

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Forestal

Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas de la
madera de 5 especies forestales ubicadas en el bosque muy
húmedo subtropical cálido

Álvaro Antonio González Morales

Guatemala

2005

Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas de la madera de 5 especies forestales ubicadas en el bosque muy húmedo subtropical cálido.

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Forestal

Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas de la
madera de 5 especies forestales ubicadas en el bosque muy
húmedo subtropical cálido

Trabajo de graduación presentado por Álvaro Antonio González Morales para optar al
grado académico de Licenciado en Ingeniería Forestal

Guatemala

2005

Vo. Bo. :

(f) _____
(Ing. Obed Hidalgo)

Tribunal Examinador:

(f) _____
(Ing. César Augusto Castañeda Salguero)

(f) _____
(Ing. Alejandra Hernández Guzmán)

(f) _____
(Ing. Obed Hidalgo)

Fecha de aprobación: Guatemala 14 de junio de 2006.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo del proyecto de investigación forestal del Instituto Nacional de Bosques (INAB) a través de la Universidad del Valle de Guatemala, el cual hizo posible la realización de este proyecto con la finalidad de resolver problemas de desarrollo forestal.

ÍNDICE

PREFACIO	vi
INDICE	vii
LISTA DE CUADROS	ix
LISTA DE GRÁFICOS	x
RESUMEN	xi
Capitulos	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
A. Objetivo general	2
B. Objetivos específicos	2
III. MARCO TEÓRICO	3
A. Propiedades básicas de la madera	3
B. Propiedades físicas de la madera	4
C. Propiedades mecánicas	11
D. Análisis estadístico para pruebas físicas y mecánicas de la madera	17
E. Determinación de esfuerzos básicos	18
F. Posibles usos según las propiedades mecánicas	20
G. Características botánicas de las especies a trabajar	20
IV. METODOLOGÍA	22
A. Priorización de especies forestales a estudiar	22
B. Lugar de recolección	22
C. Recolección de las muestras	22
D. Determinación de las propiedades físicas	23
E. Determinación de propiedades mecánicas	25
V. RESULTADOS	28
A. Granadilla	28
B. Luin hembra	30
C. Danto	32
D. Zapotillo	35
E. Guacibán	37
VI. DISCUSIÓN	40
VII. CONCLUSIONES	43
VIII. RECOMENDACIONES	44
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
X. ANEXOS	47
A. Relación humedad-peso de la madera de Granadilla	47
B. Relación humedad-volumen de la madera de Granadilla	47
C. Relación humedad-peso de la madera de Luin hembra	48
D. Relación humedad-volumen de la madera de Luin hembra	48
E. Relación humedad-peso de la madera de Danto	49
F. Relación humedad-volumen de la madera de Danto	49

G. Relación humedad-peso de la madera de Zapotillo.	50
H. Relación humedad-volumen de la madera de Zapotillo.....	50
I. Relación humedad-peso de la madera de Guacibán.....	51
J. Relación humedad-volumen de la madera de Guacibán.....	51

LISTA DE CUADROS

Cuadros

3.1. Clasificación de la madera según el tipo de contracción	8
3.2. Clasificación de la madera según relación CT/CR	8
3.3. Clasificación de la madera según su peso específico	9
4.1. Medidas de las piezas a utilizar en las diferentes pruebas	23
5.1. Características organolépticas de la Granadilla	28
5.2. Contenido de humedad y pesos de la Granadilla	29
5.3. Contracciones de la Granadilla	29
5.4. Esfuerzos últimos de la Granadilla	30
5.5. Módulo de elasticidad y de ruptura de la Granadilla	30
5.6. Características organolépticas del Luin hembra	31
5.7. Contenido de humedad y pesos del Luin hembra	31
5.8. Contracciones del Luin hembra	31
5.9. Esfuerzos últimos del Luin hembra	32
5.10. Módulo de elasticidad y ruptura del Luin hembra	32
5.11. Características organolépticas del Danto	33
5.12. Contenido de humedad y pesos del Danto	33
5.13. Contracciones del Danto	34
5.14. Esfuerzos últimos del Danto	34
5.15. Módulo de elasticidad y ruptura del Danto	35
5.16. Características organolépticas del Zapotillo	35
5.17. Contenido de humedad y pesos del Zapotillo	36
5.18. Contracciones del Zapotillo	36
5.19. Esfuerzos últimos del Zapotillo	37
5.20. Módulo de elasticidad y ruptura del Zapotillo	37
5.21. Características organolépticas de la madera de Guaciban	38
5.22. Contenido de humedad y pesos del Guacibán	38
5.23. Contracciones de la madera de Guacibán	39
5.24. Esfuerzos últimos de la madera de Guacibán	39
5.25. Módulo de elasticidad y ruptura del Guacibán	39

LISTA DE GRÁFICOS

Figuras

3.1. Ejes de la madera	3
3.2. Escala Munsell	6
3.3. Contracción característica y distorsión de piezas planas, cuadradas y redondas afectadas por la dirección de los anillos de crecimiento	7
3.4. Diagrama esfuerzo-deformación	11
3.5. Diagrama carga-deformación	12
3.6. Diagrama del ensayo de flexión	13
3.7. Posibles fallas de la flexión estática	14
3.8. Diagrama del ensayo de compresión paralela a la fibra	15
3.9. Tipos de falla en la madera bajo compresión paralela a la fibra	15
3.10. Diagrama del ensayo de compresión perpendicular a la fibra	15
3.11. Probeta y herramienta para el ensayo de corte	16
5.1. Corte tangencial de la Granadilla	28
5.2. Corte radial de la Granadilla	28
5.3. Corte tangencial del Luin hembra	30
5.4. Corte radial del Luin hembra	30
5.5. Corte tangencial del Danto	32
5.6. Corte radial del Danto	33
5.7. Corte tangencial del Zapotillo	35
5.8. Corte radial del Zapotillo	35
5.9. Corte tangencial del Guacibán	37
5.10. Corte radial del Guacibán	38

RESUMEN

En este trabajo se determinaron las propiedades físicas y mecánicas de cinco especies con potencial forestal provenientes del parcelamiento “El Manantial”, ubicado en el municipio de Sayaxché, departamento de Petén. Dichas especies son: Danto (*Vatairea lundellii*), Guacibán (*Pithecelobium leucocalyx*), Luin hembra (*Ampelocera hottlei*), Granadilla (*Dalbergia stevensonii*) y Zapotillo (*Pouteria durtandii*).

Las pruebas se trabajaron según las metodologías de la ASTM-D 143 (American Society for Testing and Materials), en el laboratorio de materiales del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle de Guatemala.

Las pruebas realizadas fueron:

- Pruebas físicas: Peso específico, densidad, contenido de humedad, contracción longitudinal, tangencial, radial y volumétrica.
- Pruebas mecánicas: Incluyeron la prueba de flexión estática, compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular a la fibra, corte y dureza.

Dados los resultados de las diferentes pruebas, se puede establecer que la madera con la mayor resistencia es la Granadilla, seguido del Danto, Luin hembra, Zapotillo y por último el Guacibán. Sin embargo, todas las maderas menos el Guacibán, fueron aptas para labores de construcción, mueblería, postes. En el caso del Guacibán, podría ser utilizado para productos artesanales.

I. INTRODUCCIÓN

Los bosques a nivel nacional están sufriendo una sobreexplotación por la presión demográfica y el avance de la frontera agrícola. Sin embargo, también sufren una subexplotación debido a que no se conocen las características de las distintas maderas, repercutiendo en la pérdida del valor económico que pueden llegar a tener éstas si se conocieran sus propiedades. Por esta situación y ante la escasez de las maderas más comúnmente explotadas (cedro, caoba, santa maría, etc.), existe la necesidad de estudiar alternativas maderables que eventualmente, si no bien sustituyan, compitan con estas especies de aprovechamiento primario.

Es la generación de esta información la que necesita estudios de propiedades físicas y mecánicas en donde se pueden identificar ciertas características específicas para una especie, las cuales pueden determinar un uso adecuado.

Tomando en cuenta lo expuesto anteriormente y ante la gran diversidad de especies con las que cuenta Guatemala, se determinaron algunas propiedades físicas y mecánicas de cinco especies latifoliadas, algunas de las cuales hasta el presente son clasificadas como especies de aprovechamiento secundario. Sin embargo, varias de las mismas tienen grandes potenciales para la producción de diversos productos.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Determinar las propiedades fisico-mecánicas de las maderas de Danto (*Vatairea lundellii*), Guacibán (*Pithecelobium leucocalyx*), Luin (*Ampelocera hottlei*), Granadilla (*Dalbergia stevensonii*) y Zapotillo (*Pouteria durlandii*).

B. Objetivos específicos

1. Determinar las siguientes propiedades físicas de las maderas seleccionadas:
 - Peso específico
 - Contracción longitudinal
 - Contracción radial
 - Contracción tangencial
 - Contenido de humedad

2. Determinar las propiedades mecánicas al 12% de contenido de humedad de las maderas seleccionadas:
 - Flexión estática
 - Compresión paralela a la fibra
 - Compresión perpendicular a la fibra
 - Corte
 - Dureza

III. MARCO TEÓRICO

La madera, al contrario que otros materiales como el acero y el hormigón, es un producto de unas características que varían según un rango extraordinariamente amplio. La madera, como resultado del crecimiento de un ser vivo, adquiere una propiedad intrínseca a los seres animados: la diferenciación individual. Pero no solamente es cierto que cada árbol es distinto del resto, sino que aún dentro del mismo individuo las características de la madera varían con la posición en relación al eje y a la altura sobre el suelo (14).

A. Propiedades básicas de la madera

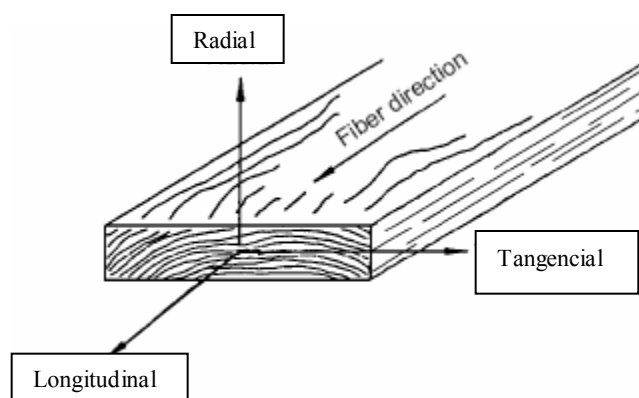
1. Anisotropía. La madera no es un material homogéneo, sino un material muy diferente según el plano o la dirección que se considere. Como resultado de esa desigual configuración, presenta un desigual comportamiento (14).

