera según norma ANSI/ASTM D1103-60, Lignina en madera según norma ANSI/ASTM D1106-56, Cenizas en madera según norma ANSI/ASTM D1102-56, Taninos en madera según método de tara en vaina y Contenido de Humedad en base húmeda.

Se analizaron nueve árboles a tres diferentes alturas, siendo altura dap (diámetro a la altura del pecho 1.30 m.) o basal, altura comercial media y alta o apical. Para el Pino Candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore) se obtuvieron los resultados: la celulosa entre un 46% y 59% en peso, la lignina entre 22% y 34%, las sustancias extraíbles entre 6% y 12%, los taninos puros entre 0.05% y 0.18%, y las cenizas entre 0.1 y 0.7%.

La concentración de celulosa, lignina, sustancias extraíbles, taninos, cenizas y contenido de humedad no varían significativamente en función de la altura en que se extrae la muestra. Lo que indica que en cualquier parte del árbol se pueden encontrar en una cantidad similar.

OBJETIVOS

- **General**

Determinar la composición química de la madera de Pino candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore) procedente de la finca Río Frío, Tactic, Alta Verapaz, como parte del proyecto “Estudio tecnológico integral de la madera y corteza del primer raleo de cuatro especies de pino cultivadas con fines industriales”.

- **Específicos**

1. Determinar la composición química de la madera de Pino candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore), aislando y cuantificando sus componentes; taninos, lignina, α -celulosa, extraíbles y cenizas.
2. Determinar el efecto que tiene la altura a la cual se toma la muestra, sobre la composición química de la madera de Pino candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore).
3. Determinar el porcentaje de humedad de muestra de la madera de Pino candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore).

HIPÓTESIS

No existen diferencias en la composición química seleccionada en función de la altura del árbol de Pino candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore), especie forestal nativa de Guatemala.

Hipótesis Estadística

Hipótesis nula: (H_0)

No existe diferencia significativa en la composición química seleccionada a diferentes alturas, de una especie forestal de Guatemala.

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

Hipótesis alterna: (H_1)

Sí existe diferencia significativa en la composición química seleccionada a diferentes alturas, de una especie forestal de Guatemala.

$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

INTRODUCCIÓN

Guatemala cuenta con una gran riqueza forestal consistente en más de 500 especies forestales; sin embargo, el aprovechamiento del bosque natural se ha caracterizado por selectivo (principalmente Caoba y Cedro) e irracional, sin respetar tasas de crecimiento y regeneración. Además, el sector forestal sólo aporta el 2.5% al PIB nacional, lo que no guarda relación con la riqueza y potencial forestal del país.

Basados en lo anterior, la presente investigación busca generar información acerca de la caracterización química de la madera de pino. Para dicho estudio se cuenta con la madera de Pino candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore), utilizando tres diferentes alturas de toma de muestra a lo largo del árbol, con la finalidad de evaluar si el porcentaje de componentes químicos es el mismo para las tres diferentes alturas. Los componentes químicos a determinar son celulosa, lignina, extraíbles, taninos, cenizas y humedad; todos como porcentaje en peso base húmeda.

Además, la investigación es parte del proyecto No. 03-03 del FODECYT, el cual trata de la caracterización de las propiedades físicas, anatómicas, químicas y mecánicas de la madera de cuatro especies de pino cultivadas con fines industriales, una de las especies es el Pino candelillo. Por lo que la información que se genere a partir de este documento, junto con la de los otros componentes, físico, mecánico y anatómico, servirá para realizar una posterior evaluación del uso industrial de la madera de dicha especie, y así poder ampliar el campo en donde sea utilizada.

1. ANTECEDENTES

En Guatemala la madera constituye el componente con mayores posibilidades futuras. La importancia de este recurso renovable es de relevancia para el país, ya que la explotación de este recurso, tanto en la industria del aserrío como en el pulpaje de la madera, genera una gran cantidad de desechos, destacándose la corteza por el gran volumen disponible. La corteza del árbol representa entre 10 y 15% de su peso y prácticamente no tiene valor económico alguno y tradicionalmente se utiliza como combustible. En los últimos años en varios países esta siendo aprovechada en la producción de taninos, los cuales están siendo empleados en la industria de curtición de pieles.

Una de las premisas en las que se basan los estudios acerca de las alternativas del uso de la madera y corteza, es que no existe en Guatemala un conocimiento científico y analíticamente sustentado sobre las características, posibilidades y usos de la enorme variedad de especies forestales que existen en el país, y que ese desconocimiento dificultaba el uso y el mercadeo de aquellas especies que no habían sido tradicionalmente utilizadas. De acuerdo algunas experiencias y conocimientos se conocen investigaciones de este tipo siendo algunas de las más importantes:

1. "Caracterización tecnológica de 15 especies forestales nativas para su uso industrial". Realizado por INAB. Guatemala 1998. En este trabajo se determinaron las características físicas, mecánicas, anatómicas y químicas de estas 15 especies forestales del bosque natural de Guatemala.

2. "Determinación de componentes químicos de la madera de cinco especies de encino del estado de Puebla". Realizado por J. Amador Honorato Salazar y Jorge Hernández Pérez. México 1998. En este trabajo se determinaron los contenidos de celulosa, lignina, pentosanos, extractivos solubles en etanol-benceno, ceniza, sílice y taninos en una mezcla de albura-duramen.
3. "Comparación del contenido de compuestos fenólicos en la corteza de ocho especies de pino". Realizado por Martha Rosales Castro y Rubén F. González Laredo. México 1998. En este trabajo se evaluó el contenido de taninos condensados y fenoles totales, expresados como ácido tánico, en extractos etanólicos y acuosos de las cortezas de las ocho especies de pino abundantes en el estado de Durango.
4. "Polifenoles curtientes en corteza de tres especies forestales chilenas". Realizado por Jaime Guillermo Guerrero Marina. Chile 1997. En este trabajo se realizó un estudio sobre los componentes estructurales, cenizas, extraíbles y principalmente los polifenoles curtientes (taninos) presentes en las tres especies forestales de Chile.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Los Pinos

- **Área:** el género *Pinus*, que incluye los verdaderos pinos, está formado por plantas que crecen todas al estado natural, en el Hemisferio Norte, desde zonas frías que rodean el mar Ártico, por toda Europa, Asia y América del Norte, hasta los países cálidos y lluviosos subtropicales y tropicales, en las Indias Orientales, Archipiélago Filipino, las Antillas, Islas Bahamas, México, Guatemala, Honduras, Nicaragua, con una mayor área de difusión dentro de regiones templadas, pero sin traspasar nunca el Ecuador para dispersarse en el Hemisferio Sur.
- **Caracteres Botánicos:** los pinos son árboles de follaje persistente, con hojas de tres tipos: las *primordiales*, notables en las plántulas, arbolitos jóvenes, rara vez se les observa sobre madera vieja, de forma linear, lanceolada, con borde serrado, solitarias, insertas en forma espiral a lo largo del hipocótilo o de las ramitas jóvenes; *brácteas*, de lámina reducida a pequeñas brácteas, de forma triangular, con borde entero o ribeteado, insertas en la axila de brotes cortos, prontamente caducas, excepto en la parte basal, donde se las ve persistir; *hojas adultas*, aciculares o triangulares, insertas en los nudos en haces de 2-3-5 hojas, rara vez mayor número, ocasionalmente solitarias, envueltas en su parte baja por una vaina membranosa, persisten en el árbol dos años o más, manteniendo al árbol con follaje persistente. Este carácter de las hojas adultas o aciculares, aunque no inmutable, puesto que puede variar en algunas especies con la edad del árbol y la

fertilidad del sitio, adquiere cierto valor en el estudio sistemático de la especie por su constancia; la mayoría de las claves de determinación de las especies se basan en la posesión de 2-3 ó 5 acículas en el haz. Una particularidad de importancia, para el reconocimiento de las especies, la constituye la anatomía de las hojas. En una sección transversal de una hoja acicular, tomada en su parte media, se pueden observar 1-2 haces fibrovasculares y 2 o más canales secretores resiníferos; la posición en que se encuentran los canales en el corte es constante para una misma especie y pueden ocupar las siguientes: 1) marginales, periféricos, ubicados debajo de la epidermis; 2) mediales o parenquimatosos, incluidos ambos dentro del tejido de la hoja; 3) internos, sitios dentro de los haces fibrovasculares; 4) dos de estas formas, asociadas. (Ref. 26)

Conviene hacer notar que los pinos que llevan 2-3 acículas en el haz pertenecen casi siempre a árboles productores de madera dura, resinosa, poseedores de una corteza que se resquebraja o se levanta en escamas, que llevan hojas con vaina persistente, conos erectos, de escamas engrosadas en el dorso, con un ombligo central y granos con ala articulada, en tanto que las especies de cinco agujas en el haz agrupan, salvo algunas excepciones, a árboles productores de maderas blandas, poco resinosas, que llevan piñas un tanto péndulas, de escamas poco engrosadas en su ápice, con un ombligo marginal e incluyen semillas con un ala fijada o sin alas.

Las flores masculinas aparecen en los extremos de los brotes, integrando inflorescencias en forma de amento, de color amarillo anaranjado, sobre las que van insertas en espiral flores estaminadas compuestas por dos antenas y un conectivo en forma de cuña.

Las flores pistiladas, verdosas o purpurinas, colocadas en la axila de una pequeña bráctea producen dos óvulos internamente, cerca de la base. Después de la fertilización el cono adquiere desarrollo y las escamas leñosas se cierran fuertemente, permaneciendo comprimidas, unas contra otras, hasta la madurez, aprisionando en su interior las semillas, oportunidad en que se produce, salvo excepciones, la dehiscencia o apertura del cono y el desprendimiento de las semillas, que merced a los apéndices alados que poseen pueden ser arrastradas por acción del viento, facilitando de esta forma la dispersión. (Ref. 26)

El cono no tarda en desprenderse y caer, salvo en algunas especies en la que se torna más o menos persistente, conservándose por algún tiempo adherido a la ramita; en este caso es dado observar sobre un mismo pie conos en curso de desarrollo, otros maduros y muchos, de años anteriores, ennegrecidos, que han perdido sus semillas.

Los principales elementos de un cono los constituyen las escamas (carpelos), unidas al eje central leñoso siguiendo una línea espiral; estas escamas, de consistencia variable, llevan dos depresiones u ombligos en los que van colocadas las semillas. La parte expuesta al exterior de la piña, el apófisis, afecta por lo común una forma rómbica y presenta un color más claro que el resto del cono; la superficie lisa, rugosa, con hoyos o surcos, en unas pocas especies se torna ligeramente reflexa o revoluta, mientras que en otras aparece con el borde dentado.

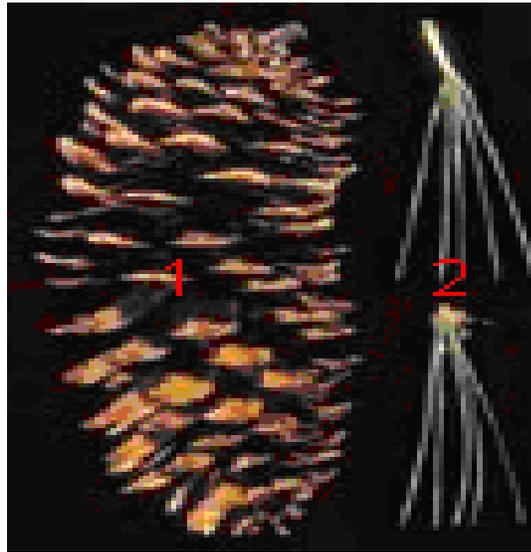
El umbo, pequeña cicatriz en que termina el apófisis, constituye a veces una pequeña prominencia, en tanto que en algunas especies

adquiere la forma de púa o gancho. Cuando el umbo se forma en el extremo de la escama se denomina Terminal, en tanto que si éste aparece en la parte baja se le llama dorsal.

El cono se forma en la primavera, pero el polen depositado por el viento y cuya misión será fertilizar las flores pistiladas contenidas en su interior, apenas alcanza los óvulos en la primavera del segundo año; a partir de este momento alcanza rápido desarrollo, madurando sus granos a fines de verano y otoño, salvo contadas especies, que exigen una tercera estación de crecimiento para alcanzar su madurez. El tamaño y consistencia del cono varía fundamentalmente con la especie; los pinos productores de maderas blancas, dijimos presentan frutos por lo general de consistencia membranosa, en tanto que en las especies resinosas las escamas adquieren una estructura leñosa.

La semilla es una nuez de tamaño variable; además del germen contiene una almendra con reservas amiláceas, aceitosas, que en varias especies, dado el volumen y sabor, las hace apetecibles y, por lo tanto, frecuentemente se usan en la alimentación humana. Los piñones son un elemento valioso en la ración de muchas poblaciones indígenas y en los países civilizados, de uso universal en pastelería. En la mayoría de las especies, la semilla, de pequeño tamaño, está recubierta por una envoltura negruzca, marrón, que se prolonga por un ala de tamaño variable; de mayor longitud que el grano en algunas, es en otras rudimentaria o bien puede darse el caso de encontrarse ausente.

Figura 1. 1, Cono maduro; 2, Hojas adultas aciculares, reunidas en haces de 2 a 5, por lo común insertas en una ramita o braquioplasto y envuelta por una vaina membranosa, caduca o persistente.



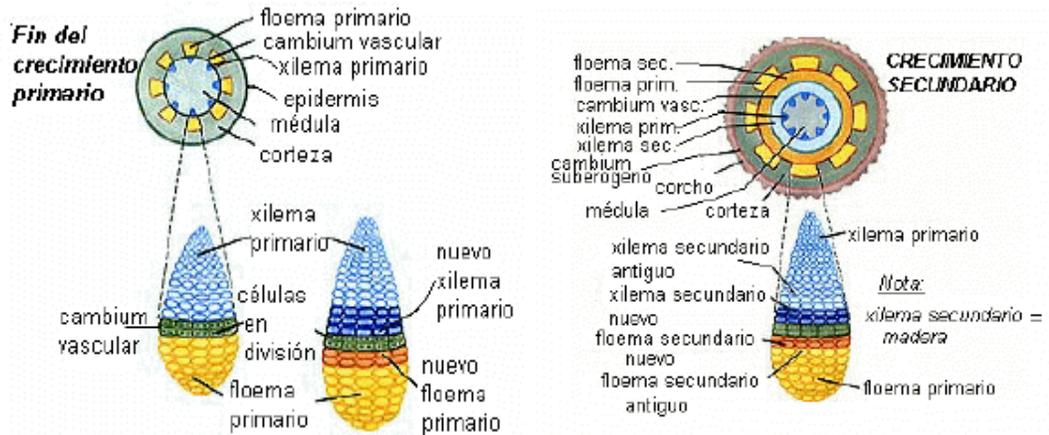
Fuente: Ref. 26, pág. 7.

- **Crecimiento:** la semilla de los pinos no es por lo común reposante; tan pronto cuenta con factores favorables calor y humedad adecuados emite una radícula que trata de profundizar en el suelo, verticalmente, y un tallo embrionario epiginio, que surge del suelo empujando los restos de la envoltura de la semilla, cuando ésta se desprende, aparecen las hojas cotiledonares, siempre en mayor número de dos, a veces 6-8, colocadas casi a una misma altura en forma de radios. Colocadas en lugares apropiados: frescos, ventilados, secos, las semillas de pino conservan su vitalidad por un tiempo más o menos prolongado, varios años a veces, pero en ambientes con temperatura elevada, con aireación excesiva, las reservas aceitosas se alteran rápidamente y el grano pierde su aptitud germinativa en un período relativamente corto.

A partir de la germinación, la planta adquiere un crecimiento de acuerdo con la precocidad de la especie y las condiciones del medio en que ésta vegeta. En su período juvenil casi todos los pinos, por lo general, adquieren un porte piramidal formado por un eje o guía, a cuyo alrededor se insertan lateralmente en verticilos regulares las ramas.

Con la edad, a medida que el árbol va adquiriendo su edad adulta, el porte varía sensiblemente según el pie ha crecido aisladamente o integrando una masa forestal. Cuando los pinos crecen aisladamente, en parques, el desrame natural resulta casi nulo y el árbol presenta, con la edad, una copa más o menos globosa, redondeada, achatada, abierta, según características de la especie; en cambio, en los pies que integran un monte forestal de alguna densidad presentan un tronco largo, desnudo, de escasa conicidad, condición ésta valiosa desde un punto de vista maderero. El brote primaveral de crecimiento es, asimismo, un elemento valioso para el reconocimiento de las especies. En algunos pinos el alargamiento se hace por emisión de un brote largo, sin nudos ni hojas, con un solo entrenudo, coronado en la parte superior por un ramillete de brotes; en la parte baja de estas ramitas se insertan, por lo general, las flores estaminadas, en tanto que, entre las yemas terminales, una o más pueden diferenciarse, dando origen a flores pistiladas, que por su evolución dan origen a los pequeños conos (uninodales); en otras especies, el brote largo de crecimiento está dividido en dos, rara vez en más nudos, cada uno de ellos produce hojas y un verticilo de yemas (multinodales).

Figura 2. Fin de crecimiento primario e inicio de crecimiento secundario de la semilla de pino.



Fuente: Ref. 26, pág. 15.

- **Madera:** en el tronco de árboles crecidos es fácil diferenciar la corteza, de color pardo, marrón, por lo general gruesa, profundamente surcada, rara vez lisa, escamosa, fuertemente adherida al cilindro central.

La madera está constituida por círculos concéntricos, correspondientes a los períodos de crecimiento, más o menos espesos, conforme al vigor de desarrollo de la especie, a la fertilidad del suelo y a la benignidad del clima en que ésta crece. En los pinos resinosos, la albura o sámago se diferencia perfectamente del duramen o madera de corazón; la primera aparece teñida muy débilmente de rojo moreno, en tanto que el corazón ennegrece, especialmente después del corte; en los pinos blandos esa diferencia de coloración es menos notable.

El leño de los pinos está constituido casi exclusivamente por elementos simples llamados traqueidos, de forma alargada, con un diámetro más o menos uniforme, cerrados en sus extremos, de una longitud de 3½ mm como término medio, cien veces más largos que anchos, de sección aproximadamente cuadrangular o rectangular,

provistos de perforaciones (aereolas) a lo largo de las paredes que sirven al intercambio en el proceso circulatorio.

La madera de primavera, compuesta por elementos de mayor diámetro, formados por una membrana más delgada, por lo que el leño adquiere una coloración más clara; la de verano, integrada por traqueidos más pequeños, de membrana más espesa, que originan tejidos más densos, de color más oscuro.

Los radios medulares son muy poco visibles en la madera de los árboles coníferos; en cambio, son frecuentes, en el leño de los pinos, los canales resiníferos, verticales o radiales, angostos, intercelulares, de largo indeterminado, cuya presencia es fácil percibir en el leño de la especie resinosa bajo la forma de puntos oscuros, sumergidos dentro de una masa más oscura, en la madera de verano; los horizontales, en la misma dirección que los radios medulares, se destacan en forma clara u oscura, según la incidencia de la luz; en los tejidos cortical y liberiano pueden aparecer, además, canales resiníferos. En los pinos blancos, no resinosa, los canales aparecen en las secciones, pero en forma mucho menos perceptible.