Para dar una idea de cómo se comporta, la madera resiste de entre 20 y 200 veces más en el sentido del eje del árbol, que en el sentido transversal del árbol (Vignote y Jiménez, 1996).

Este comportamiento tan desigual de la madera, hace obligado denominar de forma diferente, los planos y las direcciones que se consideren (14).

- Dirección axial: la del eje del árbol.
- Dirección radial: la dirección de los radios, perpendicular al eje del árbol.
- Dirección tangencial: la dirección tangencial al árbol, perpendicular al eje del árbol.

Figura 3.1. Ejes de la madera (7).



2. Higroscopicidad. La madera contiene huecos en el lumen celular, entre las microfibrillas y entre las fibrillas elementales (14).

El hueco del lumen celular es relativamente tan grande, que su fuerza capilar no es suficiente como para captar agua de la atmósfera, llenándose sólo de agua, cuando la madera se sumerge en ella (14).

Por el contrario, los huecos entre las microfibrillas y las fibrillas elementales son tan pequeños que originan fuerzas de Van der Waals, capilares y de adhesión superficial suficientes como para captar agua de la atmósfera que le rodea. Como, por otra parte, la atmósfera tiene una fuerza desecante, dependiente de la temperatura, humedad relativa y presión a la que se encuentra, es también capaz de captar agua de la pared celular de la madera. Dependiendo de la fuerza de uno y otro, la madera capta o cede agua. Esta propiedad de los cuerpos de establecer intercambio de humedad con el ambiente se denomina higroscopicidad (14).

Resumiendo, se puede establecer que el agua puede estar contenida en la madera en las siguientes formas:

- **Agua de sorción:** Es la que está retenida por fuerzas de tipo Van der Waals, consecuencia de los grupos polares activos de la pared celular. Esta agua es la que más fuertemente queda retenida por la pared celular. La madera puede llegar a contener un 8 % de peso de agua respecto del peso de la madera seca, como consecuencia de esta fuerza (14).
- **Agua de adsorción:** Es el agua que queda retenida en la pared celular como consecuencia de la fuerza de adhesión superficial. La madera puede llegar a contener hasta un 6 a un 8 % de peso de agua respecto del peso de la madera seca, debida a la adhesión superficial (14).
- **Agua de condensación o capilar:** Es la retenida por fuerzas capilares, provocadas por los espacios entre microfibrillas. La madera puede llegar a contener entre un 14 a un 16 % de peso de agua respecto del peso de la madera seca, en estos capilares (14).
- **Agua libre:** Es la contenida en el lumen de las células prosenquimatosas. Su fuerza de retención es muy pequeña, de forma que no puede captar agua de la atmósfera, solo puede introducirse si se produce una inmersión de la madera en agua (14).

3. **Polaridad.** La madera tiene carácter polar y por tanto tiene afinidad con los productos polares como puede ser el agua, los pegamentos de carácter polar, los barnices (14).

B. Propiedades físicas de la madera

1. **Características organolépticas.** Son aquellas que se determinan a través de la observación, la degustación y el olfato, con finalidad de identificación y reconocimiento, tanto en el campo como a la hora del aserrado y secado. A la madera se le puede determinar su olor, sabor, color, textura y grano (9).

a. **Olor.** Durante el corte de los árboles, su manejo y su aserrado, es posible detectar el olor que ésta pueda desprender. Este olor es producido por diferentes sustancias volátiles contenidas en las maderas. Para fines prácticos, el olor de la madera puede ser ausente o no distintivo, aromático o desagradable (2).

b. **Sabor.** Efecto que en el sentido del gusto, producen algunas sustancias contenidas en las células de la madera. De la misma manera que el olor, el sabor de la madera puede saberse si se degusta el aserrín de la misma. Debe tenerse mucho cuidado con aquellas que presenten olor desagradable, ya que puede

contener elementos tóxicos. El sabor puede definirse como ausente o no distintivo, amargo, dulce, salado o picante, aunque depende mucho del criterio del observador (2).

c. Color. Para la determinación del color, es necesario referirse a una escala específica, de tal forma que se eviten confusiones. El código Munsell bajo cada color en la tabla de colores, es una notación universal que describe el color. El primer conjunto de números y letras representa el Matiz (hue), que es la posición del color en la rueda de colores (Y = amarillo, R = rojo, G = verde, B = azul, YR = amarillo-rojo, RY = rojo-amarillo) (8).

El número que sigue es el Valor (value), que indica la claridad del color. El rango de valores va desde cero para negro puro hasta diez para blanco (8).

El último número se conoce como el Cromo (chroma) que describe la intensidad del color. Colores de valores pequeños de cromo se les dice colores débiles, mientras que a los de valores altos se les dice colores altamente saturados o fuertes. La escala comienza en cero para los colores neutrales pero no hay un final arbitrario para la escala (Ver figura 3.2) (8).

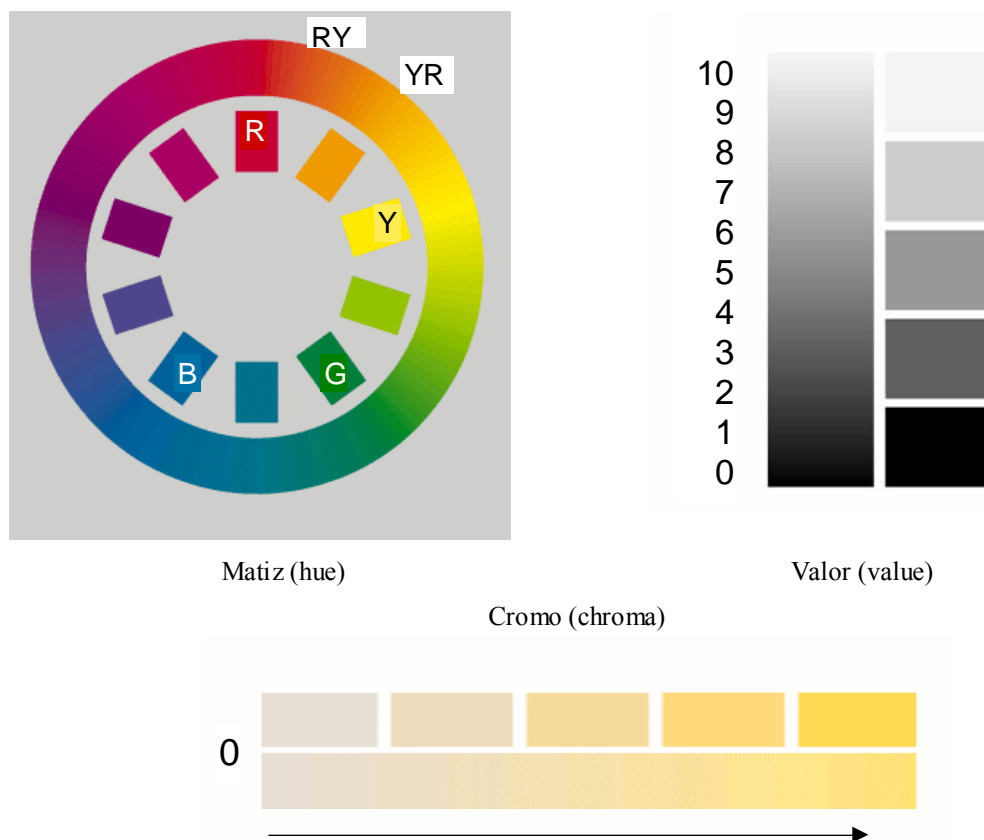
d. Grano. Es la dirección o alineamiento que tienen en un plano longitudinal leñoso sus elementos constitutivos, en especial los alargados verticalmente; como son las fibras y los vasos en las latifoliadas y las traqueidas en las coníferas. Este puede ser principalmente:

- Recto (derecho): cuando la dirección de los elementos es sensiblemente paralelo al eje del árbol.
- Oblicuo: cuando la dirección de los elementos se desvía de la dirección del eje del árbol, formando con él, ángulos agudos.
- Espiralado: cuando el hilo forma una espiral a través del eje (14).

e. Textura. Se refiere al tamaño de los elementos constitutivos del leño, especialmente los parenquimáticos, vasculares y fibrosos. Según Benítez y Montesinos (1988), la textura puede ser:

- Gruesa: elementos constitutivos amplios. Fibras con diámetro tangencial grande de más de 250 micras, radios leñosos grandes y parénquima grande.
- Fina: elementos constitutivos pequeños. Fibras menores de 150 micras de diámetro tangencial, parénquima escaso y abundante tejido fibroso.
- Mediana: término medio entre las dos anteriores.
- Homogénea uniforme: cuando los elementos constitutivos del leño sean grandes o pequeños, no presentan grandes variedades en todas las superficies longitudinales del leño.
- Heterogénea: cuando las variaciones entre los elementos constitutivos del leño son grandes (madera tardía y temprana diferenciada).

Figura 3.2. Escala Munsell (8).



2. **Contenido de humedad.** El contenido de humedad de la madera está definido como el peso de agua en la madera expresado en porcentaje del peso de la madera seca (7).

Se dice que una madera tiene una humedad del H% cuando, si la madera pesa P_0 cuando está seca, el peso del agua es $H * P/100$. Pudiéndose expresar de la siguiente manera:

$$H = \frac{P_H - P_0}{P_0} * 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

siendo: P_H : el peso de la madera al H% de humedad.

En los árboles, el contenido de humedad puede variar de un 30 hasta más de 200% del peso de la madera. En las maderas suaves, el contenido de albura es usualmente mayor que el contenido de duramen. En las maderas duras, la diferencia en el contenido de humedad entre la albura y el duramen depende de la especie. Estos valores son considerados típicos, pero existe una variación considerable entre árboles de la misma especie. Inclusive existe variabilidad en el contenido de humedad entre tablas individuales cortadas del mismo árbol (7).

El estudio tecnológico de las relaciones entre el agua y la madera, es seguramente, el más importante de todos los que dependen de este material, ya que la humedad de la madera influye de forma determinante en

la concepción de procesos tales como el aserrado, el desenrollo, el cepillado, el encolado, el barnizado, etc. Respecto del comportamiento, la humedad es un factor determinante en su durabilidad, en su resistencia, peso, y sobre todo en sus dimensiones (14).