- **Especies:** el género *Pinus* comprende unas 80 especies; para su estudio se las ha agrupado atendiendo a características morfológicas de algunos órganos, número de hojas en el haz, lo que permite establecer claves bastante seguras para su determinación, aun cuando a veces agrupan especies bien distintas entre sí, razón por la que se trata de formar grupos afines.

La clasificación de Pilger (1903) divide a las especies de pinos conocidas en dos grandes subgéneros: *Haploxilón*, que encierra a los pinos blancos o blandos, no resinosa, cuyo follaje está constituido, por lo general, por hacecillos de 5 hojas, y *Diploxilón*, que comprende a los

pinos productores de maderas más duras, más coloreadas, resinosas, con 2 hojas por lo común, en el haz foliar. (Ref. 26)

2.2 La madera, propiedades generales y específicas

La madera es un material complejo, con propiedades y características que dependen no sólo de su composición sino de su constitución, de 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 y por último formar la estructura resistente o portante del árbol. Por lo que estas propiedades y posibilidades de empleo son, en definitiva, la consecuencia de los caracteres, organización y composición química que la constituyen. (Ref. 2)

La madera como tal se usa extensamente en la industria química a causa de sus propiedades físicas y mecánicas; es fuerte, puede trabajarse con herramientas sencillas, resiste los ácidos débiles, es un buen aislante térmico y eléctrico, tiene un coeficiente elevado de resistencia-peso. Como materia prima química, la madera puede usarse para obtener diversos productos. A diferencia de lo que sucede con la mayor parte de las materia primas, la madera es un recurso renovable. (Ref. 1)

Entre las principales propiedades físicas de la madera se encuentran:

- **Resistencia a la humedad:** La humedad es la propiedad más importante, pues influye sobre todas las demás, 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.

La higroscopicidad hace que la madera en condiciones normales de uso siempre contenga una cierta cantidad de agua en las paredes de las células que la conforman pero además y lo más importante, es que la variación de esa cantidad de agua tiene grandes implicaciones en las demás propiedades como son su resistencia mecánica, su aptitud para el trabajo con máquinas y herramientas, su aptitud para recibir acabados y adhesivos, el poder calorífico que puede generar, su resistencia al ataque de hongos cromógenos (manchadores) y xilófagos (de pudrición), en el peso y, sobre todo, en los cambios dimensionales que sufre la madera a consecuencia precisamente de la variación en su contenido de humedad. La madera en servicio presenta un contenido de humedad que generalmente oscila entre 6 y 18 % en base seca, dependiendo del tipo de uso, de si está expuesta a la intemperie y dependiendo de la época del año; dicha variación de humedad en la madera puede ocasionar, entre otros aspectos, los inconvenientes o problemas en un mueble si no se encuentra la madera a su contenido de humedad en equilibrio.

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

- **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).

- **Agua de impregnación o de saturación:** es la que impregna la pared de las células rellenando los espacios sub-microscópicos 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 (absorción: retención de agua). Se puede eliminar por calentamiento hasta 100 - 110° 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 más repercusión que la ocupación física de los huecos, y por consiguiente no influye en la hinchazón o merma de la madera ni en las propiedades mecánicas.

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. (Ref. 5)

- **Resistencia al calor y al fuego:** la madera es muy estable a las temperaturas ordinarias. La degradación de la madera a elevadas

temperaturas es un proceso de descomposición de los componentes sólidos en líquidos volátiles y gases y va acompañada de una reducción en el peso, por la cual puede seguirse cómodamente la velocidad de descomposición. La pérdida de peso varía no solo con la temperatura, sino también con el tiempo de calentamiento. Los diferentes componentes químicos de la madera no se descomponen a la misma velocidad. Cuando se calienta la madera, la hemicelulosa se descompone más rápidamente que la α -celulosa; finalmente, la madera se vuelve más rica en lignina, se torna más porosa, menos densa y se inflama con mayor facilidad a medida que sufre descomposición térmica, por ello la temperatura de ignición de la madera no es constante, sino que varía con el tiempo de calentamiento. (Ref. 7)

- **Resistencia a los agentes químicos y a la pudrición:** la madera se utiliza como material estructural en la industria química por su resistencia a los ácidos débiles, lo cual la hace en mucho, superior al acero común, hormigón, caucho y algunos plásticos. De los ácidos minerales corrientes, el ácido nítrico (HNO_3) es el que ataca más a la madera. Las soluciones alcalinas atacan a la madera más rápidamente que los ácidos de la misma concentración. La madera presta buen servicio en contacto con las salmueras concentradas, pero oxidantes fuertes son perjudiciales. Rara vez se utiliza madera cuando se requiere una resistencia frente al cloro y a las soluciones de hipoclorito. En contacto con el hierro, en condiciones de humedad, la madera puede sufrir un deterioro serio en muy pocos años. La variación de la resistencia al ataque químico depende de la estructura anatómica, que rige la velocidad de penetración del agente químico, y

de la composición química de la pared celular, que afecta la velocidad de acción en el punto de contacto. (Ref. 7)

2.3 Anatomía de la madera

Anatomía de la madera es la rama de la ciencia botánica que procura conocer la constitución y el arreglo estructural u organización de los elementos que constituyen el tallo de los árboles.

2.3.1 Clasificación de las maderas

Las maderas pueden ser clasificadas taxonómicamente en dos categorías:

- Maderas Gimnospermas
- Maderas Angiospermas

Las primeras, también llamadas coníferas, resinosas, no porosas o maderas suaves, son producidas por especies del orden de las coníferas. El término no porosas se refiere a la ausencia de vasos o poros en su estructura. Las maderas de angiospermas son también llamadas follosas, porosas o maderas duras.

2.3.2 Estructura del tallo

El estudio anatómico de la madera pretende conocer principalmente la estructura del tallo, puesto que corresponde a la parte de mayor interés del vegetal. En plantas que viven más de un año su tallo va creciendo en grosor, llegando en bastantes casos a formar un verdadero tronco.

2.3.3 Componentes del tallo

En la sección transversal del centro a la periferia del tallo, localizan las siguientes regiones: médula, corno, albura y corteza (Fig. 3). Entre la corteza y la albura se encuentra una región denominada cambium, visible solamente al microscopio. En las maderas gimnospermas, principalmente, aparecen en el tallo, regiones oscuras intercaladas por regiones claras, en conjunto son denominadas anillos de crecimiento.

- **Médula o duramen:** es el tejido primario, continuo, localizado en la región central del tallo. Su función es almacenar sustancias nutritivas para la planta. El tamaño, coloración y forma son muy variables, principalmente en las Angiospermas. Es un tejido muy susceptible al ataque de microorganismos.
- **Corno y albura:** el tallo de una planta joven está constituido enteramente de células vivas y funcionales, responsables por la conducción de la savia bruta (agua y sales minerales) y otras actividades vitales asociadas con el almacenamiento de sustancias nutritivas. El conjunto de dichas células recibe el nombre de albura. La albura constituye la región permeable del tallo y presenta mayor importancia desde el punto de vista de tratabilidad de la madera. En esta región se encuentran almacenados materiales nutritivos para insectos, hongos y otros microorganismos que la deterioran con facilidad.

A partir de un determinado período de tiempo, que varía con la especie del vegetal y con las condiciones de su crecimiento, ocurre la muerte del protoplasma de las células centrales que forman la albura, esto conduce a la pérdida de

actividad fisiológica dando origen a la formación del cerno en estratos consecutivos. La transformación de la albura en cerno está acompañada por la formación de varias sustancias orgánicas conocidas genéricamente por extractivos o infiltraciones. Las maderas que presentan esas inclusiones o infiltraciones en los vasos son de permeabilidad muy baja o nula a las soluciones preservantes. Así, la parte central del tallo, consiste de tejido fisiológicamente muerto que constituye el cerno. En la práctica esas maderas son denominadas “maderas de albura” y son generalmente de fácil impregnación. De un modo general, el cerno presenta una baja permeabilidad respecto de la albura, durabilidad natural más alta y masa específica ligeramente superior. Este último hecho torna las propiedades mecánicas del cerno un tanto superiores a las de la albura.

- **Cambium:** estrato celular de las plantas leñosas, responsable del engrosamiento y desarrollo de tallos y raíces, formando en la parte interna ó capa de xilema, la albura y en la externa el floema que se coloca formando la corteza.
- **Corteza:** la corteza está constituida de dos estratos denominados: corteza interna, liber o floema, y corteza externa o ritidoma.

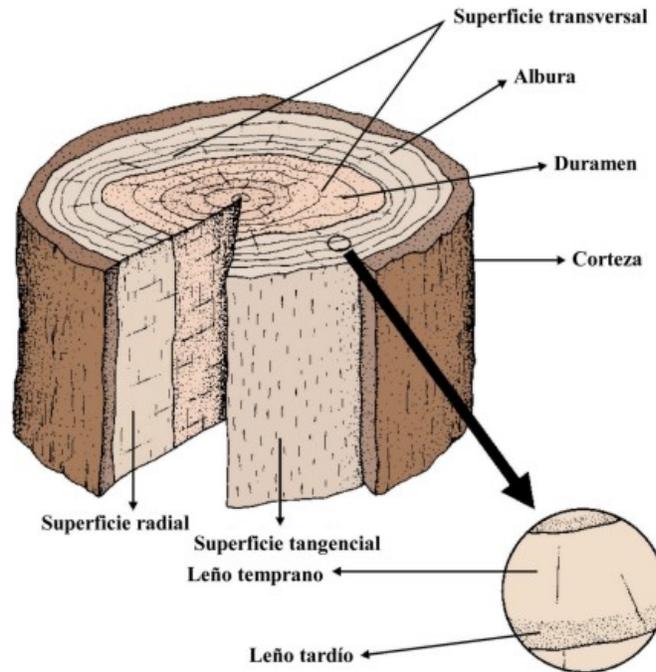
La corteza interna es fisiológicamente activa, de color claro y conduce a la savia elaborada. La corteza externa, compuesta de tejido muerto, protege los tejidos vivos del árbol contra el resecaimiento, ataque de microorganismos e insectos, daños mecánicos y variaciones climáticas.

El leño inicial presenta células con paredes delgadas, diámetro mayor y longitud relativamente menor que en el leño tardío. Por lo tanto el leño inicial es menos denso que el tardío. En las regiones de clima tropical, donde no hay estaciones bien definidas, los anillos que se forman en el tallo pueden no corresponder a los períodos anuales de crecimiento, como también puede ocurrir el apareamiento de más de un anillo de crecimiento durante el año.

- **Dirección de los fluidos en las Gimnospermas:** cerca del 93% del volumen de la madera de las Gimnospermas esta formado por traqueidos axiales comúnmente conocidos como fibras, los cuales son uno de los constituyentes celulares que se disponen a lo largo del árbol (sentido longitudinal). Estos tienen un centro hueco y generalmente vacío, y los fluidos pueden entrar directamente por las extremidades afiladas de las fibras para fluir libremente a través de la longitud de los mismos y pasar a las fibras adyacentes a través de puntuaciones areoladas, que no son más que interrupciones o lagunas en las paredes secundarias de las fibras.

Para el flujo en la dirección radial, los fluidos pueden entrar a través de los rayos en la superficie tangencial, fluir a lo largo de las células radiales por difusión, pasando de una a otra por medio de membranas simples ubicadas en las extremidades de las células radiales. La longitud de los traqueidos longitudinales o fibras es cerca de cien veces mayor que su anchura y por eso la penetración de los fluidos, en la dirección longitudinal de la madera, es mayor que aquella que la cruza radialmente. Experimentalmente fue demostrado que la mayor penetración de fluidos ocurría en leños tardíos.

Figura 3. Diagrama esquemático del tallo en sección transversal.



Fuente: Ref. 27.

2.4 Características naturales de la madera

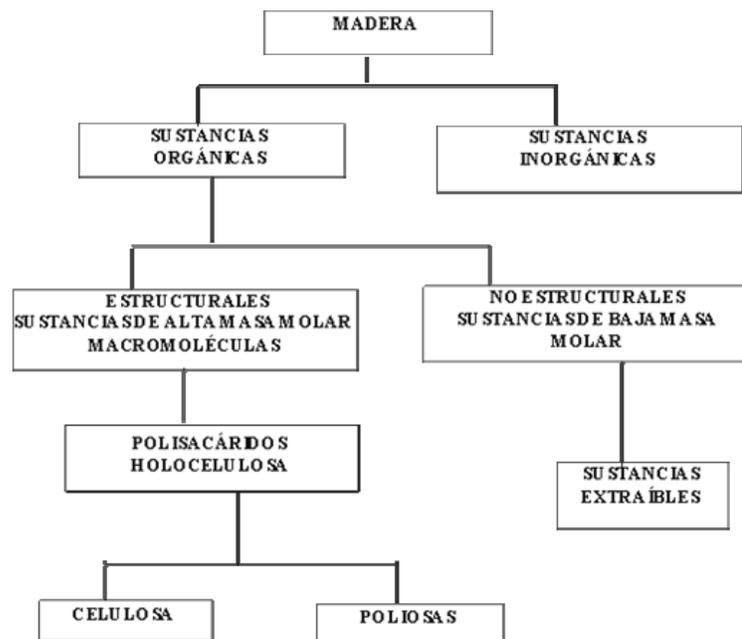
2.4.1 Composición química

La madera está constituida fundamentalmente por materias orgánicas tales como: carbono (50%), hidrógeno (6%), oxígeno (44%) y nitrógeno (0.1%). Los elementos fundamentales de la madera al estar combinados con otros, forman en general dos grupos de sustancias, las que conforman la pared celular, donde se encuentran las principales macromoléculas, celulosa, hemicelulosa (poliosas), lignina y también pequeñas cantidades de sustancias pécticas, que están presentes 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. La proporción y composición química de la lignina y las poliosas difiere para las maderas de coníferas y latifolias, mientras que la celulosa es uniforme en composición en todas las maderas. (Ref. 3)

Entre los compuestos orgánicos extraíbles se pueden encontrar hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, fenoles, aldehídos, cetonas, ácidos alifáticos, ceras, glicéridos, y compuestos nitrogenados. 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. Así también, los parámetros edafoclimáticos influyen en la composición química, ya que se presentan diferencias entre maderas que provienen de zonas templadas con las que provienen de zonas tropicales. (Ref. 9)

Figura 4. Esquema general de los componentes químicos de la madera.



Fuente: Ref. 9.

Tabla I. Composición química de la madera (%)

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: Ref. 25.

2.4.1.1 Componentes de la pared celular de la madera

Estos son compuestos químicos que forman una parte integral de la pared celular de la madera; son principalmente orgánicos en naturaleza pero materia mineral también está presente, como lo indica el residuo que queda cuando la madera es sometida a combustión completa. Los componentes de la pared celular no pueden ser removidos con solventes adecuados sin afectar ya sea la composición química de la madera, o bien la estructura física de la pared celular. Los componentes orgánicos de la pared celular de la madera son, en general, de dos clases, carbohidratos y los compuestos conocidos colectivamente como lignina.

A. Carbohidratos de la pared celular

Los carbohidratos son los componentes más importantes de la pared celular puesto que forman la armazón que soporta los tejidos de la planta. Además, están presentes como materiales de reserva en las células de la planta y por lo tanto constituyen una fuente de energía.

Constituyen del 65 al 75 por ciento del peso de la madera y están formados de celulosa y hemicelulosa. La fracción hidrocarbonada de la madera, libre de materiales extraños, es frecuentemente designada como holocelulosa.

A.1 Celulosa

Es reconocida como una de las sustancias orgánicas probablemente más abundantes en la naturaleza, y en la madera constituye el principal carbohidrato, más específicamente un carbohidrato conocido como un polisacárido insoluble en agua, en solventes orgánicos y en ácidos y álcalis diluidos. Está presente en un 40 a 60 por ciento del contenido de la pared celular.

La celulosa puede presentarse en dos formas modificadas, estas son: oxixelulosa e hidroxixelulosa. La oxixelulosa se forma como el resultado de la oxidación parcial de la celulosa con agentes oxidantes como hipocloritos, permanganato o dicromatos. La hidroxixelulosa resulta de la acción de ácidos diluidos. Ambos tipos de celulosa modificada merecen mención dado que su presencia resulta en la degradación de la calidad de la madera y en la reducción de su resistencia.

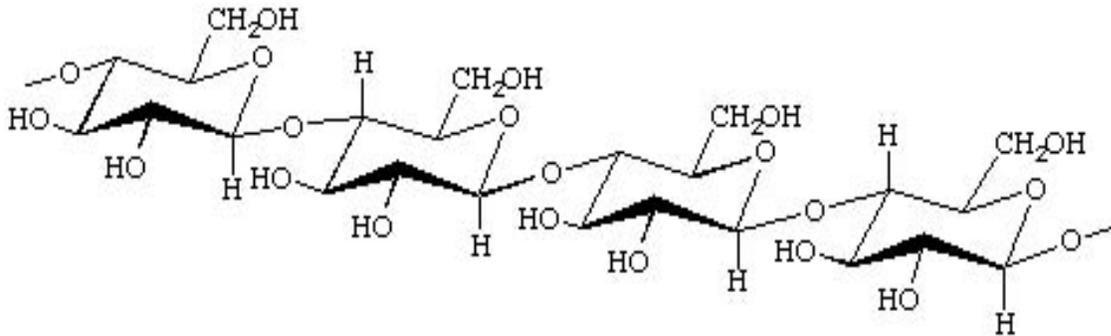
- **Estructura:** la celulosa está compuesta de moléculas de glucosa ($C_6H_{12}O_6$) como un monosacárido formado a través de la fotosíntesis del dióxido de carbono atmosférico.

Esta unión de moléculas de glucosa forma cadenas largas de biopolímeros de 4-(Glucosa)_n-β1, y es acompañada por la eliminación de una molécula de agua, cada molécula de glucosa agregada a la cadena gira 180° y la unión de dos unidades de glucosa da como resultado un disacárido llamado celabiosa. Este proceso de repetición y agregación indefinida de unidades de glucosa (monómeros) se llama polimerización. La fórmula empírica de la celulosa es (C₆H₁₀O₅)_n donde n es el grado de polimerización con un valor mínimo de 200. (Ref. 25)

Debido al tipo de enlace (β-1-4) la molécula de celulosa tiene una forma lineal, estabilizada por la formación de numerosos puentes de hidrógeno intracadenales e intercadenales. Entre 40 y 70 moléculas se encuentran agrupadas en fibrillas elementales de un espesor de 3,5 y 7,5 nm y una longitud de varios μm.

Las moléculas de celulosa están orientadas longitudinalmente formando un agregado cristalino fuertemente ordenado, en el que todas las moléculas presentan la misma polaridad, lo que indica que tienen su extremo reductor orientado hacia el mismo extremo de la microfibrilla. En estos agregados las moléculas de celulosa no están unidas covalentemente, estabilizándose su estructura solamente por puentes de hidrógeno (C₃-C₆) y (C₂-C₅), que aunque muy débiles individualmente, su elevado número hace de la fibra de celulosa una estructura muy firme y poco sensible a la degradación. (Ref. 13)

Figura 5. Estructura molecular de la celulosa.



Fuente: Ref. 15.

- **Propiedades:** las propiedades más importantes de la celulosa se relacionan, en primer lugar, con la susceptibilidad de la molécula a la hidrólisis y, en segundo lugar, con su capacidad de absorber agua. La celulosa puede presentarse en dos variedades: la celulosa ordinaria que es la natural, y la celulosa mercerizada que resulta de tratar la celulosa ordinaria por álcalis concentrados eliminando luego por loción el álcali fijado.

La celulosa presenta un alto grado de cristalinidad, pero no es 100% cristalina, dependiendo de la materia prima de donde proviene. La presencia de hemicelulosas en la celulosa de las maderas parece causar disturbios en la cristalinidad. Cuanto más cristalina es la celulosa mayor es su densidad.

Los análisis térmicos realizados a la celulosa en muchos casos han sido relacionados con el empleo de la madera y los materiales celulósicos, con fines energéticos y como una materia prima importante en la industria de los derivados. Los análisis térmicos realizados con más frecuencia a este tipo de material, son los

relacionados con el Análisis Termogravimétrico (TG), Análisis Térmico Diferencial (DTA) y la Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). Siendo este último el que brinda información termodinámica relacionada con cada paso de la descomposición térmica del material analizado a un intervalo de temperatura de óptimo aprovechamiento energético, así como de la pureza de cada componente presente en el material. (Ref. 22)

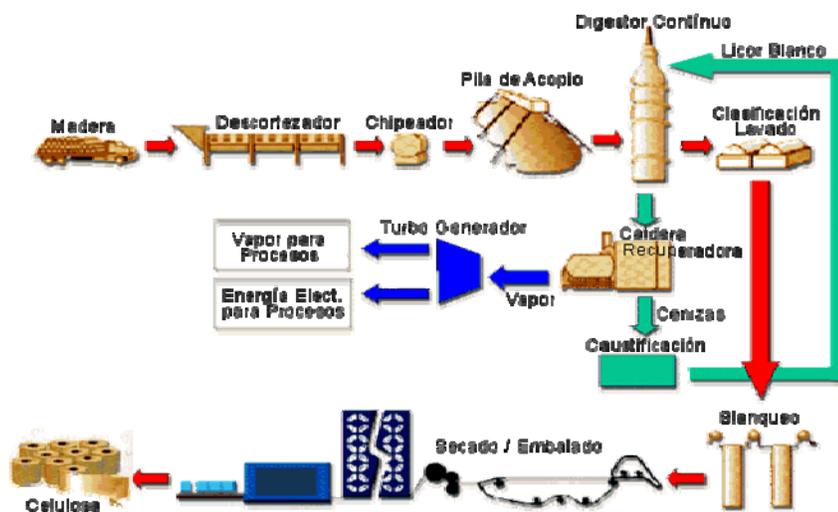
Los usos de la celulosa son muy importantes sirven para fabricar papel, diferentes tejidos, explosivos, celuloide, cera artificial, piezas para maquinaria, eléctrica y general, barnices, impermeables, etc. Pero para llegar a ser tan versátil se requirieron varios años de investigación y mejoramiento no solo de los métodos de obtención sino también y muy importantemente de las materias primas.

- **Proceso de obtención de la celulosa**

- **Proceso de Kraft:** se trata con solución de sulfuro sódico e hidróxido sódico en relación 1:3 durante 2-6 horas a temperaturas de 160-170 °C. Después, en ebullición, se añade sulfato sódico que posteriormente pasa a sulfuro sódico y se elimina.
- **Método de la sosa:** se usa hidróxido sódico para digerir el material.
- **Método del sulfito:** se digiere con solución de bisulfito cálcico con dióxido de azufre libre, y las ligninas se transforman en lignosulfonatos solubles.

En medio de este proceso la madera, llega y es descortezada y chipeada donde es echada a la caldera de acopio y de allí a una clasificación de lavado donde será seleccionada y blanqueada, más tarde se secará y embalará. Ciertas que sobran serán medidas en unos silos que después darán cenizas que serán usadas para dar energía.

Figura 6. Proceso de obtención de la celulosa.



Fuente: Ref. 29.

Figura 7. Usos de la celulosa.



Fuente: Ref. 29.

A.2 Hemicelulosa

Se ha definido como la porción de celulosa que puede ser extraída de la madera con álcalis diluidos, calientes o fríos, e hidroliza en ácidos o componentes del azúcar utilizando ácidos diluidos. Es una sustancia amorfa compuesta de polisacáridos tales como manosa, galactosa, arabinosa, xilosa, ácidos urónicos y, en algunos casos, ramnosa.

El contenido total de hemicelulosa se cree que comprende entre 15 y 30 por ciento de la sustancia de la pared celular. Ningún método analítico o esquema de preparación ha permitido realizar una separación neta en celulosa verdadera y hemicelulosa.

- **Estructura:** 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. (Ref. 23)
- **Propiedades:** 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, más suficiente adhesión mutua que es fortalecida por los puentes de hidrógeno y las

fuerzas de Van der Waals. Si son muy ricas en ácidos urónicos se llaman hemicelulosas ácidas; si no lo son, se denominan hemicelulosas neutras.

A.3 Holocelulosa

Así ha sido denominada la fracción total hidrocarbonada (celulosa y hemicelulosa) de la madera. El contenido de holocelulosa en la madera abarca del 70 al 90 por ciento total de las sustancias de la pared celular libre de extractivos o material extraño. La presencia de holocelulosa es, generalmente, mucho más elevado en maderas duras que en maderas blandas.

Todos los hidratos de carbono a veces se llaman, holocelulosa. En base a la solubilidad en 17.5% NaOH, la holocelulosa se subdivide en α -celulosa insoluble, y la β y γ -celulosas solubles. (Ref. 25)

La fracción celulósica de la madera, u holocelulosa, está constituida por una mezcla de polisacáridos bastante análogos, pero diferentes. Así una vez aislada toda la fracción celulósica se la trata con disolución de sosa cáustica al 17.5% a 20 °C, se solubiliza parcialmente, quedando un resto insoluble, que es la α -celulosa, llamada también celulosa noble. Al acidular la disolución resultante se separa la β -celulosa, manteniéndose disuelta la γ -celulosa, que precipita al agregar alcohol de 95%. El conjunto de β -celulosa y γ -celulosa constituye la hemicelulosa.

A.4 Sustancias pécticas

Son también hidratos de carbono o polisacáridos ramificados, formados por unidades de ácido galacturónico, que a veces pueden incluir moléculas de otros monosacáridos, como fructosa, xilosa y ramnosa.

Lo que las diferencia de las hemicelulosas es su alto contenido en ácido galacturónico. El peso molecular de las pectinas es habitualmente alto, como corresponde a su estructura formada por varios cientos o hasta 1000 unidades de monosacáridos. Si bien se encuentran en todas las plantas, los cítricos y las manzanas son especialmente ricas en pectinas. También las contienen las hojuelas del salvado, la cebada y las legumbres.

B. Lignina

Es un polímero aromático complejo, heterogéneo, ramificado, donde no existe ninguna unidad repetida definitivamente, no hidrato de carbono de la pared celular, constituido principalmente por un fenil propano sustituido. Por lo general, forma de 18 a 23 por ciento de madera y se encuentra concentrado en la lámina media y en la pared celular secundaria. La lignina es difícil de caracterizar porque en el proceso de aislamientos sufre alteraciones que varían según el método utilizado. Por esta razón, no tiene una referencia específica y se ha llegado a la conjetura, que es una mezcla compleja de compuestos con propiedades similares pero composición química desconocida o que varía en pequeñas formas. (Ref. 4)

Es un grupo de compuestos químicos usados en las paredes celulares de las plantas para crear madera. La palabra lignina proviene del latín *lignum*, que significa leño o madera; así, a las plantas que contienen gran cantidad de lignina se las denomina leñosas. 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 10000 unidades de masa atómica.

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.

Las ligninas de la madera dura y de la madera blanda difieren entre sí y probablemente la composición de la lignina varía de una especie a otra. Hoy día, la lignina constituye uno de los desperdicios industriales más grandes del mundo, cuando es desechada en la forma de derivados de lignina en el licor de sulfito empleado en el proceso industrial de transformación de madera en pasta. También se ha considerado responsable por la contaminación del agua, originada por descargar dicho desperdicio en ríos y lagos. (Ref. 21)

La separación de la lignina conlleva una degradación de su estructura por lo que resulta difícil obtener una lignina idéntica a la que se encuentra en la madera (lignina nativa) aunque la separación cuidadosa de la lignina se considera representativa de la lignina total en la madera. Los contenidos de lignina varían con la morfología 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. (Ref. 20)

- **Estructura:** la molécula de lignina es una macromolécula, con un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropiónicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico). El acoplamiento aleatorio

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 una aproximación de dicha estructura. Está formada por la polimerización deshidrogenativa al azar de alcoholes parahidroxicinámicos (alcohol p-cumarílico, alcohol coniferílico y alcohol sinapílico), en reacción catalizada por enzimas vía radicales libres. Las unidades de fenil propano (C_9) se unen por enlaces C-O-C y C-C, presentando en su estructura grupos hidroxilos, carbonilos, metoxilos y carboxilos.

Su estructura es rígida como modelo material. Sakakibara, K. En 1980, describió un modelo para la lignina de maderas blandas. Este demuestra una sección con 28 unidades de C_9 con elementos estructurales alternativos avalados por datos analíticos. El más reciente modelo de lignina es el expresado por Glasser, W. G. En 1981. Este modelo comprende 94 unidades correspondiendo a la masa molar total de más de 17000 y es basado en un amplio rango de determinaciones analíticas.

Figura 8. Estructura molecular de la lignina.

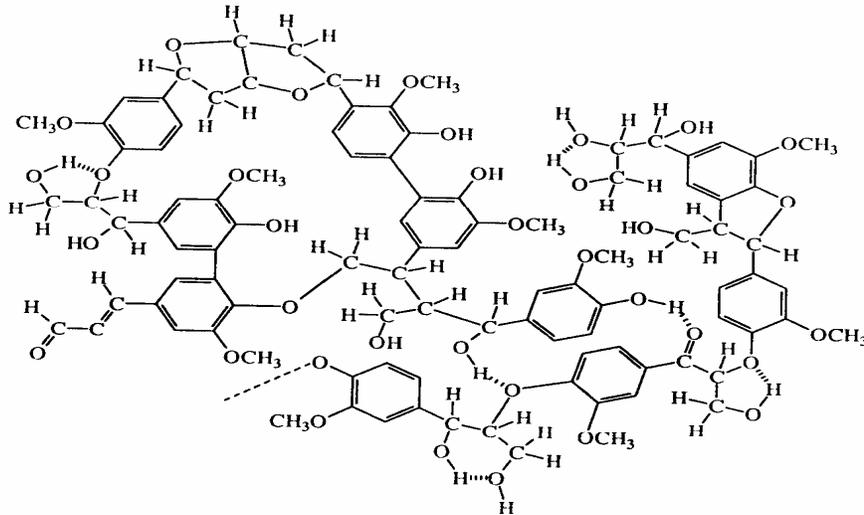


Figure 5.9. Structure of lignin. Note crosslinking due to adventitious radical reactions of C₆-C₃ cinnamylphenol precursors. From K. Haider, S. Lim, and W. Flaig, *Holzforschung* 18, 81-88 (1964). Reprinted by permission of Walter de Gruyter & Co.

Fuente: Ref. 11.

- **Propiedades:** según su origen, tiene densidades de 1.3 a 1.4 y un índice de refracción de 1.6, su color suele ser pardo, aunque experimentalmente se han hecho muestras de ligninas de colores muy claros. Su insolubilidad en ácido sulfúrico de 72% es la base de una prueba cuantitativa para distinguirlas de la celulosa y en otros carbohidratos en maderas y pulpas de madera. Las ligninas comerciales son solubles en soluciones alcalinas acuosas, y algunas son también solubles en muchos compuestos orgánicos oxigenados y en aminas. Por el calor, las ligninas no se funden, sino que se reblandecen y después se carbonizan. 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.

Poseen propiedades aglutinantes que conforman la consistencia fibrosa de las maderas (revistiendo las células del xilema), donde realizan la función mecánica de sostén. Su composición depende de muchos factores, entre ellos, el método utilizado para aislarlas, la especie que se estudie, la edad, parte del árbol, condiciones ambientales en que se ha desarrollado el árbol, etc. (Ref. 3)

2.4.1.2 Componentes extraños de la madera

En adición a sus componentes mayoritarios (celulosa, hemicelulosa y lignina), la madera contiene productos de tipo orgánico llamados componentes extraños (numerosas proteínas y sustancias pécticas) que son bastante insolubles, además de los productos que pueden ser removidos por extracción con solventes neutros tales como agua, alcohol, benzol, éter y, cloroformo, o por volatilización con vapor y son conocidos como extractivos.

Cada madera contiene algo de ellos, y se dice que algunas contienen cantidades representativas de los mismos. Son encontrados principalmente en el cerno de todas las especies, pero pequeñas cantidades pueden presentarse en la albura.

La importancia de estos compuestos se advierte por la influencia que tienen sobre algunas propiedades de la madera tal como la durabilidad natural que esta estrechamente relacionada con la toxicidad de sus extractivos, y por la relación con sus propiedades mecánicas y características de acabado donde la presencia de gomas y resinas puede ser muy perjudicial. Los extractivos a veces pueden ser específicos para la identificación de la madera, ya que

contribuyen a las propiedades como color, olor, durabilidad y adicionalmente pueden influir en la adhesión, secado y decoloración de la madera. (Ref. 21)

La proporción de extractivos varía de menos de 1% a más de 10% en peso seco de madera. Sin embargo, en algunos de los extractivos de las especies tropicales pueden sumar aproximadamente 20%. Las variaciones no sólo existen entre las especies, sino también dentro de un solo árbol, principalmente entre la savia-madera y corazón-madera. Ciertos materiales inorgánicos, como sales del calcio e inclusiones de sílice, no son solubles en los solventes mencionados, pero a veces es considerado como extractivos aquellos que no son componentes de la pared celular. Bajo este concepto, todos los materiales inorgánicos (ceniza) pueden ser considerados como extractivos. Ésos que residen en las paredes de la célula que no son componentes estructurales de las paredes, aunque estos estén dispersos en ellos. (Ref. 25)

Por lo tanto los productos extraños de la madera son agrupados, sobre la base de similitudes químicas, en aceites volátiles, ácidos derivados de resinas y grasas; taninos y materia colorante; carbohidratos; y sustancias diversas.

A. Extraíbles

Además de celulosa, hemicelulosa y lignina que son componentes macromoleculares, los árboles contienen otras sustancias en menor proporción, que no entran en la composición de las paredes celulares. Estos son los extractivos o extraíbles de los árboles y constituyen una fuente importante de fitoquímicos.

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. 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.

Según Emilianova, existe una considerable variación en la distribución de los extraíbles en un árbol; ellos se encuentran distribuidos en follaje, madera, corteza y raíces. Siendo la corteza y las raíces las partes donde se encuentran en mayor concentración los extraíbles. (Ref. 8)

A.1 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).

A.2 Sustancias solubles en disolventes orgánicos

En disolventes orgánicos fundamentalmente se extraen grasas, resinas y ácidos grasos, ésteres de estos ácidos, cera, fitoesterinas. 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 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. Según Yagodin, 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.

- **Aceites vegetales:** son comúnmente clasificados ya sea como aceites esenciales o aceites fijos y grasas. Los aceites esenciales son sustancias volátiles cuando se exponen al aire; usualmente poseen fuerza, fragancia y olores característicos. Pertenecen a diferentes clases de compuestos orgánicos. Predominan los terpenos y terpenoides oxigenados (alcoholes y ácidos), algunos fenoles, éteres, aldehídos, cetonas y lactosas. 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 ($C_{15}H_{24}$).
- **Aceites fijos y grasas:** en contraste, son no volátiles; son extraíbles con éter y también son solubles en alcohol o en una mezcla de alcohol y benceno. La distinción entre aceites fijos y

grasas es meramente física, es decir, un aceite es un líquido y una grasa es una sustancia sólida; frecuentemente, la misma sustancia es un aceite o una grasa dependiendo de la temperatura.

- **Azúcares:** el almidón es el componente extraño más común encontrado en la madera. Las cantidades apreciables en que se presenta hace a la madera susceptible de ser atacada por ciertos insectos y agentes fúngicos. El contenido de almidón en la madera puede ser reducido por el secado lento de la misma.

Además del almidón, azúcares tales como glucosa, manosa y fructosa se sabe que se presentan como constituyentes de la savia tanto en maderas duras como en maderas blandas. Por lo regular a los azúcares, almidón y algunos compuestos nitrogenados se les encuentra en la albura. Las sustancias fenólicas se encuentran normalmente en el duramen. Existe una variación en la concentración de los extraíbles a lo largo del tronco del árbol y entre este y las ramas. Estos constituyentes son responsables de algunas características de las plantas como resistencia natural a la pudrición, sabor y propiedades abrasivas. (Ref. 5)

- **Gomas:** son polisacáridos muy complejos que no forman parte de la pared celular sino que, en la planta, suelen destinarse a reparar áreas dañadas. Presentan una alta viscosidad. Su estructura está formada por largas cadenas de ácido urónico, xilosa, arabinosa o manosa. Entre las más conocidas se encuentran la goma guar, la goma arábiga, la de karaya y la de tragacanto.

A.3 Sustancias extrañas diversas

Además de los materiales extraños ya mencionados, se sabe que en las maderas de algunas especies de árboles se presentan otras sustancias, entre ellas alcaloides que poseen propiedades tóxicas. Se encuentran generalmente en solución en la savia de tejidos jóvenes, o en forma sólida en tejidos más viejos. Las proteínas constituyen otra clase de componentes extraños en la madera; difieren de los carbohidratos en que poseen no sólo carbono, hidrógeno y oxígeno, sino también nitrógeno. Puesto que están involucradas en las actividades vitales de las plantas, se cree que algunas de las proteínas son constituyentes del protoplasma.

Debe mencionarse además la presencia de un número de ácidos orgánicos además de los ácidos volátiles y resinas.

A.4 Contribución de los extraíbles a las propiedades de la madera

La influencia extractiva del valor de la madera como mercancía y a veces la causa de varios problemas en proceso. En esta sección, los siguientes cinco artículos son: color de la madera, olor de la madera, durabilidad de la madera, daños a la salud humana y la influencia de los extraíbles en el pulpaje.

Además de los artículos anteriores, los extraíbles influyen en la interferencia de adherencia en producción de contrachapo, la interferencia de capa con pintura, la interferencia de polimerización en plástico de WPC (complejo plástico de madera), la permeabilidad de un antiséptico o insecticida, entre otros.