Se denomina Humedad de Equilibrio Higroscópico (HEH), la humedad de la madera a la que se equilibran la fuerza desecante de esta con la de la atmósfera. También se puede definir como el porcentaje de humedad que alcanzaría una madera a lo largo del tiempo, sometida a unas ciertas condiciones de humedad y temperatura del medio ambiente (14).

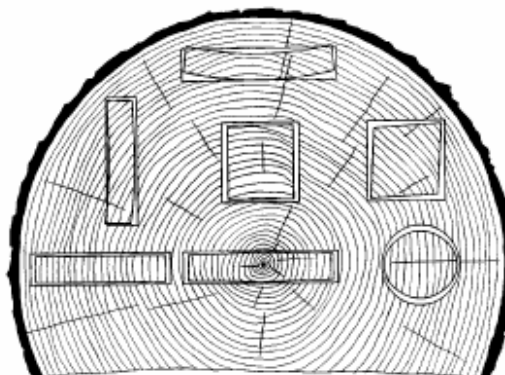
La HEH máxima que puede tener una madera, cuando se la expone a un ambiente saturado de humedad, es del 30%, ésta es la humedad que satura todos los huecos existentes entre las fibrillas elementales, entre las microfibrillas y entre las fibras que componen la pared celular. A este punto de humedad se le denomina punto de saturación de la fibra PSF (14).

3. **Contracción.** La madera es dimensionalmente estable cuando el contenido de humedad es más grande que el punto de saturación de la fibra. La madera cambia sus dimensiones mientras gana o pierde humedad por debajo de ese punto. Se contrae cuando pierde humedad de las paredes celulares y se hincha cuando gana humedad. Esta contracción e hinchazón pueden resultar en torceduras, rajaduras o aflojamiento de las manijas de las herramientas, boquetes en los pisos de madera, o problemas de funcionamiento que detraen de la utilidad del producto de madera. Por esto, es importante que estos fenómenos sean entendidos y considerados cuando puede afectar el resultado del producto en donde la madera es utilizada (7).

Con respecto a las características de la contracción, la madera es un material anisotrópico. Se contrae más en la dirección de los anillos de crecimiento (tangencialmente), alrededor de la mitad de este encogimiento se da a través de los anillos (radialmente), y sólo se encoge un poco a lo largo del grano (axialmente). Los efectos combinados de la contracción radial y tangencial pueden alterar la forma de la pieza de madera por la diferencia en la contracción y en la curvatura de los anillos anuales. Esto se puede observar en la Figura 3.3.

Figura 3.3. Contracción característica y distorsión de piezas planas, cuadradas y redondas afectadas por la dirección de los anillos de crecimiento. La contracción tangencial es el doble de la contracción radial

(7)



La contracción de la madera está afectada por un número de variables. En general, una contracción más grande está asociada con una mayor densidad. El tamaño y la forma de la pieza pueden afectar la contracción, así como la velocidad de secado para ciertas especies (7).

Por lo tanto al hacer referencia a contracciones, se ha tenido en cuenta la siguiente clasificación:

Cuadro 3.1. Clasificación de la madera según el tipo de contracción (2).

Clasificación	Radial	Tangencial	Volumétrica
Muy baja	0 – 2.0	0 – 3.5	0 – 5.5
Baja	2.1 – 3.0	3.6 – 5.0	5.6 – 8.0
Mediana	3.1 – 4.0	5.1 – 6.5	8.1 – 10.5
Alta	4.1 – 5.0	6.5 – 8.0	10.6 -13.0
Muy alta	> 5.1	> 8.1	> 13.1

4. Relación entre la contracción tangencial y radial (CT/CR). Es un índice de la estabilidad dimensional de la madera; al acercarse a uno, la madera es más estable y tiene buen comportamiento durante el secado. Tomando como base esta relación, las maderas pueden clasificarse de acuerdo a la siguiente tabla:

Cuadro 3.2. Clasificación de la madera según relación CT / CR utilizada por Arostegui et al. (3).

Clasificación	Relación (CT/CR)
Maderas estables no se agrietan ni deforman.	De 1 a 1.5
Estables, muy pocas grietas (muy leve atención al secado).	De 1.51 a 2
Moderadamente estables, pocas grietas y deformaciones (leve atención al secado).	De 2.1 a 2.5
Inestable, presencia de grietas (atención al secado).	De 2.51 a 3
Muy inestable, fuertes grietas y deformaciones (secado cuidadoso).	Mayor de 3

5. Densidad (ρ). Es la relación entre el peso P y el volumen V de una madera

$$\rho = P/V \quad (\text{Ec. 2})$$

Como el peso y el volumen de una madera está afectado por el porcentaje de humedad, al hablar de densidad se debe siempre determinar la humedad a la que está hecha la medida, es decir, que se debe hablar

de densidad de la madera a una determinada humedad como puede ser el 0% (densidad anhidra), del 12% (humedad normal) o a otra humedad de la madera (14).

$$\rho_h = P_h/V_h \quad (\text{Ec. 3})$$

El peso específico normal de la madera es muy variable según especies. Así, existen maderas que apenas tienen una densidad de 0.2 gr/cm³ (madera de balsa) a maderas de 1.4 gr/cc (madera de quebracho, o madera de palo de hierro). La máxima densidad teórica que puede tener una madera es de 1.54 gr/cc, dado que ésta es la densidad de la pared celular (14).

A pesar de las grandes variaciones de densidad, se puede calificar a la madera como un material ligero, si se la compara con otros materiales, tales como el hormigón (2.2 gr/cc) o el acero (7.8 gr/cc) (14).

Se denomina densidad específica de una madera, a la relación entre el peso seco P₀ de la madera y el volumen V_v de la madera cuando ésta tiene una humedad superior al punto de saturación de la fibra (14).

$$\rho_e = P_0/V_v \quad (\text{Ec. 4})$$

Además de la importancia que tiene en sí, el peso específico, la densidad es una propiedad física importante porque es un índice muy bueno de todas las propiedades de la madera (14).

Maderas ligeras, son maderas de tonos claros, blandas, poco resistentes pero elásticas, poco durables, muy fáciles de trabajar, con tacto vasto (14).

Maderas pesadas, son maderas oscuras, duras, muy resistentes pero frágiles, muy durables, difíciles de trabajar, con tacto muy fino (14).

Utilizando el peso específico, las maderas pueden clasificarse de acuerdo al siguiente cuadro:

Cuadro 3.3. Clasificación de la madera según su peso específico (2).

Peso específico (gr/cm³)	Clasificación
Menor de 0.20	Extremadamente liviana
De 0.20 a 0.25	Excesivamente liviana
De 0.25 a 30	Muy liviana
De 0.30 a 0.36	Liviana
De 0.36 a 0.42	Moderadamente liviana
De 0.42 a 0.50	Moderadamente pesada
De 0.50 a 0.60	Pesada
De 0.60 a 0.72	Muy pesada
De 0.72 a 0.86	Excesivamente pesada
Mayor de 0.86	Extremadamente pesada

6. Posibles usos de la madera según propiedades físicas.

a. Estructuras

- Peso seco de 0.4 a 0.8 gr/cm³.
- Contracción volumétrica menor del 12%.
- Relación CT/CR igual o menor de 2.0.
- Resistente al ataque de hongos e insectos o fácil de tratar.

b. Encofrados. Moldes o revestimientos de madera en que se hace el vaciado de las piezas de cemento armado, capaz de soportar con total seguridad todas las cargas verticales y los esfuerzos horizontales.

- Peso seco de 0.4 a 0.6 gr./cm³.
- Contracción volumétrica igual o menor de 1.6%.
- Baja absorción de humedad.
- Adecuada resistencia mecánica.
- Trabajabilidad fácil.

c. Carpintería de obra

- Comportamiento bueno al trabajo con máquinas de carpintería.
- Estabilidad dimensional.
- Contracción volumétrica igual o menor del 12%.
- Relación CT/CR igual o menor de 2.0.
- Apariencia buena.
- Liviana a moderadamente pesada.
- Textura media a fina y uniforme.

d. Pisos

- Peso seco igual o mayor de 0.7 gr./cm³.
- Contracción volumétrica del 10% al 15%.
- Buena apariencia.

e. Mangos de herramientas, artículos deportivos

- Peso específico al 12% de humedad de 0.55 a 0.65 gr./cm³.
- Grano recto.
- Buena apariencia.
- Fácil de trabajar mecánicamente.

1. **Propiedades elásticas.** La madera sometida a cargas tiene un comportamiento denominado visco-elástico. Ante una cierta carga inferior al límite elástico, se deforma, perdiendo la deformación cuando cesa la carga (14).

Las diferentes características de comportamiento que presenta la madera respecto de cualquier otro tipo de material elástico son las siguientes:

- La deformación ante una cierta carga, aumenta con el tiempo. Es decir, si cargamos una madera con 10 kg durante unos instantes, la deformación que presenta es del orden de 2.5 veces menos que si la carga se mantiene durante varios años (14).
- El valor de la deformación en el estado plástico, es muy elevado respecto de cualquier otro material. Es decir, la madera es muy deformable (14).

Figura 3.5. Diagrama carga-deformación (14)



2. **Módulo de elasticidad (ley de Hooke).** La ley de Hooke establece que el esfuerzo unitario en un material es proporcional a la deformación unitaria que le acompaña, siempre que dicho esfuerzo no exceda de un cierto valor. Si, por ejemplo, el esfuerzo unitario es duplicado o triplicado, la deformación unitaria acompañante también se duplica o se triplica. Esta ley no es más que un enunciado del hecho experimentalmente determinado de que la primera parte de la gráfica deformación-esfuerzo (Figura 3.4) es una línea recta. La ley puede ser expresada matemáticamente como sigue:

$$\delta/\varepsilon = \text{una constante.} \quad (\text{Ec. 5})$$

Se ha encontrado experimentalmente que los materiales usados en la mayor parte de los miembros sometidos a cargas, trabajan elásticamente solamente para los esfuerzos correspondientes a la porción recta del diagrama de deformación-esfuerzo, y por esto, se dice frecuentemente que la ley de Hooke se aplica

únicamente al intervalo elástico del material. Pero en dicho intervalo elástico se aplica a esfuerzos y deformaciones de compresión, de tracción y cortantes (11).