- **Color de la madera:** los bosques de especies diferentes tienen una amplia gama de color. El color de la parte savia-madera es común entre todas las especies de madera. Al contrario, el de la parte corazón-madera es único.
- **Olor de la madera:** después del cortado, muchos bosques tienen un olor característico que normalmente se marchita en el proceso de secado, hay bosques preciosos que retienen un olor agradable para un periodo largo de tiempo sin embargo, por otro lado, durante el almacenamiento en agua, muchos bosques son invadidos a veces por microorganismos que generan pérdidas de constituyentes odorizantes.
- **Durabilidad de la madera:** se ha sabido bien de tiempos antiguos que los extraíbles influyen en la durabilidad de la madera. Recientemente, la contaminación del ambiente y la toxicidad de antisépticos sintéticos o insecticidas han propuesto problemas serios para la madera.

Por consiguiente, se enfoca gran interés ahora en extraíbles de madera como productos naturales que proporcionan durabilidad. Estos compuestos pueden dar pistas a estructuras que podrían servir como preservantes de madera.
- **Extraíbles de madera dañinos para la salud humana:** es conocido que los extraíbles presentes en ciertos bosques causan síntomas como lloriqueo, sangrado de nariz, estornudos, irritación de ojos y garganta, dermatitis.
- **Influencia de los extraíbles en el pulpaje:** los extraíbles causan varios problemas en el pulpaje. En cocción de bosques de especies de pinos para producir pulpa de sulfito, la parte madera-corazón es resistente a

la deslignificación debido al pinosilvin. El pinosilvin se combina con la lignina durante la cocción para obstruir la sulfonación de la lignina.

A.5 Utilización de los extraíbles

Algunos extraíbles provenientes de bosques tienen potencial para el uso comercial, pero los extraíbles usados para éste propósito se restringen dentro de los límites estrechos porque el aislamiento de los extraíbles de madera o de corteza tiene sus propias dificultades económicas y/o técnicas.

La mayoría de los silviquímicos obtenidos de los árboles, corteza, semillas, hojas, o tocones contienen químicos similares a los extraíbles de madera. Los silviquímicos han sido materiales importantes a lo largo de la historia humana y han sido usados ampliamente hasta los años cincuenta. Después de eso, la importancia ha disminuido desde que la industria de la petroquímica se empezó a desarrollar. Sin embargo, hay interés recientemente en uso de árboles de nuevo como un recurso renovable en la industria orgánica-química.

- **Turpentino:** el turpentino es el aceite esencial volátil obtenido del árbol de las especies *Pinus*. También es llamado como aceite de turpentino. El turpentino es producido mayormente como un subproducto del proceso de cocción de pulpa de sulfato. También puede ser producido por la destilación de astillas de los troncos, tocones, y ramas de las especies *Pinus*. Para distinguir entre estos dos tipos de turpentino, el anterior se nombra turpentino del sulfato y el último turpentino de madera.
- **Aceite de altura:** el licor negro obtenido por el pulpaje del sulfato de la madera de especies *Pinus*, contiene las sales de

sodio de ácidos de la resina y los ácidos grasos como resultado de la saponificación de resinas o grasas en los bosques. Cuando el licor negro se condensa y se permite estar en el tanque, la sustancia que sube a la superficie se recoge mecánicamente y se trata con ácido para dar un aceite de altura crudo.

Se ha usado aceite de altura históricamente para la manufactura de materiales de revestimiento. Los ácidos grasos puros o colofonias obtenidos por destilación fraccionada es mandada para la utilización de aceite de altura como material crudo básico en la industria química. El residuo de destilación fraccionada y alquitrán también son usados como combustible.

- **Colofonia:** en la actualidad, el volumen de producción de la colofonia ocurre por la destilación fraccionada de aceite de altura. Un porcentaje pequeño de colofonia de madera es obtenido por la destilación fraccionada de turpentinicos de madera producida de los tocones de la especies Pinus.

La colofonia se usa como un material crudo sintético en medicinas, agentes viscosos para hacer papel, adhesivo, y revestimiento.

- **Ácidos grasos:** los componentes principales del aceite de altura por destilación fraccionada son los ácidos grasos insaturados como ácido oleico y ácido linoleico. Los ácidos grasos de aceite de altura son ampliamente usados en revestimiento y como materiales crudos para la síntesis de medicinas, jabones y limpiadores industriales.

- **Taninos:** los taninos están divididos en el tipo condensado y el tipo hidrolizable. Los taninos condensados son ampliamente usados como agentes tanicos para la fabricación de cueros y para la preservación de redes de pesca. Más recientemente, se han usado taninos de algunas ampliamente como adhesivos para madera, floculantes y para revestimiento. El valor comercial de los taninos hidrolizables es más bajo en comparación con los de taninos condensados.
- **Exudantes:** a menudo, una lesión a la corteza de los árboles resulta en un fluido de exudación de la vecindad del cambium en los tejidos dañados. En ciertos casos, estos exudantes se recogen y se venden.
- **Látex:** es un líquido lácteo que exuda de la superficie cortada del árbol de caucho tropical tal como el *hevea brasiliensis*. En la sustancia sólida de látex, el polímero isoprenoide llamada también goma carbonatada, constituye más del 90%. El caucho crudo obtenido de látex por coagulación se transforma en el caucho comercial natural por vulcanización.
- **Oleoresina:** llamado también bálsamo, es una resina de aceite esencial que se obtiene de las coníferas y varios tipos de angiospermas. La oleoresina se usa como un material crudo en medicina, perfume y como adhesivo para lentes.
- **Goma:** es una sustancia coloidal, normalmente polisacárido, exuda por ciertas plantas angiospermas. Es característico que los polisacáridos de la goma contengan azúcares ácidos.

Se utiliza como un aditivo comestible, tabletas medicinales, materiales adhesivos y como base para algunos cosméticos. (Ref. 21)

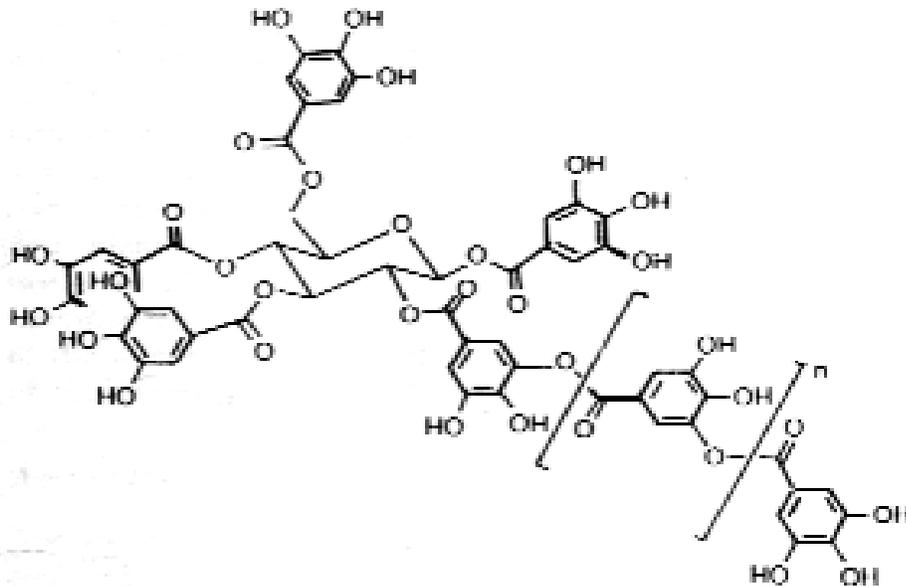
B. Taninos

Son compuestos polifenólicos muy astringentes y de gusto amargo, es decir contrae los tejidos orgánicos. Se dividen en hidrolizables y condensados. Industrialmente se han utilizado sus propiedades para curtir pieles, al eliminar el agua de las fibras musculares. La importancia de los taninos en el mundo vegetal es su capacidad para proteger las plantas contra las heridas que sufren y el hecho de que les protegen de los ataques exteriores, bien porque resultan tóxicos para los microorganismos o herbívoras, ya que no son digeribles.

La técnica del curtido es conocida desde 1000 años A.C., pero es hasta el período 1790-1800, en Francia, cuando se aíslan y descubren los químicos base para curtir pieles. Los taninos son ácidos muy astringentes, propiedad que los ha identificado como ingredientes útiles en la medicina tradicional; también se utilizan en la preparación de alimentos, maduración de frutas; ingredientes de bebidas como la cocoa, el té y el vino tinto. (Ref. 7)

- **Estructura:** los taninos han sido descritos como penta-(m-digaliol)-glucosa y por la fórmula empírica $C_{76}H_{52}O_{46}$. Esta fórmula es sólo aproximada, aunque se sabe que los taninos son derivados del ácido gálico, y son conocidos desde hace siglos, ya que una solución de este ácido precipita la albúmina. Tienen peso molecular entre 500 y 3000 uma.

Figura 9. Estructura molecular de los taninos.



Fuente: Ref. 12.

- **Propiedades:** 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 son el resultado de la combinación de un fenol y un azúcar.

El tanino es un compuesto que se oxida al contacto con el aire, es inodoro y de sabor agrio, soluble en agua, alcohol y acetona; reacciona con el cloruro férrico y otras sales; es combustible con un punto de inflamación de 199 °C, una temperatura de auto ignición de 528.5 °C; poco tóxico por ingestión o inhalación.

Cuando los taninos se mezclan con sales de hierro se produce un colorante de color azul-verdoso, mismo que es la base para la producción de tintas. Según Prance, los taninos se presentan en especies de familias vegetales de todo el mundo, se han identificado aproximadamente 500 especies de plantas que contienen varias cantidades de taninos, entre las principales familias botánicas con importancia en la obtención de taninos se pueden citar a las siguientes: Leguminosae, Rosaceae, Polygonaceae, Fagaceae, Rhyzophoraceae y Myrtaceae.

Asimismo la precipitación de los alcaloides tras un envenenamiento atenúa la toxicidad. Estas virtudes se deben a la propiedad que tienen de combinarse a otras sustancias (proteínas, fibras, alcaloides, gelatinas, etc) para originar reacciones fenólicas. Las plantas que tienen taninos y esencias (salvia, menta) son muy útiles como antisépticos y antiinflamatorios en casos de bronquitis, hemorroides, sabañones, etc.

Los taninos cumplen una función cicatrizante al acelerar la curación de las heridas y hemostática, al detener el sangrado. La cicatrización se produce por la formación de las costras al unirse las proteínas con los taninos y crear un medio seco que impide el desarrollo de las bacterias. Al constreñir los vasos sanguíneos ayudan a la coagulación de la sangre y, por tanto, contribuyen a la curación de las heridas.

Desde el punto de vista biológico los taninos son sustancias complejas producidas por las especies vegetales que cumplen funciones antisépticas o de conservación. La clasificación de los taninos se hace con base en los siguientes dos criterios: Productos resultantes de la

destilación seca: taninos hidrolizables y taninos condensados. Origen: taninos fisiológicos y taninos patológicos. (Ref. 12)

- **Clasificación:** químicamente los taninos se clasifican según sus características y su reacción en medio ácido.
 - **Taninos Hidrosolubles o Pirogálicos:** Son ésteres fácilmente hidrolizables formados por una molécula de azúcar (en general glucosa) unida a un número variable de moléculas de ácidos fenólicos (ácido gálico o su dímero, el ácido elágico). Cuando se destilan en seco producen pirogalol.

Los taninos hidrolizables, a su vez se dividen en:

Galotaninos: caracterizados por la presencia de ácido galotánico, es común en las agallas del encino y en la raíz del zumaque.

Elagitaninos: su componente principal es el ácido elágico, se obtienen de plantas como el dividivi y el microbálano.

- **Taninos no Hidrosolubles o Condensados:** tienen una estructura química similar a la de los flavonoides. Por hidrólisis dan azúcar y ácido elágico. Se presentan generalmente en la madera, la corteza y las raíces de plantas como el quebracho, caña agria, eucalipto, oyamel y el mangle, entre otras; están constituidos por unidades

flavonoides, las cuales soportan diversos grados de condensación, carbohidratos y restos de aminoácidos.

- **Taninos fisiológicos:** son el resultado de las funciones metabólicas de la planta.
- **Taninos patológicos:** son una respuesta al ataque de insectos, ya sea por ovoposición o por picadura.

C. 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 latifolias y las de coníferas; diferencias existen entre la madera joven y la tardía. Las condiciones del suelo y la edad influyen en los contenidos de sustancias minerales. (Ref. 4)

Cuando la madera está seca y calentada a 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 queme, y el nitrógeno de este aire estará también presente en el gas. El oxígeno del aire será gastado en la quema de parte de la madera, arriba de la temperatura de 280°C. Libera energía, por lo que se dice que esta reacción es exotérmica.

Este proceso de fraccionamiento espontáneo o carbonización, continúa 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 a 600 °C según las normas para su determinación.

El contenido de cenizas en el carbón es de alrededor del 30% en peso, y el balance es carbono fijo, alrededor del 67-70%. Además puede contener cantidades diminutas de una lista larga de otros elementos, como fósforo, azufre, sodio, aluminio, titanio, manganeso, hierro, cobalto, níquel, plata, bario, plomo y oro. En algunas especies tropicales, la mayoría de la ceniza está compuesta de sílice (SiO₂). (Ref. 25)

2.5 Fundamentación teórica de la especie Pino candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore)

- **Nombre científico:** *Pinus maximinoi* H. E. Moore.
- **Distribución:** esta especie se puede encontrar en los departamentos de Alta Verapaz, Baja Verapaz, Guatemala, El Progreso, Jalapa y Chiquimula.

2.5.1 Taxonomía de la planta

Reino: Vegetal.

Subreino: Embryobionta.

División: Pinophyta.

Clase: Pinopsida.

Orden: Pinales.

Familia: Pinaceae.

Genero: Pinus.

Especie: Maximinoi.

Nombre común: Pino Canis.

Sinónimos del nombre común: Pino candelillo (Guatemala); Pino Ilorón (Honduras); Pinabete (Centro América).

2.5.2 Descripción botánica

- **Dimensiones:** árbol de 20 a 50 m de altura. De 45 a 100 cm de diámetro.
- **Corteza:** en el árbol joven delgada y lisa; en árbol maduro es fisurada color café rojizo descascarándose en placas alongadas.
- **Copa:** muy densa, ramas con ángulo recto y horizontalmente verticiladas.
- **Hojas:** aciculares, generalmente con 5 acículas por fascículo, delgadas, de 16 a 28 cm de longitud y 0.7 a 0.8 mm de ancho, usualmente con 2 a 3 canales resiníferos, estomas presentes en la superficie dorsal y ventral; con un follaje denso, verde azulado mate o verde grisáceo, notoriamente colgantes.
- **Vainas:** persistentes anilladas, color castaño a moreno oscuro, de 14 a 18 de largo.
- **Frutos:** son conos marrón-rojizos, ovoides, angulares, algunas veces tempranamente caedizos, de 5 a 16 cm de largo y de 4 a 7 cm de ancho, con un péndulo oblicuo que se mantiene unido al cono cuando éste cae. Presenta escamas suaves y delicadas; apófisis de

8 a 10 mm de ancho, planas de 2 a 4 mm de largo. Se encuentra en grupos de 3 a 4 en las ramas.

Figura 10. Copa y hojas del pino candelillo.



Fuente: Ref. 28.

Figura 11. Fruto y semilla del pino candelillo.



Fuente: Ref. 28.

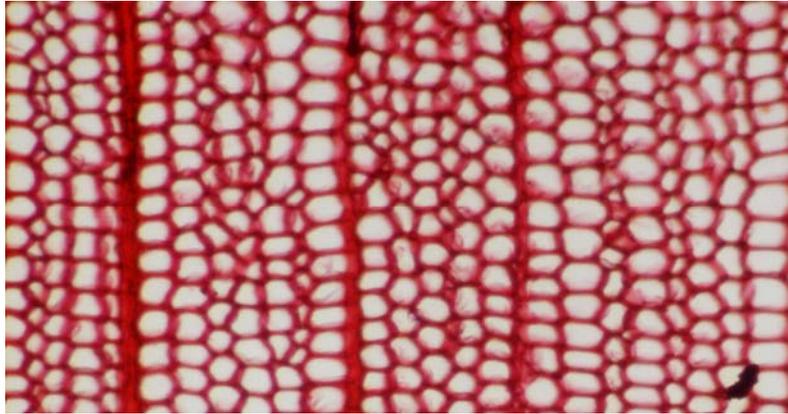
2.5.3 Descripción anatómica

En corte transversal, la madera juvenil del pino candelillo presenta histológicamente la siguiente composición: a) traqueidas, b) rayos de xilema compuestos de traqueidas y parénquima así como, c) conductos de resiníferos.

a. Traqueidas: están ordenadas en filas y son isodiamétricas, las paredes celulares son delgadas pero ya se encuentran impregnadas de lignina, puesto que se han teñido de rojo al contacto con safranina.

- En esta especie, el diámetro medio de las traqueidas es de 42.17 micras y el diámetro medio de traqueidas en las secciones basal, media y apical es de 39.14, 44.83 y 42.55 micras respectivamente.
- En cuanto al grosor de la pared celular, la media para la especie es de 5.84 micras. El grosor medio de las paredes en las secciones basal, media y apical es de 5.63, 6.58 y 5.31 micras, respectivamente.
- Considerando el grosor de la pared celular versus el lumen de las traqueidas, resulta que la relación entre espacio aéreo (lumen) y espacio sólido (grosor de pared celular) es de 6:1. Así pues, las paredes celulares aún son bastante delgadas.

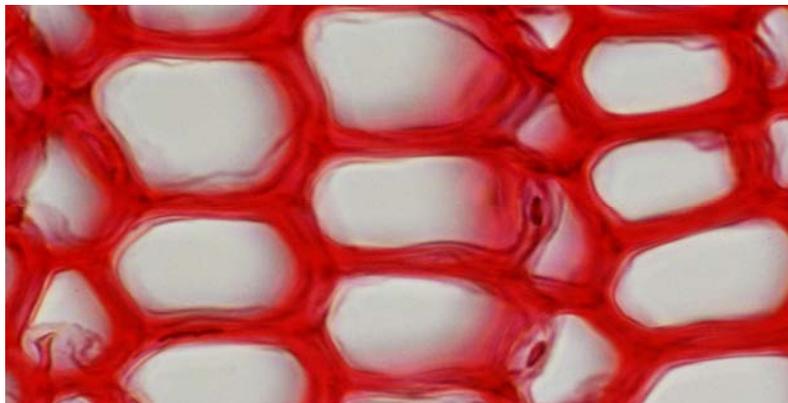
Figura 12. Traqueidas del pino candelillo.



Fuente: Ref. 14.

- b. Rayos de xilema:** se componen de células de parénquima y traqueidas colocadas horizontalmente, las cuales se encuentran ordenadas en filas de una célula de grosor. La tinción rojiza que las células adquirieron al contacto con safranina indica que sus paredes celulares se están esclerotizando, a pesar de que, como puede observarse en la figura 13, el protoplasto aún está presente en estas células.