El módulo de elasticidad de un material se define por el valor numérico de la relación constante para dicho material del esfuerzo unitario a la deformación unitaria que le acompaña. Así, se designa por el símbolo E, puede definirse por la expresión:

$$E = \delta/\epsilon \quad (\text{Ec. 6})$$

en donde δ es el esfuerzo unitario de tensión y está dado por la siguiente fórmula:

$$\delta = P/a \quad (\text{Ec. 7})$$

donde P = carga (lbs), a = área (pulg) y ϵ es la deformación unitaria y está dada por la siguiente fórmula:

$$\epsilon = e/l \quad (\text{Ec. 8})$$

donde e = deformación (pulg) y l = longitud (pulg)

3. **Módulo de ruptura.** Por observación de la Figura 3.4, es evidente que con un esfuerzo unitario dado en la fibra exterior de la viga, el momento resistente es mayor cuando el esfuerzo unitario varía que lo que sería si el esfuerzo unitario variara en razón directa de la distancia al eje neutro. Por lo tanto, el momento resistente en una viga, cuando es esforzada más allá del límite de proporcionalidad, es mayor que el hallado por medio de la fórmula SI/c al sustituir S por el esfuerzo unitario dado. En consecuencia, si en la fórmula de flexión $M=sI/c$, se sustituye por la resistencia a la ruptura del material, el valor resultante de M será menor que el momento máximo que puede resistir la viga (11).

Las pruebas efectuadas con vigas de diversos materiales han demostrado que el momento flexionante máximo que puede resistir una viga, puede ser del 20 al 100% mayor (dependiendo del material y de la forma de las secciones transversales) que el valor de M hallado por medio de la fórmula de flexión al sustituir s por la resistencia máxima del material (11).

El valor de s hallado por medio de la fórmula de flexión, sustituyendo M por el valor del máximo momento flexionante que resiste una viga al ser probada a la ruptura, se llama módulo de ruptura del material a la flexión. Así, lo representaremos por s_r , tenemos

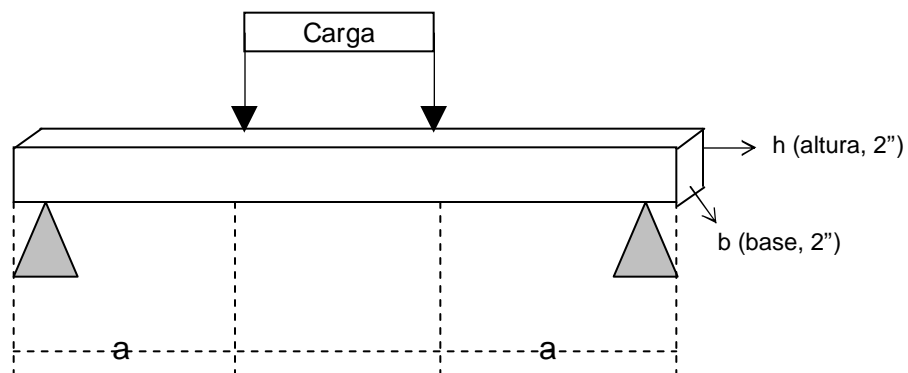
$$s_r = M_{\text{máx.}} c/I \quad (\text{Ec. 9})$$

donde M = momento flexionante y I = momento de inercia de la sección transversal (11).

4. **Flexión estática.** El diagrama que se muestra en la Figura 3.4, comienza con una línea recta que va del origen A al punto C, lo que significa que la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria en esta región, es lineal y proporcional (su razón permanece constante). Más allá del punto C, la proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación ya no existe; por esto, el esfuerzo en C se llama *límite proporcional*. La pendiente de la línea recta AC se llama módulo de elasticidad (13).

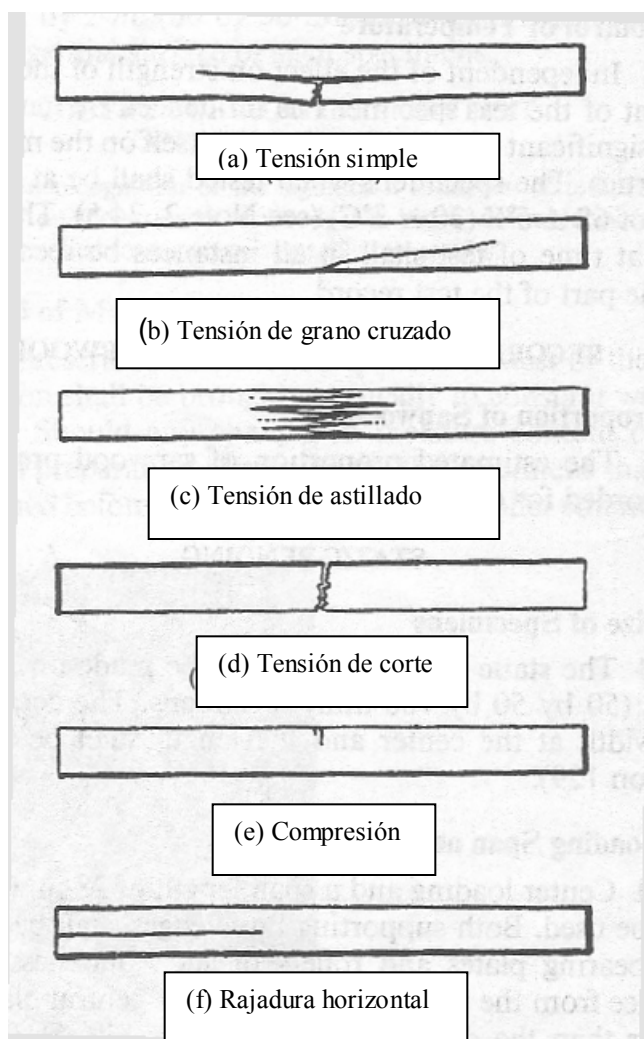
Las fallas serán clasificadas según la Figura 3.6.

Figura 3.6. Diagrama del ensayo de flexión (13).



5. Compresión paralela a la fibra. El objetivo de este ensayo es la determinación de la resistencia y rigidez a compresión paralelo a la fibra de la madera de un lote considerado homogéneo (Gómez, 2005).

Figura 3.7. Posibles fallas de la flexión estática



La resistencia a la compresión paralela a la fibra (fc_0) está dada por la máxima tensión de compresión que puede actuar en un cuerpo de prueba con sección transversal cuadrada de 2 pulgadas de lado y 8 pulgadas de altura, y está dada por la siguiente expresión:

$$fc_0 = \frac{Fc_{0\text{máx}}}{A} \quad (\text{Ec. 10})$$

donde: $Fc_{0\text{máx}}$ = máxima fuerza de compresión aplicada durante el ensayo
 A = área inicial de la sección comprimida
 fc_0 = resistencia a la compresión paralelo a la fibra

El valor característico de resistencia a compresión paralelo a la fibra deberá ser determinado con las expresiones que nos provee la estadística (Gómez, 2005).

La rigidez de la madera en la dirección paralela a la fibra debe ser determinada por su módulo de elasticidad, obtenido en el tramo lineal del diagrama tensión-deformación específica, como lo indica la Figura 3.4. (Gómez, 2005).

Las fallas serán clasificadas según la Figura 3.8.

Figura 3.8. Diagrama del ensayo de compresión paralela a la fibra (9).

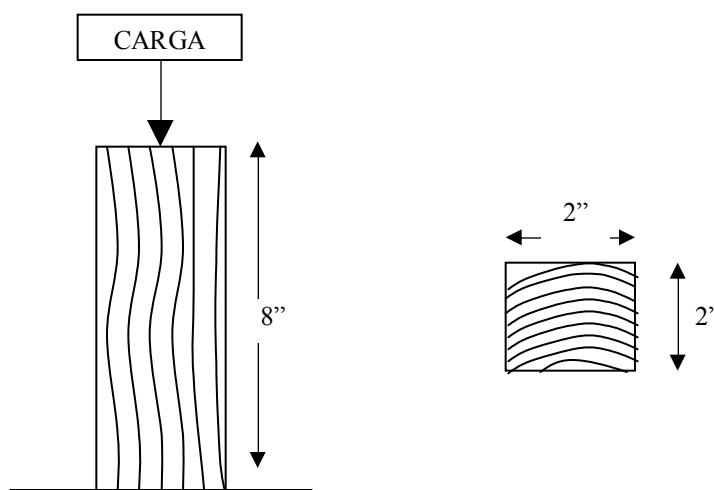
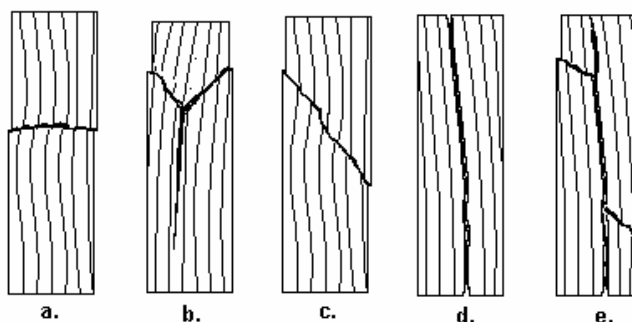


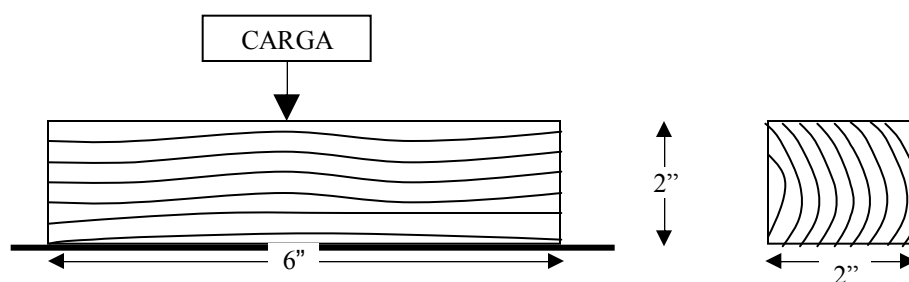
Figura 3.9. Tipos de falla en la madera bajo compresión paralela a la fibra (1)



- Aplastamiento (plano de ruptura aproximadamente horizontal).
- Grieta cuneiforme (nótese la dirección de la rajadura: radial o tangencial).
- Corte (plano de ruptura en ángulo agudo con la horizontal).
- Rajadura.
- Corte y rajadura paralelos a la fibra (usualmente ocurre en piezas de fibras transversales).

6. **Compresión perpendicular a la fibra.** El método se basa en aplicar sobre una cara tangencial radial de la probeta, una carga continua de dirección perpendicular a dicha cara, midiendo las deformaciones producidas por la aplicación de la carga hasta llegar al punto de falla de la probeta o en su defecto hasta una deformación máxima de 2,5 mm (12).

Figura 3.10. Diagrama del ensayo de compresión perpendicular a la fibra (9).



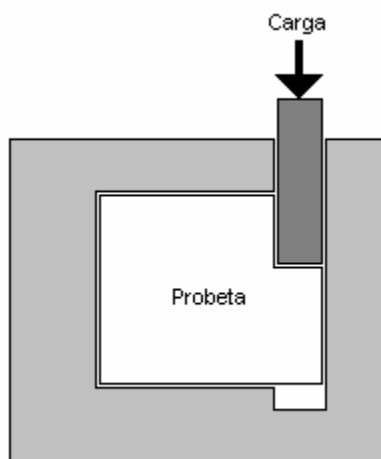
7. **Prueba de corte.** Un esfuerzo de corte es aquel que actúa paralelamente a un plano, para distinguirlo de los esfuerzos tensivos y comprensivos que actúan normalmente a un plano. Las cargas que producen las condiciones de corte de interés principal en el ensayo de materiales son las siguientes:

- Las resultantes de fuerzas paralelas, pero opuestas, actúan a través de los centroides de secciones espaciadas a distancias infinitesimales entre sí. Es concebible, en tales casos, que los esfuerzos de corte sobre las secciones sean uniformes y exista un estado de corte directo puro. Es posible acercarse a esta condición, pero nunca alcanzarla prácticamente (6)
- Las fuerzas opuestas aplicadas son paralelas, actúan normalmente a un eje longitudinal del cuerpo, pero están espaciadas a distancias finitas entre sí. Entonces, además de los esfuerzos cortantes producidos, se establecen esfuerzos flexionantes, En el caso de una viga rectangular sometida a cargas transversales, los esfuerzos cortantes sobre cualquier sección transversal varían en intensidad desde cero en las superficies superiores e inferiores de la viga hasta un máximo en el eje neutro (6).
- Las fuerzas aplicadas son paralelas y opuestas, pero no yacen en un plano que contenga el eje longitudinal del cuerpo; aquí se establece un par que produce una torsión alrededor de un eje longitudinal (6).

Para ensayos de esfuerzo directo de la madera, una herramienta y una probeta especiales desarrollados por el Forest Products Laboratory se usan como se muestra en la Figura 3.10. La falla tiende a ocurrir a lo largo del plano de corte (6).

En el ensayo de corte directo, el dispositivo de ensayo debe sujetar la probeta firmemente y conservar la buena alineación, y la carga debe aplicarse uniformemente en forma perpendicular al eje de la pieza. En esta prueba, el único valor crítico que puede observarse es la carga máxima P . Si A es el área sometida a la fuerza, entonces la resistencia promedio al corte es tomada simplemente como P/A (6).

Figura 3.11. Probeta y herramienta para el ensayo de corte desarrollada por el Forest Products Laboratory (6).



8. Prueba de dureza. Es una propiedad que indica la facilidad de penetración de un material en otro. La madera, en relación con otros materiales (acero y hormigón), se puede definir como blanda, que aunque en algunos aspectos se puede considerar un defecto (facilidad de rayado y por tanto pérdida de apariencia de la superficie) tiene como ventaja, su facilidad de procesado (corte, unión) (14).

D. Análisis estadístico para pruebas físicas y mecánicas de la madera.

Prácticamente, todos los datos derivados de los ensayos son susceptibles de variar. Los resultados de un ensayo sobre una muestra simple involucran mediciones sujetas a la variación. Los resultados de un ensayo sobre una serie de muestras similares, muestran variación entre éstas (6).

Por esta razón, una vez efectuados los ensayos a que se ha hecho referencia anteriormente, se procede a llevar a cabo la evaluación de los siguientes parámetros estadísticos para cada especie y para cada ensayo en particular:

- Se determina la media aritmética (\bar{X}), esto de acuerdo a los resultados obtenidos en cada una de las probetas. La media aritmética es la más extensamente usada de todos los criterios de tendencia central. Constituye el promedio del lenguaje ordinario. Es un promedio calculado y es afectado por cada valor pero muy distorsionado por los inusualmente altos valores de los extremos (6).
- Luego se calcula la desviación estándar, S , a través de la siguiente fórmula:

$$S = \frac{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{n(n-1)} \quad (\text{Ec. 11})$$

Esta es la medida de dispersión más usada y constituye un arreglo especial de la desviación promedio. Los estudios de estadística han demostrado que cuando el número de piezas es pequeño (menor de 25), es más cercanamente correcto dividir por el número de grados de libertad $(n - 1)$, en lugar del número total de valores n (6).

- Como las comparaciones significativas de las dispersiones no pueden hacerse utilizando mediciones absolutas, una variación expresada como una relación o porcentaje debe determinarse. Por lo común, la que más se usa es la desviación estándar con base en un porcentaje y es usualmente designado v , el coeficiente de variación (6). Finalmente, se calcula este valor, que viene dado de dividir la desviación estándar dentro del promedio aritmético, así:

$$v = S/X \quad (\text{Ec. 12})$$

donde S es la desviación estándar y X el promedio aritmético.

Debe advertirse que cuando la media aritmética es muy pequeña, o inclusive cero, como podría ser en el caso de mediciones de temperaturas, la v resultante sería muy engañosa (6).

E. Determinación de esfuerzos básicos

Los esfuerzos básicos representan la resistencia permisible de la madera en piezas libres de defectos y sanas. Se calculan multiplicando los valores de esfuerzos de resultados de ensayos por factores de corrección que toman en cuenta:

- La variabilidad de la resistencia de la madera;
- La disminución de la resistencia de la madera por efecto de carga permanente durante un período largo de tiempo;
- Grado de razonamiento de la madera analizada; y
- Factor de seguridad que toma en cuenta la posibilidad de sobrecargas accidentales y la influencia de otros factores no previstos (5).

Se reconoce que algunos esfuerzos, principalmente los de compresión paralela y flexión, se incrementan al secar la madera (ensayos de piezas pequeñas), pero no es recomendable incrementar los esfuerzos básicos para madera seca (piezas mayores de 10 cm. de grosor) porque se considera que buena parte de la madera utilizada en construcción, se coloca verde o poco sazónada y aunque se pusiera seca antes de utilizarla, la pérdida de humedad va acompañada de agrietamientos y combamiento, defectos que contrarrestan el incremento de resistencia debido al secado (5).

El procedimiento para calcular los factores de corrección, utilizados para los esfuerzos básicos es:

1. Factor de corrección por variabilidad

$$V = 1 - C(v/100) \quad (\text{Ec. 13})$$

donde V = factor de corrección por variabilidad de resultados.

v = coeficiente de variación en %

C = coeficiente con valor de 1.0 a 1.5 dependiendo de la dispersión de los valores observados y la forma de su distribución. En este estudio se tomó como 1 (5).

2. Corrección de esfuerzos por disminución de la resistencia de la madera sujeta a cargas estáticas por largo tiempo. Observaciones realizadas en otros países han señalado que la resistencia de la madera sujeta a cargas durante períodos largos de tiempo, sufre una disminución que llega hasta el 40% de su resistencia inicial, por lo que se ha adoptado un factor de corrección con un valor de 2/3.

$$T = 0.67$$

donde T = factor de corrección por disminución de resistencia de la madera sujeta a cargas permanentes por largos períodos de tiempo (5).

3. Factor de corrección por grado de sazónamiento de la madera. Los incrementos de resistencia son detectados al disminuir la humedad en la madera, bajo su punto de saturación de las fibras. El límite de saturación es del 30% de humedad aproximadamente. Debido a los factores de compensación que existen entre la resistencia de madera verde y resistencia de madera seca, que hacen sus resistencias bastante similares para maderas cuyo contenido de humedad sea mayor o igual al 30%, el factor de corrección por grado de sazónamiento es igual a 1. Para cada especie debe calcularse según su contenido de humedad (5).

4. Factor de seguridad. En esta forma se intenta cubrir el efecto de otros factores que afectan las propiedades mecánicas y que no pueden evaluarse; así como también el riesgo de sobre cargas accidentales no previstas. El factor de seguridad (S) debe ser $\frac{1}{2}$ para efectos conservadores.

5. Resumen de corrección para obtener los esfuerzos básicos.

$$\text{Esfuerzo básico} = (X)(V)(T)(S)(H) \quad (\text{Ec. 14})$$

$$\text{Esfuerzo básico} = (X)(V)(0.67)(0.5)(H) \quad (\text{Ec. 15})$$

$$\text{Esfuerzo básico} = (X)(V)(H)(0.335) \quad (\text{Ec. 16})$$

donde X = promedio aritmético de los resultados de ensayo

V = corrección por variabilidad

T = corrección por disminución de resistencia en madera cargada por largo tiempo = 0.67

S = factor de seguridad = 0.5

H = corrección para adaptar los esfuerzos básicos corregidos según el contenido de humedad (5).

F. Posibles usos según las propiedades mecánicas

En general, para todas las aplicaciones mecánicas de la madera interesa que el cociente entre las características mecánicas y el peso específico sea lo más elevado posible, sobre todo en aquellos usos en los que la madera actúa como estructura resistente (14).

En general, se exige gran resistencia mecánica en los siguientes casos:

Cuadro 3.4. Requerimientos de resistencia de acuerdo al uso de la madera (14).

Muebles:	Resistencia a la flexión estática y módulo de elasticidad. Resistencia a la compresión paralela a las fibras. Resistencia a la tracción perpendicular a la fibra. Resistencia a la hienda.
Construcción:	Resistencia a la flexión y módulo de elasticidad. Resistencia a la compresión paralela y perpendicular a las fibras. Resistencia a la tracción perpendicular a la fibra, (caso de madera laminada). Esfuerzo cortante. Resistencia a la hienda, (caso de construcción clavada).
Envases y paletas:	Resistencia a la flexión dinámica.
Traviesas:	Resistencia a la compresión perpendicular a la fibra. Resistencia a la hienda. Resistencia al arranque de tornillos.
Postes:	Resistencia a la flexión estática.
Apeas:	Resistencia a la compresión axial. Módulo de elasticidad.