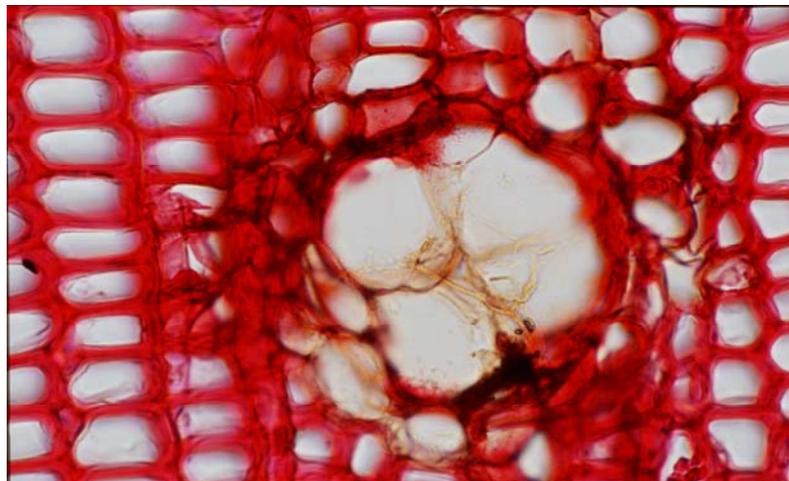
Figura 13. Rayos de xilema del pino candelillo.



Fuente: Ref. 14.

- c. **Conductos resiníferos:** son escasos en comparación a la cantidad que se observa en otros pinos como el pseudostrobus y caribaea. En la figura 14 se observa una vista general del xilema secundario de esta especie en donde se localiza solamente un conducto resinífero, el cual se muestra en detalle, y en el que se puede observar la presencia de células productoras de resina, las cuales se separarán posteriormente para formar conductos resiníferos de naturaleza esquizógena.

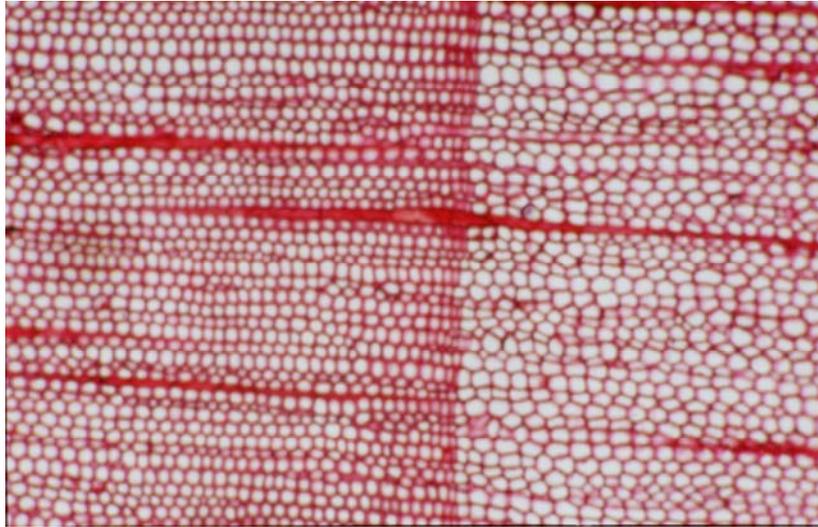
Figura 14. Conducto resinífero del pino candelillo.



Fuente: Ref. 14.

- d. **Anillos de crecimiento:** en la figura 15 se observa que el anillo de la izquierda muestra crecimiento tardío; el cual se distingue porque las traqueidas son de menor diámetro. Mientras que el anillo de la derecha, presenta crecimiento temprano, en el cual las células son de diámetro mayor.

Figura 15. Anillos de crecimiento del pino candelillo.



Fuente: Ref. 14.

2.5.4 Ecología de la planta

- **Información de suelos:** es más exigente en suelos, que el *Pinus oocarpa* y *Pinus caribaea*, en los lugares donde se mezclan *Pinus maximinoi* y *Pinus oocarpa*, el primero ocupa los mejores suelos, mejor drenados y menos superficiales. Tolera pH del suelo neutro a ácido.

pH: 4.5 a 7.5, ligeramente ácido.

Drenaje: bien drenados.

Fertilidad: alta.

Profundidad: 15 cm.

- **Asociación:** a menudo crece asociado con *Pinus pseudostrobus*, *P. oocarpa*, *P. herrerae*, *P. michoacana*, *P. tecumumanii*, *P. rudis*, *Cupressus lusitanica*.

- **Requerimientos ambientales**

Elevación mínima: 600 msnm.

Elevación máxima: 2600 msnm.

Precipitación mínima: 1000 mm.

Precipitación máxima: 2400 mm.

Temperatura mínima: 18 °C.

Temperatura máxima: 21 °C.

- **Fenología**

Inicio época fructificación: marzo.

Final época fructificación: abril.

2.5.5 Características de la madera

Grano: derecho.

Textura: media.

Sabor de la madera: ausente.

Olor de la madera: aromático.

- **Información general**

Durabilidad natural: la madera de *Pinus maximinoi* es susceptible a hongos cronógenos que producen la mancha azul.

Duramen: es moderadamente resistente a hongos de pudrición.

- **Propiedades físicas:** peso específico 0.50 a 0.76 g/cm, 0.44 a 0.50, 0.41 moderadamente pesada. Presenta una densidad mediana.

Peso verde: muy pesada.

Peso seco al aire: moderadamente pesada.

Peso seco al horno: extremadamente liviana.

Peso básico: moderadamente pesada.

2.5.6 Usos principales

Ebanistería, muebles en general, carpintería en general, chapas, juguetes, artesanías, artículos torneados, puertas, decoración de interiores, molduras, transmisión eléctrica y telefónica, cortinas o persianas flexibles, revestimientos, muebles, construcciones livianas, gabinetes, madera aserrada, mesas, sillas, reforestación, carbón, leña, ornamental.

2.6 Fundamentación teórica de la metodología

2.6.1 Lixiviación

Es la disolución de uno o más compuestos de interés de una mezcla sólida por medio del contacto con un solvente líquido. Recibe el nombre de colada cuando se separaba un álcali a partir de cenizas de madera. Cuando se habla de extracción se aplica a las operaciones de separación que utilizan métodos de transferencia de masa o mecánicos. La elusión es la operación donde el material soluble está sobre la superficie de un sólido insoluble y se lava con el disolvente.

La operación unitaria de extracción es conocida como extracción líquido-líquido. Mientras que la lixiviación es una operación de separación sólido-líquido; cuando el agua es el solvente, el proceso recibe el nombre de lavado. Ciertos productos orgánicos se separan por medio de lixiviación; en el caso de aceites vegetales son recuperados a partir de semillas, como en el caso del algodón con disolventes orgánicos. En este caso se aplica para determinar taninos en madera, que se obtienen por lixiviación con soluciones acuosas de sulfito de sodio como solvente. También el caso de la azúcar de remolacha, en donde se hace una separación de la misma con agua caliente.

A temperaturas elevadas la viscosidad del líquido es menor y la difusividad mayor; incrementando la solubilidad del soluto en el solvente incrementando la rapidez del proceso. Por ello la temperatura es importante en el proceso de lixiviación, aunque en ciertos materiales surge una descomposición indeseada del soluto y su procedencia por las altas temperaturas del disolvente. (Ref. 24)

El material debe tratarse previamente para un buen proceso de lixiviación, esto con lavados previos para retirar sustancias indeseadas que son insolubles en el solvente. Para acelerar y optimizar dicho proceso de muela y tritura el material permitiendo mayor accesibilidad de contacto solvente-soluto por el aumento del área superficial.

Para preparar el sólido se debe tomar en cuenta la proporción de constituyente y solvente adecuado, la distribución del material, tamaño y naturaleza de las partículas y material. Si el material es biológico, las paredes celulares presentan gran resistencia en el proceso, ya que el material contenido forma parte de la composición de dicho material.

Por ello se recomienda moler los materiales biológicos debido a lo mencionado con el material anterior. Por lo que los procedimientos de determinación de taninos, celulosa, lignina y extraíbles requieren de esta técnica por medio de diferentes métodos.

2.6.2 Secado

Es el proceso en donde se elimina agua de un cuerpo en cantidades relativamente pequeñas. También se refiere a la eliminación de otros líquidos orgánicos. Casi siempre se elimina el agua en forma de vapor con aire, siendo a temperatura ambiente o por aire caliente. Los procesos de secado se dividen principalmente en dos: tipo continuo, en donde el material a secar se pasa en el equipo de secado sin interrupciones; por lotes, cuando una cantidad específica de material es secado por flujo de aire en estado estacionario.

También se pueden clasificar en base a las condiciones de extracción de vapor y transferencia de calor. En primer lugar se tiene un proceso en donde la materia es sometida a calor por contacto directo con aire caliente y el agua es removida por el vapor contenido en el mismo aire expulsado. En segundo lugar se tiene secado al vacío, en donde el agua se evapora a presiones bajas, y el calor recibido es indirecto por contacto con una pared conductora en donde existe también la manifestación de radiación. En tercer lugar, el agua se sublima directamente de un material congelado, por medio del vapor de agua que se forma a bajas temperaturas; proceso conocido como liofilización. (Ref. 10)

El secado será vital para obtener resultados confiables, debido a que el agua es el principal componente que altera las propiedades de la madera; se empleará para secar la madera a tratar, el aserrín previo a los muestreos, así como el secado de los componentes determinados para su determinación gravimétrica.

2.6.3 Gravimetría

La determinación gravimétrica se refiere al método de análisis cuantitativo que se basa en la determinación de la composición cuantitativa de una sustancia problema midiendo el peso de la masa obtenida en el experimento. La masa es la cantidad de sustancia contenida en un cuerpo. El peso es la fuerza con que el cuerpo presiona el lugar de reposo.

En la determinación gravimétrica se emplea la balanza analítica, permitiendo así que las mediciones de la masa sean precisas. Las determinaciones gravimétricas se dividen en: *Primer tipo*, el componente a determinar es separado cuantitativamente de la sustancia y se pesa. *Segundo tipo*, el componente a determinar se elimina por completo y el residuo se pesa. *Tercer tipo*, el componente a determinar se convierte cuantitativamente en un compuesto químico, en forma que pueda ser separado y pesado. (Ref. 17)

Según los métodos propuestos, la determinación gravimétrica cubre la mayoría de los procedimientos para la caracterización química de la madera. Los procedimientos que aplican gravimetría son la determinación de celulosa, lignina, extraíbles, humedad y cenizas.

2.6.4 Volumetría

La determinación volumétrica consiste en un método de análisis cuantitativo en que la medición de la masa se efectúa por medio de la medición de volúmenes. El método consiste en una disolución preparada a partir de una muestra pesada de una sustancia que se somete al análisis, se agrega la disolución de concentración conocida hasta que las sustancias combinadas interaccionen completamente.

Cuando las sustancias que interaccionan se consumen por completo, se denomina el punto de equivalencia, haciendo notar que la reacción llegó al final, y en este momento las cantidades de sustancias que entraron en la reacción son estrictamente equivalentes.

Las condiciones para satisfacer de forma adecuada la reacción determinante son las siguientes: La reacción debe ser prácticamente irreversible, el punto final de la reacción debe ser lo suficientemente perceptible procurando una verificación rápida de la reacción y la variación de las condiciones externas no debe alterar el proceso.

Los métodos se pueden clasificar en función del tipo de reacción química utilizada: de oxidación-reducción (redoximetría), de neutralización alcalina y ácida, de precipitación y en formación de complejos (complejometría). (Ref. 17)

Según el procedimiento de determinación de taninos el método volumétrico adecuado, será el de oxido-reducción por el efecto del permanganato de potasio en una solución de extracto tánico, midiendo así el volumen de titulante utilizado, haciendo las mediciones respectivas.

2.6.5 Calcinación

La calcinación permite eliminar sustancias volátiles fuertemente absorbidas por un cuerpo, en donde se necesita que el mismo esté libre de componentes ajenos al mismo. Por medio de la calcinación se obtiene un producto de composición conocida y constante. Las razones de 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 resultados esperados. El instrumento mide con exactitud la masa de un precipitado conforme aumenta la 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 debe ser el óptimo, debido a que a mayor temperatura el precipitado puede tener pérdida por sublimación, volatilización o por descomposición.

El caso más común de alteración al precipitado es la absorción de humedad, que se presenta en la mayoría de precipitados recién secados, así como absorción de dióxido de carbono de la atmósfera, que se evita con desecadoras con atmósfera libre de este gas. Por ello se deben agregar los precipitados a desecadoras con suficiente material desecante, como sílica gel, para evitar que el agua altere los resultados. (Ref. 6)

3. METODOLOGÍA

3.1 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1.1 Localización

- La recolección de muestras se llevó a cabo en la finca “Río Frío” ubicada en Tactic, Alta Verapaz. El acceso se logró gracias a la coordinación con el INAB (Instituto Nacional de Bosques). Dicha finca según el Atlas del Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas se encuentra en una zona con las siguientes características:

Ubicación: Tactic, Alta Verapaz; altura de 1466 metros sobre el nivel del mar (msnm); latitud de 15°19'05”, longitud de 90°21'05”.

Clima: según el sistema Thornthwaite la codificación ubicada en la región de Tactic, Alta Verapaz, en el mapa climatológico de la República de Guatemala es B´b´Ar, su interpretación se muestra a continuación:

Jerarquías de temperatura

Símbolo

Carácter del clima

B´

Semi-Cálido (18.7° a 23.9 °C) de 650 a 1,400 metros.

Tipo de variación de la temperatura

%	Símbolo	Carácter del clima
35 a 49	b'	Con invierno benigno

Jerarquías de humedad

Símbolo	Carácter del clima	Vegetación natural característica
A	Muy Húmedo	Selva

Tipo de distribución de la lluvia

Símbolo	Carácter del clima
r	Sin estación seca bien definida

Génesis de los suelos: son suelos desarrollados sobre Serpentinita y rocas asociadas a elevaciones medianas como la riolita amorfa y roca calcárea, son relativamente extensas en Guatemala. Parecen ser el resultado de la serpentización de rocas máficas; son poco profundos, arcillosos, de color café o café rojizo y, en general, se consideran de baja productividad. La vegetación natural es el pino mezclado con árboles decíduos.

Clasificación de los suelos: es un suelo franco de 50 a 74 cm. de profundidad.

Zona de vida vegetal: es Montano Bajo Húmedo con un área aproximada de 7,899 Kms.

Fuente: Atlas Nacional de Guatemala 1972.

3.1.2 Recursos

- La parte experimental de la investigación se realizó en los laboratorios del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química y en la Sección de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Facultad de Ingeniería, Edificio T-5, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Humanos

- **Investigador:** Mario Roberto Fonseca Maldonado.
- **Asesor 1:** Inga. Qca. Telma Maricela Cano Morales.
- **Asesor 2:** Ing. For. Msc. José Mario Saravia Molina.

Físicos

Reactivos

- Agua desmineralizada 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 lts. Casa proveedora MERCK KGaA.
- n-hexano (C_6H_{14}) grado reactivo. Envase de 4 lts. 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: 2.5 lts. Casa proveedora MERCK KGaA.

- Ácido acético glacial (CH_3COOH). Envase de 2.5 lts. 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. ($\text{C}_{16}\text{H}_8\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8\text{S}_2$). Peso molecular 466.36 g/mol. Envase 25 g. Casa proveedora: MERCK KGaA.

Equipo

- Molino de martillos, motor Kohlbach (modelo 184T).
- Tamiz No. 40 en escala Tyler (Tyler Screen Scale Equivalent, U.S.A. Standard Testing Sieve, Soltest, Inc).
- Horno eléctrico de flujo convectivo por gravedad marca Termolyne.
- Balanza Adventurer OHAUS con capacidad máxima de 150 g y precisión de 0.001g.
- Horno eléctrico con recirculación Cole Parmer de 120 V y 800 W. 50/60 Hz.
- Planchas de calentamiento con agitación (marca Corning, modelo Pc-400, 120V/100V, rango 0-480 °C, 0-1100 rpm).
- Termómetros (Mercurio, con escala de 0-100 °C, del tipo inmersión total y parcial).
- Bomba de vacío (marca Gast, modelo 0523-V4F-6588DX, vacío hasta 30 in Hg, manómetros analíticos).

- Medidor de humedad OHAUS con capacidad máxima de 200 g y precisión de 0.0001g.
- Mufla marca Termolyne 1400 calienta hasta 1100 °C.
- Campana de extracción de 110 V y 900 Watts, marca Serproma, de motor con capacidad de $\frac{3}{4}$ Hp.
- Computadora Celeron de 850 MHz.
- Impresora Epson Stylus C40UX.

Cristalería

- Equipo de extracción Soxhlet, con balón esmerilado de 500 ml y condensador (marca Corning-Pirex).
- Pipetas de 1, 5, 10, y de 50 ml.
- Beakers con capacidad de 50, 100, 250, 500, y de 1000 ml, marca Pyrex.
- Matraces de 250, 500 y de 1000 ml.
- Balones de 100, 250, 500, y de 1000 ml, marca Kimax.
- Condensadores de bola y de serpentín, 20/40.
- Varillas de agitación.
- Probetas de 500, 250, 100, 50, y de 10 ml.
- Buretas de 25, y de 10 ml.
- Desecadora Fisherbrand.
- Cisoles de porcelana.
- Cajas de Petri, diámetro de 10 cm.
- Kitasato de 1000 ml.
- Viales color ámbar de 8 ml.

Otros accesorios

- Dedales de extracción de celulosa marca Whatman de 35 mm de diámetro externo, 33 mm de diámetro interno, 94 mm de longitud. No. 2800339.
- Pinzas de metal.
- Caja de Papel Filtro Whatman No. 4.
- Filtro de porcelana.
- Perillas de succión.
- Pizetas.
- Agitadores magnéticos.
- Embudo de metal.
- Manta color marfil, apertura de 0.25 mm² aprox.
- Pesa muestra de aluminio.
- Mangueras de hule.
- Papel parafilm.
- Soporte universal.

3.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.2.1 Obtención y preparación de las muestras

La recolección de muestras se obtuvo a través del INAB en la finca “Río Frío” ubicada en Tactic, Alta Verapaz. Bajo el proyecto PINFOR del INAB.

Las muestras de madera se tomaron de 9 árboles a 3 diferentes alturas de entre 4-7 años, siempre de la misma especie. Las muestras de cada árbol provenientes de las distintas alturas se limpiaron de polvo, musgo y otras impurezas, eliminando la corteza de las mismas.

Después de secar al ambiente la madera se molió, esto se hizo con un molino de martillos trifásico de 5 caballos de fuerza, en la carpintería del área de prefabricados CII/USAC. El aserrín obtenido se secó al ambiente, luego se tamizó con un tamiz No. 40 (escala Tyler), o sea de secciones de 0.42 mm por 0.42 mm. Posteriormente se almacenaron las muestras en bolsas plásticas debidamente identificadas por árbol y altura.