G. Características botánicas de las especies a trabajar

1. Danto (*Vatairea lundellii*). Árbol de la familia Fabaceae de hasta 40 m de altura y DAP de hasta 1 m con el tronco muy derecho, con contrafuertes delgados y bien desarrollados, ramas ascendentes y copa redondeada y densa. Forma parte del estrato superior de selvas altas y medianas perennifolias y subperennifolias, principalmente en suelos derivados de materiales calizos (10).

La albura de esta madera es de color crema amarillento a ligeramente pardo, con vasos grandes y abundante parénquima vasicéntrico, aliforme y confluyente; generalmente hay menos fibras que parénquima. No se conocen usos industriales de esta especie (10).

2. Guacibán (*Pithecelobium leucocalyx*). Árbol de la familia Mimosaceae de hasta 40 m de altura y DAP de hasta 1.2 m, tronco derecho con las ramas horizontales y ascendentes, copa redondeada o

irregular. Forma parte del estrato superior de selvas altas perennifolias y subperennifolias, en suelos aluviales o derivados de materiales calcáreos (10).

La albura de esta madera es de color crema amarillento con vasos grandes y parénquima vasicéntrico. Su madera puede ser muy buena para la construcción de parquet, lambrín y duelas o tablas (10).

3. Luin hembra (*Ampelocera hottlei*). Árbol de la familia Ulmaceae de hasta 30 m de altura y DAP de hasta 60 cm, con el tronco muy recto limpio, con pequeños contrafuertes en la base; ramas ascendentes situadas en la parte superior del tronco; copa irregular. Forma parte del estrato medio de selvas altas perennifolias y subperennifolias y medianas subperennifolias y subcaducifolias (10).

La albura de esta madera es amarillenta, sin estructuras conspicuas. Por el tipo de conformación de su tronco y por la durabilidad de la madera, se usa mucho para la fabricación de durmientes de ferrocarril (10).

4. Granadilla (*Dalbergia stevensonii*). Árbol de la familia Fabaceae de hasta 30 m de altura y DAP de hasta 1 m, con el tronco recto y decorado por zanjas, se bifurca después de los 8 m (10).

Madera dura, la cual se usa para la fabricación de instrumentos musicales como la marimba, pianos, guitarras (10).

5. Zapotillo (*Pouteria durlandii*). Árbol de la familia Sapotaceae de hasta 20 m de altura y DAP de hasta 40 cm., tronco derecho a veces con pequeños contrafuertes; ramas ascendentes, copa piramidal densa. Esta especie se desarrolla en suelos derivados de material calizo, formando parte de selvas altas perennifolias en suelos profundos y bien drenados o en selvas medianas subperennifolias con suelos someros de drenaje muy rápido (10).

La madera posee una albura de color pardo amarillento; con una lupa se observan abundantes bandas muy finas de parénquima paratraqueal. Posee madera dura. Su madera se emplea en construcciones rurales y para fabricar postes de carros de ferrocarril (10).

IV. METODOLOGÍA

A. Priorización de especies forestales a estudiar

Con el fin de darle un mejor aprovechamiento a la gran diversidad de especies presentes en Guatemala, es necesario tener conocimiento de las características de cada una de éstas. Con este objeto se escogieron cinco especies forestales que no cuentan con estudios documentados de propiedades físicas y mecánicas. Dichas especies son: Danto (*Vatairea lundellii*), Guacibán (*Pithecelobium leucocalyx*), Luin hembra (*Ampelocera hottlei*), Granadilla (*Dalbergia stevensonii*) y Zapotillo (*Pouteria durlandii*).

B. Lugar de recolección

El material de estudio se colectó en el Parcelamiento El Manantial del Municipio de Sayaxché, Departamento de Petén. Esta área se encuentra bajo la zona de vida bosque muy húmedo sub-tropical cálida (bmh-S (c)). Dicha zona se caracteriza por tener una precipitación mínima de 1500 y máxima de 2066 mm., dando una precipitación media de 750 mm. anual, con una temperatura mínima de 21°C y máxima de 25°C, y la evapotranspiración potencial puede estimarse en promedio 0.45.

C. Recolección de las muestras.

1. **Identificación de las muestras.** Para la identificación de las especies, se realizó una gira de campo en la cual se contó con la colaboración de un baquiano conocedor del lugar quien ayudó a ubicar las especies y a identificarlas de acuerdo a su nombre común. Para confirmar la identificación, se colectaron muestras de hojas para su posterior identificación en el herbario de la Universidad del Valle de Guatemala.

2. **Selección y cantidad de árboles.** Se escogieron cinco árboles por especie al azar, los cuales fueron seleccionados de acuerdo a los siguientes criterios: respetar un radio de 100 metros entre árbol y árbol; presentar características fitosanitarias buenas, tener el tronco recto, lo más cilíndrico posible; y ser representativo de la especie tanto en altura como en diámetro. Se utilizó una muestra de cinco árboles ya que según Valdez (1988), este número es necesario para obtener un 15% de precisión del valor promedio dándole validez a los resultados obtenidos.

Las muestras fueron extraídas de un aprovechamiento que ya poseía licencia de extracción por parte del INAB.

3. **Marcado y corte de los árboles.** Los árboles escogidos de acuerdo con lo planteado anteriormente fueron marcados con su respectivo número arábico (1-5) e inicial del nombre común de la especie. Las letras utilizadas fueron: Danto (D), Guacibán (G), Luin (L), Granadilla (R) y Zapotillo (Z).

Las marcas fueron realizadas con una pintura acrílica en spray color rojo, con el objeto de que cada troza fuera debidamente identificada para evitar confusiones y facilitar su manejo.

Para este procedimiento fue necesario contar con la debida licencia forestal, llenando todos los requisitos de ley. Luego se procedió a la tala de los árboles y a la extracción de las trozas. Para el corte de los árboles fue contratado un motosierrista con su respectivo ayudante.

4. **Aserrado del material.** Las trozas fueron transportadas a un aserradero de la localidad en donde la madera fue transformada para obtener piezas de 2 x 2” variando únicamente en el largo. El detalle de las medidas se presenta en el Cuadro 4.1. En este proceso se tuvo cuidado de seleccionar solo las piezas libre de defectos (nudos, rajaduras, etc.) ya que éstos podrían alterar los resultados.

Terminado el proceso de aserrado, se procedió a transportar las piezas hacia la Universidad del Valle donde fueron conducidas las pruebas.

Cuadro 4.1. Medidas de las piezas a utilizar en las diferentes pruebas

Prueba	Medidas (pulg.)
Peso específico	2 X 2 X 2
Humedad	2 X 2 X 2
Contracción volumétrica	2 X 2 X 2
Módulo de elasticidad	2 X 2 X 30
Módulo de ruptura	2 X 2 X 30
Compresión paralela a la fibra	2 X 2 X 8
Compresión perpendicular a la fibra	2 X 2 X 6
Corte	Ver figura 3.7

Es necesario tomar en cuenta que aunque las medidas establecidas por la ASTM para las propiedades físicas son 2 x 2 x 6”, éstas tuvieron que cambiarse a 2 x 2 x 2” ya que dichas medidas no podían ser manejadas por el horno con el que se contaba.

D. Determinación de las propiedades físicas

1. **Características organolépticas.** Las características organolépticas se determinaron mediante la consideración de ciertos parámetros que se expresan a continuación para cada prueba:

- Olor: ausente o no distintivo, aromático, desagradable.
- Sabor: ausente o no distintivo, amargo, dulce, picante.
- Color: en el laboratorio, se utilizó la escala Munsell para determinar el color específico de la madera y no dar lugar a interpretaciones dadas al criterio del observador.

- Grano: recto, oblicuo, entrecruzado o espiralado.
- Textura: gruesa, fina, mediana; homogénea uniforme o heterogénea.

Para determinar el olor y el sabor de las muestras, se utilizó el aserrín de cada muestra producido al efectuar los cortes, mientras que para determinar el grano, color y textura de las maderas, se procedió a analizar las piezas de madera sólida.

2. **Peso específico.** Para determinar el peso específico de las maderas se utilizaron 10 probetas de 2 x 2 x 2" por especie. Dichas probetas fueron medidas individualmente utilizando un vernier digital marca Stainless Hardened, modelo Scala 230.203, con una precisión de 0.001 mm y posteriormente fueron pesadas en una balanza electrónica marca Sartorius modelo 2354, con capacidad máxima de 1000 gr y una precisión de 0.01 g.

Para determinar el peso específico fueron necesarios tres días para realizar las pruebas:

- Día 1: En el primer día se procedió a identificar la especie a la que pertenecía cada probeta con ayuda de un marcador permanente, con el cual se marcó la primera inicial en mayúscula de la especie a la que pertenecía así como el número correlativo de probeta que le correspondía (Ej.: Probeta de Granadilla No. 1 = G1). Posteriormente se identificó y marcó cada una de las caras de las probetas, éstas fueron identificadas con la primera inicial minúscula: (axial (a), radial (r), tangencial (t)).

Una vez identificadas las especies y las caras, se procedió a medir cada una de éstas (axial, radial y tangencial) con ayuda del vernier digital, seguido de la toma de peso en la balanza analítica, con el objeto de obtener la volumetría y el peso en verde respectivamente, datos con los cuales se puede determinar el peso aparente (Wg) según la siguiente fórmula:

$$Wg = \frac{\text{Peso en estado original de humedad}}{\text{Volumen en estado original de humedad}} \quad (\text{Ec. 17})$$

Terminado esto se introdujeron las muestras dentro del horno teniendo cuidado de dejar cierta separación entre probetas para facilitar que el aire circulara entre ellas permitiendo que se secan uniformemente. El proceso de secado se realizó durante 24 horas a una temperatura constante de 100° C.

- Día 2: Concluidas las 24 horas de secado se procedió a medir y a pesar las probetas de la misma manera que el día anterior; con estos nuevos datos fue posible determinar el peso anhidro o peso seco (G_o) y el peso específico verde (G_g) según las siguientes fórmulas:

$$G_o = \frac{\text{Peso en estado seco}}{\text{Volumen en estado seco}} \quad (\text{Ec. 18})$$

$$G_g = \frac{\text{Peso en estado seco}}{\text{Volumen en estado verde}} \quad (\text{Ec. 19})$$

Posteriormente se sumergieron en agua durante 24 horas con el objeto de saturar las muestras.

- Día 3: Las muestras fueron retiradas del agua y limpiadas para retirar el exceso de agua superficial que no fue absorbida. Paso siguiente se midieron y pesaron de la misma forma que los días anteriores.

Con los datos obtenidos de las muestras en saturación de la fibra y con los datos de peso anhidro, fue posible realizar modelos de regresión lineal con los cuales fue posible determinar el peso y el volumen a una humedad del 12%. A partir de los datos generados, se pudo establecer el peso específico seco al aire (G_a) y el peso unitario al 12% ($W_{12\%}$).

$$G_a = \frac{\text{Peso en estado seco}}{\text{Volumen al 12\%}} \quad (\text{Ec. 20})$$

$$W_{12\%} = \frac{\text{Peso al 12\% de humedad}}{\text{Volumen al 12\% de humedad}} \quad (\text{Ec. 21})$$

Estos datos obtenidos finalmente permiten comparar el peso específico bajo estándares internacionales en los cuales se utiliza la humedad al 12% como constante para realizar todo tipo de pruebas.

3. Contenido de humedad. El contenido de humedad se determinó a partir de los pesos obtenidos en los días 1 y 2 en la prueba para determinar el peso específico utilizando la ecuación No. 1.

4. Contracciones. Las contracciones axial, radial y tangencial fueron determinadas a partir de las medidas obtenidas en los días 1 y 2 utilizando las siguientes fórmulas:

a. Contracción radial:

$$C_r = \frac{\text{dimensión radial en verde} - \text{dimensión radial en seco} \times 100\%}{\text{dimensión radial en verde}} \quad (\text{Ec. 22})$$

b. Contracción tangencial:

$$C_t = \frac{\text{dimensión tan en verde} - \text{dimensión tan en seco} \times 100\%}{\text{dimensión tan en verde}} \quad (\text{Ec. 23})$$

c. Contracción axial:

$$C_a = \frac{\text{dimensión axial en verde} - \text{dimensión en seco} \times 100\%}{\text{dimensión en verde}} \quad (\text{Ec. 24})$$

E. Determinación de propiedades mecánicas

1. Compresión paralela a la fibra. Para esta prueba se utilizaron seis probetas de dimensiones de 2" x 2" x 8" (5 cm x 5 cm x 20 cm) a las cuales se les aplicó una carga en la cara axial hasta que la pieza alcanzara el momento de la falla, momento en el cual se anotó la carga (lbs) y forma de la falla para ser clasificada según la figura 3.9. Con el resultado obtenido se determinó el esfuerzo unitario (δ) utilizando la ecuación No. 10.

Para la aplicación de la carga, se utilizó la compresora hidráulica marca Versa Tester Soiltest, Número de Serie 153.

En esta prueba también se midió la deformación a una de las probetas por especie con ayuda de un deformímetro marca Soiltest 1C-8 con una carrera de 1 pulgada. Con dicho resultado se obtiene la deformación unitaria (ϵ) utilizando la ecuación No. 8.

Utilizando los datos de esfuerzo unitario y deformación unitaria, se obtuvo el módulo de elasticidad utilizando la ecuación No. 6.

2. **Compresión perpendicular a la fibra.** Para esta prueba se utilizaron seis probetas por especie de dimensiones de 2" x 2" x 6" (5 cm x 5 cm x 15 cm) a las cuales se les aplicó una carga en la cara radial hasta que la pieza alcanzara el momento de la falla, momento en el cual se anotó la carga (lbs). Con dicho resultado, se obtuvo la deformación unitaria utilizando la ecuación No. 7.

Para la aplicación de la carga, se utilizó la compresora hidráulica monofásica, marca Forney, modelo FT-40-DR, con capacidad de 250,000 lbs.

3. **Prueba de dureza.** Para esta prueba, se utilizaron seis probetas por especie de dimensiones de 2" x 2" x 6" (5 cm x 5 cm x 15 cm) a las cuales se les aplicó la carga necesaria para que una bala de acero de 0.44" penetre dentro de la muestra hasta la mitad de su diámetro. Al llegar a dicha profundidad, se tomó la lectura de deformación del anillo por medio del deformímetro, la cual se puede transformar en carga mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Carga (lb.)} = \frac{1000 (\text{No. De vueltas})}{1 \frac{1}{3}} \quad (\text{Ec. 25})$$

A cada probeta se le efectuó dos penetraciones sobre cada una de sus caras tangenciales, radiales y axiales.

La prensa que se utilizó para realizar este método fue la compresora manual marca Soiltest, modelo CN-472y, número de serie 192, la cual está compuesta de un deformímetro marca Soiltest LC-2 con una carrera de ½".

4. **Prueba de corte.** Para esta prueba se utilizaron veinte probetas por especie de dimensiones de 2" x 2" x 2" de las cuales se utilizaron diez para realizar una grada de ¾" en la cara radial y diez en la cara tangencial. Luego fueron introducidas en un dispositivo diseñado especialmente para provocar el corte, como se muestra en la Figura 3.11.

Luego el dispositivo fue colocado en la compresora manual marca Soiltest, modelo CN-472y, número de serio 192, la cual está compuesta de un deformímetro marca Soiltest LC-2 con una carrera de ½".

El dato obtenido es la deformación en el momento en que el dispositivo rasga la parte de la pieza sobre la cual ejerce la fuerza y con lo cual se puede obtener la carga en libras utilizando la ecuación 25.

Una vez obtenida la carga se puede calcular el esfuerzo cortante utilizando la Ecuación 10.

5. **Flexión estática.** Para esta prueba, se utilizaron 6 probetas por especie de dimensiones 2" x 2" x 30" (5 cm x 5 cm x 76 cm) a las cuales se les aplicó una carga en la cara tangencial tal y como se

aprecia en la figura 3.5. Dicha carga fue aplicada por la compresora hidráulica marca Versa Tester Soiltest, número de serie 153, en la cual se utilizó un accesorio especial para poder aplicar la carga.

Así mismo se le determinó el módulo de elasticidad a cada probeta por lo cual se midió la deformación cada 200 lbs hasta alcanzar 1,200 lbs o la ruptura de la pieza.

Con los datos obtenidos, se procedió a obtener el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura, utilizando las siguientes fórmulas:

$$\text{MOE} = \frac{Pa}{24\Delta I} (3L^2 - 4a^2) \quad (\text{Ec. 27})$$

donde MOE = módulo de elasticidad

$$I = b (\text{base}) * h (\text{altura})^3 / 12 = \text{constante (in}^4) = 1.33 \text{ in}^4$$

P = carga aplicada (lb) (lectura en la máquina universal)

a = distancia entre los apoyos, en nuestro caso sería L/3 (in)

L = largo total de la viga

Δ = deformación (in) (lectura del deformímetro)

Suponiendo unas medidas iguales para todas las probetas, es posible sustituir en la fórmula el momento de inercia, la distancia entre los apoyos y el largo total de la viga, dando como resultado una fórmula en función de la carga aplicada y la deformación:

$$\text{MOE} = \frac{P}{\Delta} (718.75) \quad (\text{Ec. 28})$$

Para calcular el módulo de ruptura, se utilizó la última carga registrada hasta la falla, aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{MOR} = My / I \quad (\text{Ec. 29})$$

donde MOR = módulo de ruptura

$$I = bh^3 / 12$$

$$M = Pa$$

$$y = h / 2$$

V. RESULTADOS

A. Granadilla

1. Propiedades físicas de la madera de Granadilla.

Figura 5.1. Corte tangencial de la Granadilla.



Figura 5.2. Corte radial de la Granadilla.



Cuadro 5.1. Características organolépticas de la Granadilla.

Característica	Descripción
Olor	Aromático
Color	Varía entre Café Rojizo Oscuro (3/4 Hue 2.5 YR) y Café Rojizo (5/4 Hue 5 YR)
Sabor	Ninguno
Grano	Recto
Textura	Fina, homogénea

Cuadro 5.2. Contenido de humedad y pesos de la Granadilla.

Propiedad	Promedio (gr/pulg³)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Humedad	15.49	0.47	3.06%
Peso aparente (W_g)	1.07	0.31	1.79%
Peso anhidro (G_o)	0.97	0.26	1.64%
Peso específico al 12% (G_a)	0.93	0.39	2.59%
Peso específico verde (G_g)	0.97	0.25	1.56%
Peso unitario al 12% (W_a)	1.05	--	--

Podemos determinar que esta madera es extremadamente pesada.

Cuadro 5.3. Contracciones de la Granadilla.

Contracción	Promedio (%)	Coefficiente de variación
Axial	0.88	54.44%
Radial	1.03	46.82%
Tangencial	3.16	100.93%
Volumétrica	5.00	132.14%
Tangencial/Radial	3.06	64.10%

Se puede apreciar que esta madera sigue la tendencia de la mayoría de las maderas, donde el eje tangencial es el que más se contrae, seguido por el eje radial y en último lugar, el axial. En lo concerniente a las contracciones, se determinó que todos los ejes tienen contracciones bajas. Así mismo se obtuvo que la relación tangencial/radial demuestra que es una madera muy inestable, la cual debe ser secada con mucho cuidado.

2. **Propiedades mecánicas de la madera de granadilla.** En las pruebas de corte, pude observar que las muestras de corte tangencial tuvieron grietas cuneiformes, mientras que las muestras de corte radial tuvieron grietas de aplastamiento. Así mismo, se determinó que los cortes en el eje tangencial fueron un 71.02% más resistentes que los radiales. Esta tendencia se repitió en las demás especies pero a diferentes porcentajes.

En lo que concierne a los esfuerzos básicos de la compresión paralela y perpendicular a la fibra, fueron un 70 y 75% respectivamente menores a los valores obtenidos ya que estos representan los valores de pruebas bajo condiciones óptimas. Por otra parte, se determinó que las fallas que se obtuvieron fueron de tensión simple.

Cuadro 5.4. Esfuerzos últimos de la Granadilla.