La caracterización química de la materia prima, para obtener el porcentaje de celulosa, lignina, extraíbles, taninos, cenizas y humedad, se hizo utilizando la metodología de normas ASTM D1105-06, D1106-56, D1103-60, D1102-56, y finalmente los componentes obtenidos se colocaron en viales color ámbar debidamente identificados.

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA MADERA

Dicho análisis químico se realizó en base a las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) y la combinación de las normas ANSI y la adaptación correspondiente, las cuales se mencionan a continuación. (Ref. 18)

3.2.2 Determinación de extraíbles en madera (ANSI/ASTM D1105-56)

- **Alcance**

El método abarca la determinación de madera libre de extraíbles.

- **Principio**

Son sustancias solubles en solventes neutros y que no son parte de la madera.

- **Aparatos**

Equipo de extracción Soxhlet, dedales de porosidad media, balanza analítica sensible a 0.1 mg. Horno para secar, con temperatura controlada entre 100 y 105 °C. Desecadora, pinzas de metal, papel parafilm, y grasa para cristalería.

- **Reactivos**

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

- **Muestra**

La muestra se obtuvo de aserrín seco, reducido por un molino y tamizado por medio de un tamiz No. 40.

- **Procedimiento**

1. Se colocó en un dedal 7.5 g de la muestra de madera previamente tamizada, seca y con humedad determinada.
2. Se colocó el dedal en el sistema de extracción (Soxhlet con condensador a reflujo) manteniendo una relación de $\frac{3}{4}$ de solvente con respecto al balón. Primero se realizó una extracción con n-Hexano durante 12 horas.
3. Luego se realizó una extracción con Etanol durante 12 horas. Se apagó el equipo y se esperó a que enfriará el sistema.
4. Se secó el contenido del dedal (libre de extraíbles) por 48 horas a temperatura ambiente. Luego se transfirió el material a una caja de petri previamente tarada y se pesó.
5. Se secó en un horno eléctrico con recirculación a $80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 4 horas. Se sacó la muestra y se transfirió a una desecadora, esperando 15 min., se pesó y secó hasta peso constante.
6. El porcentaje de extraíbles se obtuvo por medio de la ecuación:

$$\% \text{ Extraíbles} = (7.5 - \text{P.M.})/7.5 \times 100\% \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

P.M. = Peso de la muestra libre de extraíbles, en gramos.

3.2.3 Determinación de Lignina en madera (ANSI/ASTM D1106-56)

- **Alcance**

El método abarca la determinación del contenido de lignina en madera por gravimetría.

- **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, para remover resinas, ceras, grasas y aceites; y con agua caliente para remover materiales solubles en agua.

- **Aparatos**

Sistema a reflujo de balón de fondo plano con condensador, mangueras, plancha de calentamiento con agitación para ebullición, teflón, cronómetro, pipetas, perillas de succión, bomba de vacío, balanza analítica, sensible a 0.1 mg., horno para secar con temperatura controlada entre 100 y 150 °C. Desecadora, guantes y lentes protectores.

- **Reactivos**

Hidróxido de sodio en lentejas puro (106462 Merck KGaA); Ácido sulfúrico al 72%, preparado a partir de ácido sulfúrico al 95-97%, gravedad específica a 20/4 °C 1.6338 (100732 Merck KGaA): se vertió 184 ml del ácido en 66 ml de agua desmineralizada, con agitación lenta, en baño con agua fría (CUIDADO, LIBERA MUCHO CALOR). Se estandarizó con una solución de NaOH, utilizando el indicador naranja de metilo.

- **Muestra**

La muestra se obtuvo de madera libre de extraíbles (se revisó el método de determinación de extraíbles en madera).

- **Procedimiento**

1. Se colocó en un beacker de 100 ml, 1g de madera libre de extraíbles. Y se agregó 15 ml de ácido sulfúrico al 72%.
2. Se agitó durante 2 horas en baño maría a 20 °C, esto en una plancha con agitación.
3. Se transfirió a un matraz de 1000 ml conteniendo 560 ml de agua destilada, lo cual dio una solución de ácido al 3%.
4. Se hirvió a reflujo por 4 horas en un balón con condensador.
5. Se decantó hasta dejar una diferencia mínima entre las dos fases.
6. Se filtró la solución obtenida con papel filtro Wathman No. 4 previamente tarado.
7. Se lavó con agua caliente y se secó hasta peso constante a 80 °C ± 5 °C.

8. El porcentaje de lignina se determinó con la siguiente ecuación, que es válida solo para la utilización de 1g de muestra:

$$\% \text{ Lignina} = (\text{Peso Bruto} - \text{Peso Tara}) \times 100\% \quad (\text{Ec. 2})$$

3.2.4 Determinación de Taninos en madera

- **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 ión sodio del sulfito, permitiendo así solubilizar a los taninos en solución acuosa con el sulfito de sodio.

- **Aparatos**

Se necesitaron beackers, bureta, probeta, earlenmeyers, planchas con agitación, termómetros, balanza analítica, sensible a 0.1 mg., horno para secar con temperatura controlada entre 100 y 150 °C. 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 0.1N Titrisol (109935 Merck KGaA).

El índigo de carmín se preparó de la siguiente manera: se disolvió 6g Na Indigotin disulfonato en 500 ml de agua, se calentó por una hora, se enfrió. Se agregó 50 ml de ácido sulfúrico, se diluyó a un litro y se filtró.

- **Muestra**

La muestra se obtuvo de aserrín seco, reducido por un molino y tamizado por medio de un tamiz No. 40.

- **Procedimiento**

Extracción con maceración mecánica

1. Se preparó una solución acuosa al 4% en peso de sulfito de sodio (Na_2SO_3).
2. Se colocó 4g de madera seca y tamizada, en un beacker de 100 ml.
3. Se agregó un volumen adecuado de la solución de sulfito de sodio, hasta cumplir una relación entre 3:1 a 4:1.
4. Se calentó la mezcla durante 45 minutos con agitación a 70 °C, sin pasarse de dicha temperatura.
5. Se filtró la muestra con una manta. Se llevó el material soluble a un beacker de 50 ml y se evaporó en un secador eléctrico. Se transfirió el material sólido a un pesa muestra y se secó hasta peso constante.

Porcentaje de taninos por el método de tara en vaina

1. Se tomó 1g del extracto obtenido (extracto tánico) y se colocó en un earlenmeyer de 250 ml, se agregó 100 ml de agua destilada y se agitó hasta disolver.
2. Se colocó la muestra en una plancha de calentamiento y se llevó a ebullición por 4 horas. Se agregó agua para mantener el volumen.
3. Se tomó 12.5 ml de la solución líquida, se adicionaron 10 ml de indicador índigo de carmín y 375 ml de agua destilada.
4. Se tituló con permanganato de potasio (KMnO_4) 0.1N hasta observar un cambio de color amarillo.
5. Se preparó un blanco con agua, adicionando todos los reactivos en las mismas condiciones.
6. El porcentaje de taninos en madera se obtuvo por:

$$\% \text{ Tanino} = (\text{mlo} - \text{mlb}) \times 0.105 \quad (\text{Ec. 3})^*$$

Donde:

mlo = mililitros utilizados de permanganato de potasio.

mlb = mililitros del blanco obtenidos.

* Nota: La ecuación se obtuvo en base a los 4g de muestra iniciales y a la siguiente relación: 4.2 mg de tanino = 1ml \times 0.1N de Permanganato de potasio (KMnO_4).

3.2.5 Determinación de Celulosa en madera (ANSI/ASTM D1103-60)

- **Alcance**

El método abarca la determinación indirecta de celulosa en 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 necesitaron beackers, cronómetro, pipetas, perillas de succión, varilla de agitación, balde para baño María, balones aforados, bomba de vacío, balanza analítica, sensible a 0.1 mg., horno para secar con temperatura controlada de 100 y 150 °C. Desecadora, guantes y lentes protectores.

- **Reactivos**

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

- **Muestra**

La muestra se obtuvo de madera libre de extraíbles (se revisó el método de determinación de extraíbles en madera).

- **Procedimiento**

1. Se tomó 1g de madera libre de extraíbles y se transfirió a un beacker de 100 ml.
2. Se agregó 10 ml de NaOH al 17.5%, se agitó y dejó reposar por 2 min. Luego se agitó nuevamente y dejó reposar 3 min.
3. Se agregó de nuevo 5 ml de NaOH al 17.5%, se agitó y dejó reposar 5 min.
4. Se repitió el paso 3.
5. Se agregó de nuevo 5 ml de NaOH al 17.5%, se agitó y dejó reposar 30 min. En baño María a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.
6. Se agregó 30 ml de agua destilada, se agitó y dejó reposar por 1 hora.
7. Se filtró al vacío con papel filtro Wathman No. 4 previamente tarado, lavando con una solución preparada de 33 ml de agua destilada y 25 ml de la solución de NaOH al 17.5 %.
8. Luego se lavó con 30 ml de agua destilada, y se dejó de aplicar vacío. Se agregó 15 ml de una solución al 10% de ácido acético y después de 3 min. Se aplicó

vacío. Luego se lavó con 50 ml de agua destilada aplicando vacío.

9. Se llevó la muestra a un secador eléctrico contenida en una caja petri, a una temperatura de $80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 4 horas. Luego se transfirió a una desecadora y se esperó 15 min. Para pesar. Se repitió el secado hasta peso constante.
10. El porcentaje de celulosa se determinó por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{[P.B. - (P.T. + P.L.)] \times P.M.L.}{P.M.T.} \times 100\% \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

P.B. = Peso bruto de la muestra.

P.T. = Peso tara del papel filtro.

P.L. = Peso de lignina en 1g de madera (procedimiento anterior).

P.M.L. = Peso de madera libre de extraíbles (base de 7.5 g).

P.M.T. = Peso de madera antes de la extracción, 7.5 g.

3.2.6 Determinación de Cenizas en madera (ANSI/ASTM D1102-56)

- **Alcance**

El método abarca la determinación de cenizas en madera, residuo presente como porcentaje 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 sílica con capacidad de 30 ml (preferible) o más. 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**

La muestra se obtuvo de aserrín seco, reducido por un molino y tamizado por medio de un tamiz No. 40.

- **Procedimiento**

1. Se calcinó un crisol, adecuado para 1g de muestra de madera, a 600 °C en una mufla durante 1 hora.
2. Luego se retiró e introdujo en una desecadora durante 15 min., para después tararlo. Se bajó la temperatura de la mufla por seguridad.
3. Se agregó 1g de muestra de madera en el crisol, previamente tamizada y seca.

4. Se agregó la muestra a la mufla aplicando 100 °C y luego se aumentó de modo que no hubiera ignición en la muestra. Se llegó a 600 °C sin pasarse de dicha temperatura.
5. Luego de hora y media se revisó la muestra, extrayendo el crisol con una pinza, de modo que el material sea solamente cenizas (color grisáceo blancuzco); de lo contrario se mantuvo la muestra más tiempo en la mufla.
6. Luego se llevó la muestra a una desecadora por 15 min. Para luego ser pesada. Se repitió hasta peso constante.
7. El porcentaje de cenizas se determinó por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Cenizas} = (P.B. - P.T.) \times 100\% \quad (\text{Ec. 5})^*$$

Donde:

P.B. = Peso bruto.

P.T. = Peso tara.

* Nota: La ecuación es válida si la muestra de madera utilizada es de 1 gramo.

3.2.7 Determinación de Humedad en madera

- **Alcance**

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

- **Principio**

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 totalmente anhidra; de forma directa, la humedad se puede determinar mediante la siguiente relación:

$$CH (\%) = \frac{\text{Peso del agua contenida}}{\text{Peso de la madera anhidra}} \times 100 \quad (\text{Ec. 6})$$

- **Aparatos**

Balanza analítica, sensible a 0.1 mg, horno para secar con temperatura controlada de 100 y 150 °C, desecadora.

- **Muestra**

El equipo es especial para determinar humedad en base húmeda y se necesitó 1g., de aserrín seco, reducido por un molino y tamizado por medio de un tamiz No. 40.

- **Procedimiento**

1. Se colocó un crisol con capacidad suficiente para la muestra de aserrín, en un horno a 105 °C ± 0.5 durante 2 horas, luego se trasladó hacia una desecadora donde se enfrió por 20 minutos.

2. Se pesó y anotó; se introdujo el crisol de nuevo al horno durante 1 hora y luego a la desecadora por 20 minutos, hasta obtener peso constante.
3. Se pesó 2g de muestra, los que se colocaron en el crisol preparado anteriormente, se introdujo dentro del horno a 105 °C ± 0.5 durante 2 horas, luego se trasladó hacia una desecadora donde se enfrió por 20 minutos.
4. Se pesó y anotó; se introdujo 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:

$$\% \text{ Humedad} = 100 - (P.B. - P.T.) / P.M. \times 100\% \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

P.B. = Peso bruto.

P.T. = Peso tara (crisol).

P.M. = Peso de la muestra.

3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

3.3.1 Diseño de tratamientos

El experimento desarrollado utilizó una variable independiente (unifactorial), en este caso la altura del pino. El arreglo fue en un solo sentido. Para la variable de altura de toma de muestra se utilizó madera de Pino Candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore) tomada a lo largo del árbol a 1.30 m del suelo como diámetro a la altura del pecho (Dap) o

basal, a la altura comercial del fuste (D6) o apical, con diámetro mínimo de utilización de 6 cm. Y a una altura media entre el Dap y el D6.

El número de tratamientos realizados se determinó de la siguiente manera:

3 alturas para la muestra = 3 niveles o tratamientos

Para cada tratamiento se llevó a cabo 9 repeticiones, para la determinación de las 6 variables de respuesta: contenido de celulosa, lignina, extraíbles, taninos, cenizas y humedad. Las corridas realizadas son 27 (9×3) para la especie estudiada. Se empleó el método unifactorial en un solo sentido por ser concreto y sencillo.

3.3.2 Análisis Estadístico

Para cada componente químico 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 trataron 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 fue de veintisiete series para cada componente determinado. Los datos se arreglaron como sigue:

Tabla II. Variables para el diseño unifactorial en un sólo sentido

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	\bar{y}_a
				Y_i	\bar{y}

Fuente: Ref. 19. Pág. 412.

Donde:

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

\bar{y}_a = es el promedio de las observaciones bajo el i-ésimo tratamiento, similarmente Y_i es la suma de todas las observaciones y \bar{y} la media general de las observaciones.

El procedimiento para el diseño consistió en seleccionar una repetición completa del experimento, con un solo factor con a niveles (tratamientos). Las observaciones n se representaron 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 ij ésima.

μ = media general.

τ_i = efecto del i -ésimo tratamiento.

ε_{ij} = error aleatorio.

N = número total de observaciones ($a \times n$).

Como el interés era probar la igualdad de los a efectos de tratamiento, las hipótesis apropiadas fueron:

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

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

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

Tabla III. Análisis de varianza para el diseño unifactorial en un sólo sentido

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F ₀
<i>Tratamientos</i>	$\sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{n} - \frac{y^2_{..}}{N}$	<i>a - 1</i>	$\frac{(SS_{tratamientos})}{(a - 1)}$	$\frac{(MS_{tratamientos})}{MS_E}$
<i>Error</i>	<i>SS_E (por sustracción)</i>	<i>N - a</i>	$\frac{(SS_E)}{(N - a)}$	
<i>Total</i>	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y^2_{..}}{N}$	<i>N - 1</i>		

Fuente: Ref. 19. Pág. 417.

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

$$F_0 = \frac{MS_{tratamientos}}{MS_E} \quad (\text{Ec. 8})$$

donde $MS_{tratamientos}$ es la medida cuadrática de los tratamientos y MS_E es la medida cuadrática del error; y que para un nivel de confianza $\alpha = 0.05$ con 2 grados de libertad para tratamientos (3 – 1) y 24 para el error (27 – 3) se obtuvo un valor de F_t de 3.40, el cual fue comparado con los valores de F_0 que se obtuvieron para cada uno de los componentes químicos de la madera determinada, sabiendo que valores de F_0 menores o iguales a F_t comprueban la hipótesis nula, caso contrario la rechazan.

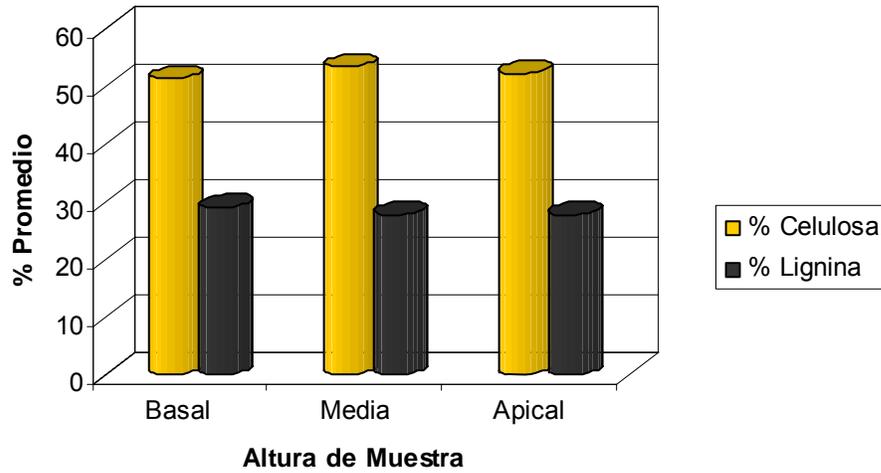
4. RESULTADOS

Tabla IV. Resultados Generales de la composición química de la madera de Pino Candelillo (*Pinus maximoi* H. E. Moore)

Árbol	Altura	% Celulosa	% Lignina	% Extraíbles	% Taninos	% Cenizas	% Humedad
1	<i>Basal</i>	51.77	30.00	8.37	0.15	0.4	11.12
	<i>Media</i>	49.46	34.00	6.32	0.16	0.3	10.31
	<i>Apical</i>	46.27	33.00	10.84	0.18	0.3	10.23
2	<i>Basal</i>	48.93	34.00	7.16	0.15	0.3	10.84
	<i>Media</i>	59.21	22.00	8.07	0.14	0.3	9.73
	<i>Apical</i>	51.61	28.00	8.16	0.18	0.4	10.91
3	<i>Basal</i>	49.36	32.00	7.73	0.09	0.4	10.15
	<i>Media</i>	53.66	28.00	7.96	0.12	0.5	10.87
	<i>Apical</i>	52.69	25.00	7.08	0.07	0.1	9.56
4	<i>Basal</i>	51.92	27.00	7.12	0.09	0.1	10.32
	<i>Media</i>	51.15	27.00	10.88	0.09	0.3	10.61
	<i>Apical</i>	50.32	27.00	9.81	0.06	0.3	9.62
5	<i>Basal</i>	48.89	28.00	10.61	0.07	0.4	10.79
	<i>Media</i>	49.96	30.00	10.79	0.09	0.5	10.78
	<i>Apical</i>	53.81	27.00	8.48	0.05	0.3	10.32
6	<i>Basal</i>	53.38	28.00	9.68	0.08	0.3	13.04
	<i>Media</i>	54.84	26.00	10.53	0.08	0.1	11.53
	<i>Apical</i>	56.18	25.00	9.97	0.08	0.3	11.45
7	<i>Basal</i>	52.53	27.00	10.97	0.06	0.5	12.27
	<i>Media</i>	53.70	29.00	9.13	0.07	0.6	10.48
	<i>Apical</i>	52.86	29.00	8.87	0.06	0.3	11.69
8	<i>Basal</i>	51.18	28.00	11.61	0.06	0.4	10.62
	<i>Media</i>	54.02	27.00	10.56	0.05	0.1	11.96
	<i>Apical</i>	53.50	27.00	10.84	0.05	0.5	10.73
9	<i>Basal</i>	54.55	28.00	7.69	0.05	0.7	12.46
	<i>Media</i>	54.95	27.00	7.80	0.05	0.3	11.22
	<i>Apical</i>	53.48	29.00	8.11	0.05	0.4	10.99

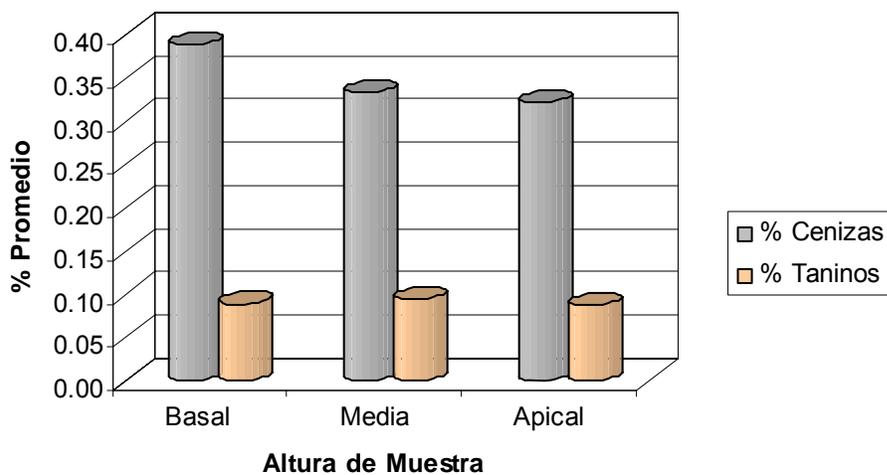
Fuente: Datos Calculados

Figura 17. Concentración promedio de Celulosa y Lignina en función de la altura del Pino Candelillo



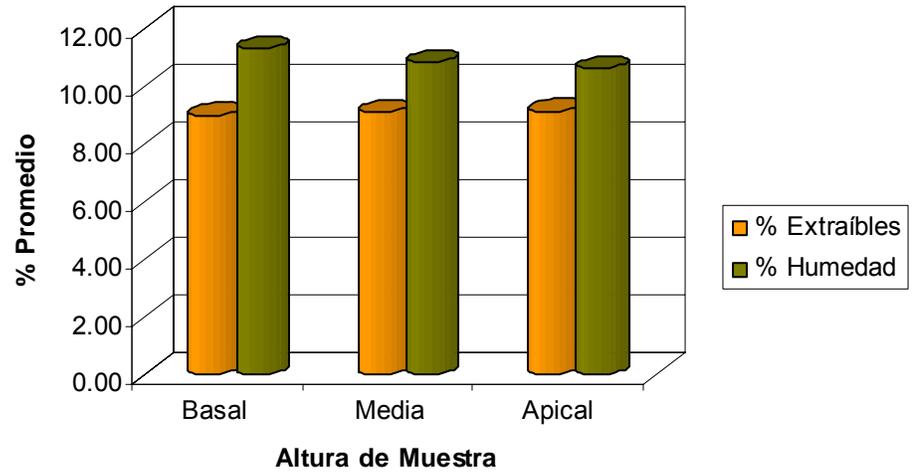
Fuente: Análisis Estadístico

Figura 18. Concentración promedio de Cenizas y Taninos en función de la altura del Pino Candelillo



Fuente: Análisis Estadístico

Figura 19. Concentración promedio de Extraíbles y Humedad en función de la altura del Pino Candelillo



Fuente: Análisis Estadístico

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente trabajo de graduación se determinó la composición química de la madera de Pino Candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore) siendo cinco los componentes químicos entre los cuales tenemos: Celulosa, Lignina, Sustancias Extraíbles, Taninos Puros y Cenizas, todos determinados como porcentaje en peso.

Así también se determinó el contenido de humedad, que se analizó por aparte ya que no es un componente propio de la estructura de la madera, y cuya finalidad fue la de establecer si se encontraba entre el rango necesario de humedad (8% a 12%), ya que conocer su contenido antes de su uso es importante para evitar problemas que modifiquen el inicio de los tratamientos químicos que permitirán cuantificar cada componente.

La tabla IV de la sección de resultados presenta los datos generales para los cinco componentes químicos, así como el contenido de humedad para cada una de las veintisiete muestras tratadas. Cada uno de los nueve árboles trabajados de la misma especie se trató a tres diferentes alturas, a las cuales fueron tomadas las muestras, siendo estas la troza basal de diámetro a la altura del pecho, la troza media y la troza apical o de punta, que a lo largo del informe se denominarán como altura 1, 2 y 3 o simplemente basal, media y apical respectivamente.

De esta tabla se puede observar que la concentración de celulosa se encuentra entre 46% y 59% en peso, la lignina se encuentra entre 22% y 34%, las sustancias extraíbles se encuentran entre 6% y 12%, los taninos puros se

encuentran entre 0.05% y 0.18%, y las cenizas se encuentran entre 0.1% y 0.7%.

Estos resultados obtenidos concuerdan con los rangos registrados en la literatura para coníferas o maderas suaves, ya que el pino figura entre ellas. Los datos que se tienen de la tabla I de la sección de marco teórico son los siguientes: Celulosa entre 30.1% y 60.7%, Lignina entre 21.7% y 37.0%, Sustancias Extraíbles entre 0.2% y 14.4%, y Cenizas entre 0.02% y 1.1%. (Ref. 25)

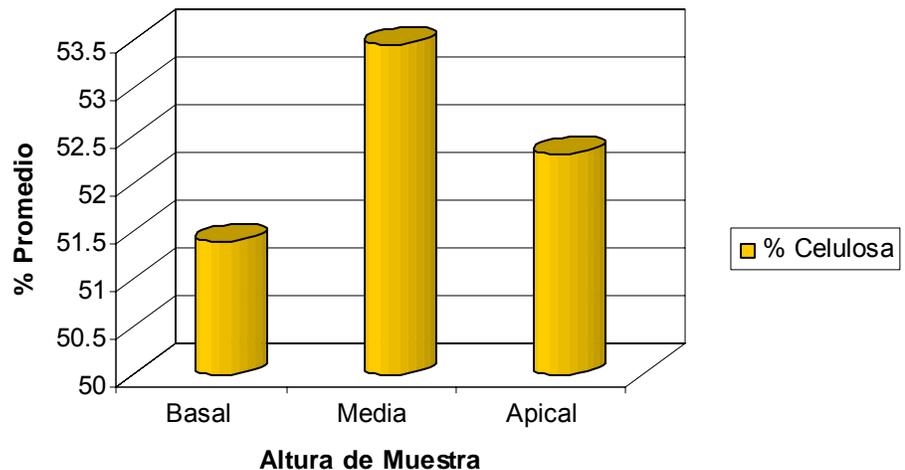
Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza para un sistema unifactorial en un solo sentido completamente aleatorio por medio de la distribución de Fisher (Ref. 19). Los datos que se obtuvieron de celulosa indican que en promedio no hubo diferencia significativa con respecto a la altura, ya que la composición es relativamente la misma en cualquier parte del árbol, lo cual denota que es el componente más abundante en la madera no importando la altura e independientemente de que sea madera suave o dura.

El resultado se respalda con el análisis de varianza que se aplicó a los datos obtenidos, los cuales se presentan en la tabla XI del apéndice B. Donde el valor observado para la prueba de Fisher es de 1.3818, siendo menor al valor tabulado de 3.4000, lo que confirma que no existe variación significativa. Sin embargo, los valores medios de la tabla XVII indican que en la altura 2 se encuentra en mayor cantidad el componente, y le siguen la altura 3 y altura 1.

Es importante mencionar que estas variaciones promedio son determinadas desde el punto de vista estadístico, pero la variación es tan pequeña que para un análisis general se considera no significativa.

A continuación se presenta el gráfico del comportamiento del contenido de celulosa en función de la altura.

Figura 20. Concentración promedio de Celulosa en función de la altura del Pino Candelillo



Fuente: Análisis Estadístico

El análisis de varianza para la lignina se presenta en la tabla XII, en donde los datos muestran que la composición de lignina no varía significativamente en función de la altura. Esto se indica por medio de la comparación de los valores obtenidos para la prueba de Fisher, dando como resultado la aceptación de la hipótesis nula (H_0), como en el caso de la composición de celulosa. El valor observado para la prueba de Fisher es de 0.7191, siendo menor al valor tabulado o teórico de 3.4000, lo que indica que no existe variación significativa.

La tabla XVII muestra los valores medios de la composición de lignina para las tres alturas, indicando que hay una mayor cantidad en la altura 1,

mientras que en las alturas 2 y 3, las cuales tienen la misma composición se encuentra una menor cantidad. Considerando que según el análisis estadístico se concluyó que aunque hay variación está se considera no significativa.

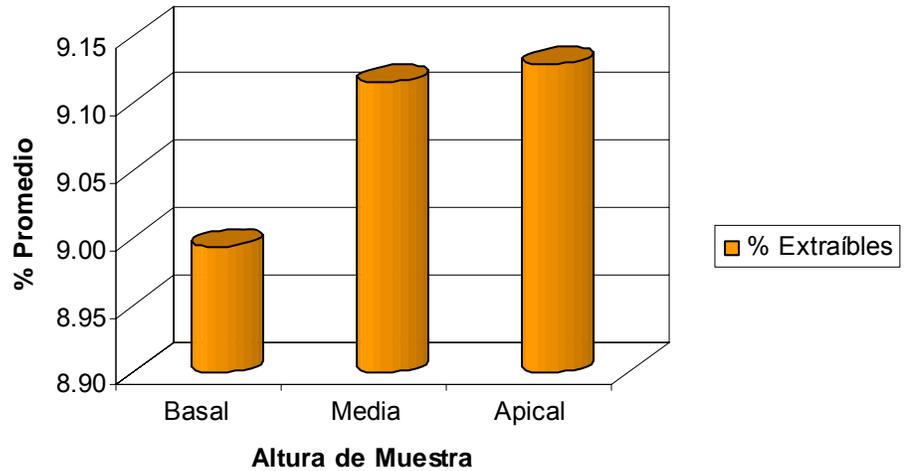
La lignina al igual que la celulosa, funciona como un pilar para soportar los tejidos de la planta, siendo importante que su concentración se mantenga a pesar de la variación de diámetros de la troza de una altura a otra. Lo que es lógico pensar que como en la parte basal se encuentra en mayor cantidad, que en la parte media y apical, permite que la base sea mucho más fuerte y resistente para sostener el árbol.

La tabla XIII del apéndice B presenta los resultados del análisis de varianza para las sustancias extraíbles. Donde el valor observado para la prueba de Fisher es de 0.0201, siendo menor al valor tabulado de Fisher de 3.4000, indicando que el contenido de sustancias extraíbles no varía de forma significativa en función de la altura.

La tabla XVII muestra los valores medios de los datos, donde se puede apreciar que a medida que la altura aumenta, el contenido de sustancias extraíbles aumenta, tomando en cuenta que no lo hace de manera significativa según el análisis estadístico.

Sin embargo, a nivel general como lo muestra la figura 21 la composición química de sustancias extraíbles presenta una relación directamente proporcional a la altura, ya que en promedio a mayor altura, existe mayor cantidad de sustancias extraíbles. La distribución de las sustancias extraíbles está regida por factores de significado genético y ecológico, mientras que su composición y cantidad relativa dependen de la especie, edad y región.

Figura 21. Concentración promedio de Extraíbles en función de la altura del Pino Candelillo



Fuente: Análisis Estadístico

La tabla XIV muestra el análisis de varianza para la concentración de taninos puros. Donde el valor observado para la prueba de Fisher es de 0.0752, cuando el valor tabulado de Fisher es de 3.4000, siendo este último mayor que el valor observado, acepta la hipótesis nula (H_0), lo que indica que no existe variación significativa.

Es importante mencionar que la determinación de taninos puros se trabajó con la madera del árbol, no así con la corteza, que es donde se encuentra la mayor concentración de éstos. Es por esta razón que se obtuvieron datos de concentración bajos.

Además que fue la razón primordial por la que se utilizó el método volumétrico de tara en vaina, primero por la mínima cantidad de extracto tánico que se encuentra en la madera, ya que fue imposible llegar a una cantidad

considerable que permitiera obtener un dato en peso, y segundo por la facilidad del método volumétrico que al requerir de una titulación con permanganato de potasio (KMnO_4), permitió reportar resultados en volumen, debido a los cambios claros y fáciles de apreciar a lo largo de la titulación.

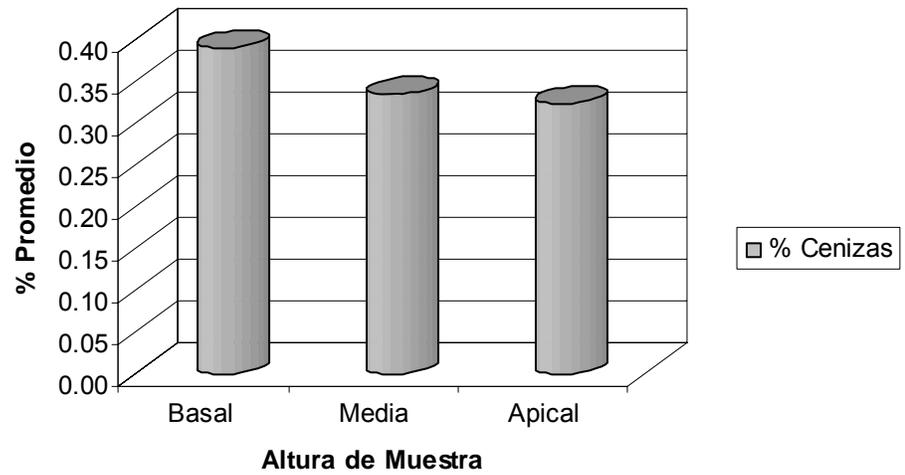
La tabla XVII muestra los valores medios de taninos puros en la madera, los cuales se concentran en la misma cantidad a las tres diferentes alturas respectivamente.

La tabla XV muestra el análisis de varianza para la concentración de cenizas. Donde el valor observado para la prueba de Fisher es de 0.5061, siendo menor al valor tabulado de Fisher de 3.4000, indicando que el contenido de cenizas no varía significativamente en función de la altura, lo que da como resultado la aceptación de la hipótesis nula (H_0).

Sin embargo, los valores medios de la tabla XVII indican que la concentración es mayor en la altura 1 o basal y va disminuyendo conforme la altura aumenta. Es decir que la concentración de cenizas es inversamente proporcional a la altura, tal como se muestra en la figura 22.

Cabe mencionar que en base al análisis estadístico se concluyó que la variación no es significativa. Dicha variación denota que los minerales, determinados de forma general, están constituidos por compuestos de óxidos de metales (óxido de potasio K_2O , óxido de magnesio MgO), los cuales son pesados y se ven regidos por el efecto de la gravedad, ya que a menor altura su concentración es mayor.

Figura 22. Concentración promedio de Cenizas en función de la altura del Pino Candelillo



Fuente: Análisis Estadístico

CONCLUSIONES

1. El contenido de taninos se encontró entre 0.05% y 0.18% en peso, mientras que la lignina fue el segundo componente químico más abundante con valores entre 22% y 34%.
2. La celulosa es el componente químico más abundante de la madera del Pino Candelillo a cualquier altura, ya que su concentración se encontró entre 46% y 59 % en peso.
3. Las sustancias extraíbles se encontraron entre 6% y 12% en peso, y las cenizas entre 0.1% y 0.7%.
4. La caracterización química de la madera del Pino Candelillo demostró que no existe variación significativa de sus componentes químicos en función de la altura.
5. El contenido de humedad de muestra de la madera del Pino Candelillo se encontró entre 9% y 13% en peso.

RECOMENDACIONES

1. Promover la investigación sobre caracterización química en otras especies forestales, y así comparar las concentraciones de los componentes químicos presentes; como también para árboles de la misma especie a partir de regiones distintas.
2. Hacer un estudio para incrementar la variedad de componentes químicos a determinar, así como los tipos de sustancias extraíbles en la madera, con el objeto de cuantificarlos.
3. Realizar estudios económicos sobre las alternativas de uso de la madera y corteza, que analicen la factibilidad a escala piloto en la determinación de componentes químicos, con el fin de reactivar la industria de aserrado.
4. Investigar los diversos tipos de métodos para la determinación de los componentes químicos de la madera, con la finalidad de optimizar tiempo, recursos y rendimiento para futuras investigaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilar Cumes, J. M. **“Guía para la Identificación de las Coníferas de Guatemala”**. Sector Público Agrícola. Instituto Nacional Forestal, Unidad Manejo Forestal, Departamento de Reforestación. Guatemala, 1976.
2. Bland, D. E. **“The Composition and Analysis of Wood”**. 3a. Edición. New York, 1985.
3. Browning, B. L. **“Methods of Wood Chemistry”**. 2a. Edición. Londres, 1967.
4. Carballo, L. R. **“The Influence of Chemical Composition and Age of Pine Wood on The Physical and Mechanical Properties as Well as on Yield of Sulfite Pulp”**. Rep. Eslovaca, 1990.
5. Díaz, A. **“Ciencia de la Madera”**. Ministerio de Educación Superior. La Habana, 1986.
6. Dick, J. G. **“Química Analítica”**. Traducido por Beatriz S, Hill de V. Tomo II. Editorial el Manual Moderno S. A. México, 1979.
7. Echenique, R. **“Ciencia y Tecnología de la Madera”**. Textos Universitarios, Universidad Veracruzana. México, 1993.
8. Emilianova, I. Z. **“Control Químico y Técnico de las Producciones Hidrolíticas”**. Editorial Lesnaya. Moscú, 1969.

9. Fengel, D. Wegener, G. **“Wood Chemistry, Ultraestructure Reaction”**. Berlín, 1984.
10. Geankopolis, C. J. **“Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias”**. 3a. Edición. Editorial CECSA. México, 1999.
11. Glasser, W. G. Y Glasser, H. R. **“The Structure and Properties of Paper”**. Australian, 1981.
12. González, Y; Peñaz, M. **“Taninos de Diferentes Especies Vegetales en la Prevención del Fotoenvejecimiento”**. Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas. La Habana, 2001.
13. Guardiola, J. L. Y Amparo, G. L. **“Fisiología Vegetal, Nutrición y Transporte”**. Valencia, España, 1995.
14. Herrera, Mirna Ethel. **“Determinación de Propiedades Anatómicas”**. Proyecto FODECYT 03-03. Guatemala, 2005.
15. Hirata, T. Y Nishimoto, T. **“DSC, DTA and TG of Cellulose Untreated and Treated With Flame Retardant, Thermoquímica”**. Amsterdam, 1991.
16. Instituto Geográfico Nacional. **“Atlas Nacional de Guatemala”**. Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas. Guatemala, 1972.
17. Kreshkov, A. P. **“Curso de Química Analítica”**. Traducido del Ruso por S. G. Kará-Murzá Impreso en la URSS. Traducción en Español. Editorial Mir. Moscú, 1985.

18. Meltzer, Robert L. **“1979 Annual Book of ASTM Standards”**. Parte 22 Madera y Adhesivos. Sociedad Americana de Ensayos y Materiales. Estados Unidos de América, 1979.
19. Montgomery, Douglas C. Y William W. Hines. **“Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Administración”**. 3a. Edición. Editorial Continental. México, 1994.
20. Sakakibara, K. Y Neish, A. C. **“Technology of Wood”**. U.S.A., 1980.
21. S. Hon, David N. Y Shiraishi Nobuo. **“Wood and Cellulosic Chemistry”**. New York, 1991.
22. Skoog, D. A. **“Principles of Instrumental Analysis”**. 3a. Edición. U.S.A. 1985.
23. Tanner, W. Y Loewus, F. A. **“Extracelular Carbohydrates, Encyclopedia of Plant Physiology”**. New York, 1981.
24. Treybal, Robert E. **“Operaciones de Transferencia de Masa”**. 2a. Edición. Editorial McGraw-Hill. México, 2000.
25. Tsoumis, George. **Science and Technology of Wood**. Editorial Van Nostrand Reinhold. New York, 1982.
26. Vidal, José J. **“El Pino y Algunas Especies de Interés Económico”**. Editorial Hispano Americana. México, 1962.

27. www.biocienciaenlinea.cl/novedades. Enero de 2006.

28. www.camcore.org. Junio de 2005.

29. www.papelnet.com. Noviembre de 2005.

BIBLIOGRAFÍA

1. Gómez Orozco, Edson Daniel. “**Comparación del Porcentaje de Extracto Tánico de la Corteza y de la Madera de Encino (*Quercus tristis Liebm*) Proveniente de un Bosque Natural**”. Tesis Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Guatemala, 2004.
2. Instituto Nacional de Bosques INAB. “**Ficha Técnica de Especies: Pino Candelillo**”. Revista del INAB. Guatemala, 1999.
3. Investigación Forestal CONCYT. “**Usos Maderables del Pino Candelillo**”. Programa de investigación Forestal. Guatemala, 2002.
4. Kirk, R. “**Enciclopedia de Tecnología Química**”. Edición en Español. Editorial Hispano Americana. México, 1961.
5. McCabe, Warren L. Julian Smith C. Y Harriot Meter. “**Operaciones Unitarias en Ingeniería Química**”. 4a. Edición. Editorial McGraw-Hill. México, 2000.
6. Perry, Robert H. Y Green Don W. “**Manual del Ingeniero Químico**”. 7a. Edición. Editorial McGraw-Hill. 1999.
7. Rosales Castro, Martha y Rubén F. González Laredo. “**Comparación del Contenido de Compuestos Fenólicos en la Corteza de Ocho Especies de Pino**”. Revista Madera y Bosques. Guatemala, 2003.

APÉNDICE A

DATOS CALCULADOS

Tabla V. Datos calculados para celulosa

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	51.77	48.93	49.36	51.92	48.89	53.38	52.53	51.18	54.55	462.51	51.39
2	49.46	59.21	53.66	51.15	49.96	54.84	53.70	54.02	54.95	480.95	53.44
3	46.27	51.61	52.69	50.32	53.81	56.18	52.86	53.50	53.48	470.72	52.30
										1414.18	52.38

Fuente: Datos Originales

Tabla VI. Datos calculados para lignina

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	30.00	34.00	32.00	27.00	28.00	28.00	27.00	28.00	28.00	262	29.11
2	34.00	22.00	28.00	27.00	30.00	26.00	29.00	27.00	27.00	250	27.78
3	33.00	28.00	25.00	27.00	27.00	25.00	29.00	27.00	29.00	250	27.78
										762	28.22

Fuente: Datos Originales

Tabla VII. Datos calculados para extraíbles

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	8.37	7.16	7.73	7.12	10.61	9.68	10.97	11.61	7.69	80.94	8.99
2	6.32	8.07	7.96	10.88	10.79	10.53	9.13	10.56	7.80	82.04	9.12
3	10.84	8.16	7.08	9.81	8.48	9.97	8.87	10.84	8.11	82.16	9.13
										245.14	9.08

Fuente: Datos Originales

Tabla VIII. Datos calculados para taninos puros

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	0.15	0.15	0.09	0.09	0.07	0.08	0.06	0.06	0.05	0.80	0.09
2	0.16	0.14	0.12	0.09	0.09	0.08	0.07	0.05	0.05	0.85	0.09
3	0.18	0.18	0.07	0.06	0.05	0.08	0.06	0.05	0.05	0.78	0.09
										2.43	0.09

Fuente: Datos Originales

Tabla IX. Datos calculados para cenizas

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	0.4	0.3	0.4	0.1	0.4	0.3	0.5	0.4	0.7	3.5	0.39
2	0.3	0.3	0.5	0.3	0.5	0.1	0.6	0.1	0.3	3.0	0.33
3	0.3	0.4	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.4	2.9	0.32
										9.4	0.35

Fuente: Datos Originales

Tabla X. Datos calculados para humedad

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	11.12	10.84	10.15	10.32	10.79	13.04	12.27	10.62	12.46	101.61	11.29
2	10.31	9.73	10.87	10.61	10.78	11.53	10.48	11.96	11.22	97.49	10.83
3	10.23	10.91	9.56	9.62	10.32	11.45	11.69	10.73	10.99	95.50	10.61
										294.60	10.91

Fuente: Datos Originales

APÉNDICE B

DATOS ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Tabla XI. Resultados del Análisis de Varianza para Celulosa

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F ₀	F _t
Tratamientos	18.9663	2	9.4832	1.3818	3.4000
Error	164.7074	24	6.8628		
Total	183.6738	26			

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XII. Resultados del Análisis de Varianza para Lignina

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F ₀	F _t
Tratamientos	10.6667	2	5.3333	0.7191	3.4000
Error	178.0000	24	7.4167		
Total	188.6667	26			

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XIII. Resultados del Análisis de Varianza para Extraíbles

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F ₀	F _t
Tratamientos	0.1005	2	0.0502	0.0201	3.4000
Error	60.0617	24	2.5026		
Total	60.1622	26			

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XIV. Resultados del Análisis de Varianza para Taninos Puros

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F ₀	F _t
Tratamientos	0.0003	2	0.0001	0.0752	3.4000
Error	0.0461	24	0.0019		
Total	0.0464	26			

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XV. Resultados del Análisis de Varianza para Cenizas

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F ₀	F _t
Tratamientos	0.0230	2	0.0115	0.5061	3.4000
Error	0.5444	24	0.0227		
Total	0.5674	26			

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XVI. Resultados del Análisis de Varianza para Humedad

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F ₀	F _t
Tratamientos	2.1580	2	1.0790	1.5629	3.4000
Error	16.5688	24	0.6904		
Total	18.7269	26			

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XVII. Concentración promedio de los componentes determinados en función de la altura del Pino Candelillo

Altura	% Celulosa	% Lignina	% Extraíbles	% Taninos	% Cenizas	% Humedad
Basal	51.39	29.11	8.99	0.09	0.39	11.29
Media	53.34	27.78	9.12	0.09	0.33	10.83
Apical	52.30	27.78	9.13	0.09	0.32	10.61

Fuente: Análisis Estadístico

APÉNDICE C
DATOS ORIGINALES

Tabla XVIII. Datos originales para la determinación de celulosa y lignina

Árbol	Muestra	P. T. (g)	P. B. (g)	P. N. (g)	P. M. (g)	P. T. M. (g)	% Celulosa	% Lignina
1	<i>Basal</i>	0.53	1.40	0.87	3.88	7.50	51.77	30.00
	<i>Media</i>	0.52	1.39	0.87	3.71	7.50	49.46	34.00
	<i>Apical</i>	0.53	1.38	0.85	3.47	7.50	46.27	33.00
2	<i>Basal</i>	0.54	1.40	0.87	3.67	7.50	48.93	34.00
	<i>Media</i>	1.22	2.08	0.86	4.44	7.50	59.21	22.00
	<i>Apical</i>	1.19	2.03	0.84	3.87	7.50	51.61	28.00
3	<i>Basal</i>	1.21	2.06	0.86	3.70	7.50	49.36	32.00
	<i>Media</i>	1.22	2.08	0.86	4.02	7.50	53.66	28.00
	<i>Apical</i>	1.03	1.85	0.82	3.95	7.50	52.69	25.00
4	<i>Basal</i>	1.02	1.85	0.83	3.89	7.50	51.92	27.00
	<i>Media</i>	1.02	1.86	0.84	3.84	7.50	51.15	27.00
	<i>Apical</i>	1.04	1.87	0.83	3.77	7.50	50.32	27.00
5	<i>Basal</i>	1.03	1.86	0.83	3.67	7.50	48.89	28.00
	<i>Media</i>	0.61	1.47	0.86	3.75	7.50	49.96	30.00
	<i>Apical</i>	0.62	1.48	0.86	4.04	7.50	53.81	27.00
6	<i>Basal</i>	0.65	1.52	0.87	4.00	7.50	53.38	28.00
	<i>Media</i>	0.63	1.50	0.87	4.11	7.50	54.84	26.00
	<i>Apical</i>	0.59	1.47	0.87	4.21	7.50	56.18	25.00
7	<i>Basal</i>	0.62	1.48	0.86	3.94	7.50	52.53	27.00
	<i>Media</i>	0.64	1.52	0.88	4.03	7.50	53.70	29.00
	<i>Apical</i>	0.62	1.49	0.87	3.96	7.50	52.86	29.00
8	<i>Basal</i>	0.64	1.50	0.86	3.84	7.50	51.18	28.00
	<i>Media</i>	0.61	1.49	0.87	4.05	7.50	54.02	27.00
	<i>Apical</i>	0.61	1.48	0.87	4.01	7.50	53.50	27.00
9	<i>Basal</i>	0.63	1.50	0.87	4.09	7.50	54.55	28.00
	<i>Media</i>	0.61	1.48	0.87	4.12	7.50	54.95	27.00
	<i>Apical</i>	0.60	1.47	0.87	4.01	7.50	53.48	29.00

Tabla XIX. Datos originales para la determinación de taninos y extraíbles

Árbol	Muestra	Vol. (ml)	P. N. (g)	% Taninos	P. M. (g)	P. N. (g)	% Extraíbles
1	<i>Basal</i>	1.70	1.067	0.15	7.50	6.87	8.37
	<i>Media</i>	1.75	1.748	0.16	7.50	7.03	6.32
	<i>Apical</i>	1.95	1.995	0.18	7.50	6.69	10.84
2	<i>Basal</i>	1.68	1.570	0.15	7.50	6.96	7.16
	<i>Media</i>	1.60	1.912	0.14	7.50	6.90	8.07
	<i>Apical</i>	1.98	1.606	0.18	7.50	6.89	8.16
3	<i>Basal</i>	1.10	1.105	0.09	7.50	6.92	7.73
	<i>Media</i>	1.43	1.740	0.12	7.50	6.90	7.96
	<i>Apical</i>	0.90	1.894	0.07	7.50	6.97	7.08
4	<i>Basal</i>	1.05	1.753	0.09	7.50	6.97	7.12
	<i>Media</i>	1.05	1.034	0.09	7.50	6.68	10.88
	<i>Apical</i>	0.85	1.104	0.06	7.50	6.76	9.81
5	<i>Basal</i>	0.90	0.963	0.07	7.50	6.70	10.61
	<i>Media</i>	1.05	1.165	0.09	7.50	6.69	10.79
	<i>Apical</i>	0.75	1.276	0.05	7.50	6.86	8.48
6	<i>Basal</i>	1.00	1.099	0.08	7.50	6.77	9.68
	<i>Media</i>	1.00	1.221	0.08	7.50	6.71	10.53
	<i>Apical</i>	1.00	1.397	0.08	7.50	6.75	9.97
7	<i>Basal</i>	0.80	2.036	0.06	7.50	6.68	10.97
	<i>Media</i>	0.90	1.559	0.07	7.50	6.82	9.13
	<i>Apical</i>	0.78	1.833	0.06	7.50	6.84	8.87
8	<i>Basal</i>	0.80	1.637	0.06	7.50	6.63	11.61
	<i>Media</i>	0.75	1.988	0.05	7.50	6.71	10.56
	<i>Apical</i>	0.70	2.512	0.05	7.50	6.69	10.84
9	<i>Basal</i>	0.70	1.250	0.05	7.50	6.92	7.69
	<i>Media</i>	0.70	1.666	0.05	7.50	6.92	7.80
	<i>Apical</i>	0.70	1.458	0.05	7.50	6.89	8.11

Tabla XX. Datos originales para la determinación de cenizas y humedad

Árbol	Muestra	P. T. (g)	P. B. (g)	P. N. (g)	% Cenizas	% Humedad
1	<i>Basal</i>	20.156	20.160	0.004	0.4	11.12
	<i>Media</i>	21.421	21.424	0.003	0.3	10.31
	<i>Apical</i>	22.766	22.769	0.003	0.3	10.23
2	<i>Basal</i>	20.295	20.298	0.003	0.3	10.84
	<i>Media</i>	22.633	22.635	0.002	0.3	9.73
	<i>Apical</i>	10.333	10.337	0.004	0.4	10.91
3	<i>Basal</i>	20.156	20.160	0.004	0.4	10.15
	<i>Media</i>	21.421	21.426	0.005	0.5	10.87
	<i>Apical</i>	22.633	22.634	0.001	0.1	9.56
4	<i>Basal</i>	20.295	20.296	0.001	0.1	10.32
	<i>Media</i>	22.766	22.769	0.003	0.3	10.61
	<i>Apical</i>	10.333	10.336	0.003	0.3	9.62
5	<i>Basal</i>	20.156	20.160	0.004	0.4	10.79
	<i>Media</i>	21.421	21.426	0.005	0.5	10.78
	<i>Apical</i>	20.295	20.298	0.003	0.3	10.32
6	<i>Basal</i>	22.766	22.769	0.003	0.3	13.04
	<i>Media</i>	22.633	22.634	0.001	0.1	11.53
	<i>Apical</i>	10.333	10.336	0.003	0.3	11.45
7	<i>Basal</i>	20.156	20.161	0.005	0.5	12.27
	<i>Media</i>	21.421	21.427	0.006	0.6	10.48
	<i>Apical</i>	20.295	20.298	0.003	0.3	11.69
8	<i>Basal</i>	22.766	22.770	0.004	0.4	10.62
	<i>Media</i>	22.633	22.634	0.001	0.1	11.96
	<i>Apical</i>	10.333	10.338	0.005	0.5	10.73
9	<i>Basal</i>	40.840	40.847	0.007	0.7	12.46
	<i>Media</i>	27.724	27.727	0.003	0.3	11.22
	<i>Apical</i>	25.285	25.289	0.004	0.4	10.99

APÉNDICE D

D.1 Secuencia para la obtención de celulosa

Figura 23. Madera inmersa en solución de NaOH



Fuente: Mario Roberto Fonseca Maldonado



Figura 24. Filtrado de la mezcla; el producto insoluble es celulosa



Fuente: Mario Roberto Fonseca Maldonado



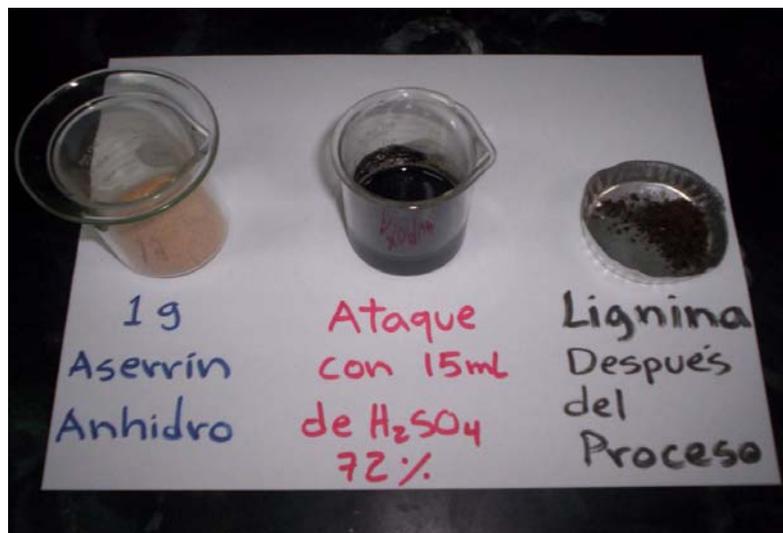
Figura 25. Producto seco



Fuente: Mario Roberto Fonseca Maldonado

D.2 Secuencia para la obtención de lignina

Figura 26. La fracción insoluble es lignina



Fuente: Mario Roberto Fonseca Maldonado

D.3 Secuencia para la cuantificación de taninos

Figura 27. Los pasos son: 1. Agregar una muestra de madera en un beacker. 2. Agregar solución de sulfito de sodio. 3. Filtrar y obtener la fracción soluble. 4. Evaporar y obtener el extracto tánico seco. 5. Tomar cierta cantidad del extracto tánico. 6. Disolver en agua destilada y calentar. 7. Titular con una solución de permanganato de potasio. 8. Cuantificar por medio del volumen utilizado de titulante al llegar al punto final.



Fuente: Mario Roberto Fonseca Maldonado

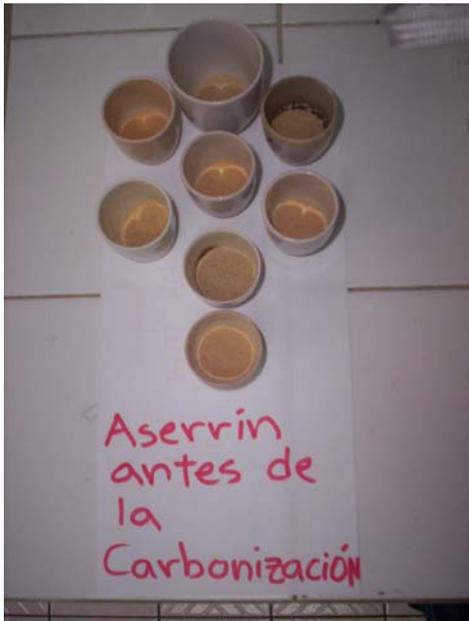
Figura 28. Muestras de extracto tánico seco



Fuente: Mario Roberto Fonseca Maldonado

D.4 Secuencia para la obtención de cenizas

Figura 29. Muestras de madera y mufla para la calcinación



Fuente: Mario Roberto Fonseca Maldonado

Figura 30. Muestras a calcinar y cenizas como producto



Fuente: Mario Roberto Fonseca Maldonado