Propiedad		Esfuerzo unitario (δ)		Desviación estándar	Coeficiente de variación	Esfuerzo básico
		Psi (lb/pulg ²)	Kg/cm ²			
Corte	Radial	4,962.35	101.46	247.72	17.23%	
	Tangencial	1,437.99	315.19	550.59	11.10%	
Compresión paralela a la fibra		12,354.17	871.68	1,263.47	10.23%	3,715.38
Compresión perpendicular a la fibra		4,261.90	300.71	1082.45	25.40%	1,065.12
Dureza	Axial	3,458.00	243.99	0.47	10.28%	
	Radial	3,431.25	242.10	0.47	10.26%	
	Tangencial	3,390.75	239.24	0.55	12.26%	

Se pudo observar que la dureza es bastante uniforme en los tres ejes de la pieza.

Cuadro 5.5. Módulo de elasticidad y de ruptura de la Granadilla.

	MOE (psi)	MOR (psi)
Compresión paralela a la fibra	1.35×10^6	
Flexión estática	5.77×10^6	18,500.00

B. Luin hembra

1. Propiedades físicas de la madera de Luin Hembra.

Figura 5.3. Corte tangencial del Luin hembra.**Figura 5.4.** Corte radial del Luin hembra.

Cuadro 5.6. Características organolépticas del Luin hembra.

Característica	Descripción
Olor	No distintivo
Color	Amarillo pálido (8/3 Hue 5Y)
Sabor	Ausente
Grano	Recto
Textura	Fina, homogénea

Cuadro 5.7. Contenido de humedad y pesos del Luin hembra.

Propiedad	Promedio (gr/pulg ³)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Humedad	46.35	2.79	6.02%
Peso aparente (W_g)	1.11	0.35	1.94%
Peso anhidro (G_0)	0.86	0.12	0.88%
Peso específico al 12% (G_a)	0.82	0.20	1.51%
Peso específico verde (G_g)	0.86	0.11	0.78%
Peso unitario al 12% (W_a)	0.93	--	--

La madera de Luin hembra se puede catalogar como excesivamente pesada.

Cuadro 5.8. Contracciones del Luin hembra.

Contracción	Promedio (%)	Coefficiente de variación
Axial	0.02	21.34%
Radial	4.69	28.68%
Tangencial	7.50	4.14%
Volumétrica	11.86	10.32%
Tangencial/Radial	1.60	25.37%

Las contracciones radiales, tangenciales y volumétricas fueron clasificadas como altas. En lo que respecta a la relación tangencial-radial, se pudo determinar que ésta es una madera estable a la cual hay que poner poca atención al secado.

2. Propiedades mecánicas de la madera de Luin hembra. En las pruebas de corte se observó que las probetas seguían el mismo comportamiento de falla que la Granadilla. Por otra parte, se determinó que el corte radial es un 52.21% más resistente que el tangencial.

Cuadro 5.9. Esfuerzos últimos del Luin hembra.

Propiedad		Esfuerzo unitario (δ)		Desviación estándar	Coeficiente de variación	Esfuerzo básico
		Psi (lb/pulg ²)	Kg/cm ²			
Corte	Radial	2367.74	199.25	550.59	12.06%	
	Tangencial	1131.43	79.83	93.84	8.29%	
Compresión paralela a la fibra		6,739.58	475.53	83.07	1.23%	2,229.93
Compresión perpendicular a la fibra		2,815.48	198.65	190.72	6.77%	879.29
Dureza	Axial	1,899.75	134.04	0.15	5.91%	
	Radial	1,762.50	124.36	0.24	10.34%	
	Tangencial	1,768.50	124.78	0.21	8.94%	

La compresión paralela y perpendicular a la fibra siguió con la tendencia hacia un menor valor de esfuerzo básico los cuales fueron un 33 y un 31% menor respectivamente que los valores obtenidos. Se constató que las fallas obtenidas para esta prueba fueron de tensión simple.

En lo que respecta a la prueba de dureza, se puede observar que son bastante uniformes, sin embargo el eje axial tiene un poco más de resistencia a la penetración.

Cuadro 5.10. Módulo de elasticidad y ruptura del Luin hembra.

	MOE (psi)	MOR (psi)
Compresión paralela a la fibra	1.17×10^6	
Flexión estática	3.17×10^6	13,500.00

C. Danto

1. Propiedades físicas de la madera de danto.

Figura 5.5. Corte tangencial del Danto

Figura 5.6. Corte radial del Danto**Cuadro 5.11.** Características organolépticas del Danto

Característica	Descripción
Olor	Desagradable
Color	Varía entre café amarillento oscuro (4/4 Hue 7.5 YR) y amarillo (8/6 Hue 5Y)
Sabor	Ausente
Grano	Recto
Textura	Mediana, heterogénea

Cuadro 5.12. Contenido de humedad y pesos del Danto

Propiedad	Promedio (gr/pulg ³)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Humedad	18.13	0.40	2.21%
Peso aparente (W_g)	0.82	0.44	3.27%
Peso anhidro (G_o)	0.78	0.42	3.33%
Peso específico al 12% (G_a)	0.71	0.34	2.92%
Peso específico verde (G_g)	0.78	0.38	2.98%
Peso unitario al 12% (W_a)	0.79	--	--

Esta madera puede ser clasificada como excesivamente pesada debido al peso específico de la madera al 12%.

El eje tangencial tuvo una contracción mediana, mientras que el eje radial y la contracción volumétrica fueron clasificados como altos. En lo que respecta a la relación tangencial-radial, se determinó que el Danto es una madera estable que no se agrieta ni se deforma.

Cuadro 5.13. Contracciones del Danto

Contracción	Promedio (%)	Coefficiente de variación
Axial	0.39	29.53%
Radial	4.39	1.44%
Tangencial	6.14	51.10%
Volumétrica	10.62	16.79%
Tangencial/Radial	1.39	74.97%

2. Propiedades mecánicas de la madera de Danto.

Cuadro 5.14. Esfuerzos últimos del Danto

Propiedad		Esfuerzo unitario (δ)		Desviación estándar	Coeficiente de variación	Esfuerzo básico
		Psi (lb/pulg ²)	Kg/cm ²			
Corte	Radial	3,809.61	198.55	730.71	19.18%	
	Tangencial	781.73	55.16	146.79	18.78%	
Compresión paralela a la fibra		9,229.17	651.18	398.56	4.32%	2,958.25
Compresión perpendicular a la fibra		1,533.33	108.19	43.46	2.83%	499.11
Dureza	Axial	1,924.50	135.79	0.10	3.84%	
	Radial	1,487.25	104.94	0.27	13.40%	
	Tangencial	1,518.75	107.16	0.21	10.34%	

La prueba de corte radial demostró nuevamente ser más fuerte que el corte tangencial, con una diferencia de 79%. Estas probetas obtuvieron las mismas fallas para cada corte que la Granadilla.

La compresión paralela y perpendicular a la fibra siguieron la tendencia hacia un menor esfuerzo básico, el cual fue un 32 % menor para ambas. Así mismo se pudo constatar que las fallas obtenidas fueron de tensión simple.

En lo que respecta a la dureza, se pudo observar que se tenía más resistencia en la cara axial, mientras que el esfuerzo de penetración en el eje radial y tangencial eran similares.

Cuadro 5.15. Módulo de elasticidad y ruptura del Danto

	MOE (psi)	MOR (psi)
Compresión paralela a la fibra	2.06 x 10 ⁶	
Flexión estática	4.64 X 10 ⁶	12,812.5

D. Zapotillo

1. Propiedades físicas de la madera de Zapotillo.

Figura 5.7. Corte tangencial del Zapotillo**Figura 5.8.** Corte radial del Zapotillo**Cuadro 5.16.** Características organolépticas del Zapotillo

Característica	Descripción
Olor	No distintivo
Color	Amarillo pálido (8/4 Hue 5Y)
Sabor	Ausente
Grano	Recto
Textura	Fina, homogénea

Cuadro 5.17. Contenido de humedad y pesos del Zapotillo

Propiedad	Promedio (gr/pulg³)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Humedad	38.58	1.99	5.16%
Peso aparente (W _g)	0.80	0.27	2.08%
Peso anhidro (G ₀)	0.63	0.24	2.37%
Peso específico al 12% (G _a)	0.58	0.15	1.61%
Peso específico verde (G _g)	0.63	0.22	2.17%
Peso unitario al 12% (W _a)	0.66	--	--

La madera del Zapotillo puede ser clasificada como pesada debido a su peso específico al 12% de humedad.

Cuadro 5.18. Contracciones del Zapotillo

Contracción	Promedio (%)	Coefficiente de variación
Axial	0.75	30.65%
Radial	2.95	31.51%
Tangencial	4.72	46.78%
Volumétrica	8.22	30.25%
Tangencial/Radial	1.59	17.38%

Las contracciones radial y tangencial obtenidas fueron bajas, sin embargo la contracción volumétrica fue media. En lo que respecta a la relación tangencial-radial, se determinó que ésta es una madera estable la cual requiere poca atención en el secado.

2. **Propiedades mecánicas de la madera de Zapotillo.** Las pruebas de corte siguieron con la tendencia de las maderas anteriores para las fallas de cada uno de los cortes. En este caso, la contracción tangencial fue un 62% menor que la radial.

Los esfuerzos básicos de compresión paralela y perpendicular a la fibra fueron un 32% menor para ambos casos. En lo que respecta a tipo de falla, se pudo constatar que todas tuvieron falla de tensión simple.

En el caso de la dureza de la madera de Zapotillo, se pudo constatar que existe un esfuerzo mayor en la cara axial, mientras que la cara radial y tangencial presentan valores menores pero similares entre sí.

Cuadro 5.19. Esfuerzos últimos del Zapotillo

Propiedad		Esfuerzo unitario (δ)		Desviación estándar	Coeficiente de variación	Esfuerzo básico
		Psi (lb/pulg ²)	Kg/cm ²			
Corte	Radial	1,998.92	141.04	274.68	13.74%	
	Tangencial	755.98	53.34	81.88	10.83%	
Compresión paralela a la fibra		5,577.08	393.50	212.19	3.80%	1,797.24
Compresión perpendicular a la fibra		1,325.00	93.49	51.37	3.88%	426.67
Dureza	Axial	1,131.00	79.80	0.13	8.69%	
	Radial	1,119.00	78.95	0.09	6.04%	
	Tangencial	1,112.25	78.48	0.16	10.69%	

Cuadro 5.20. Módulo de elasticidad y ruptura del Zapotillo

	MOE (psi)	MOR (psi)
Compresión paralela a la fibra	1.42 X 10 ⁶	
Flexión estática	2.51 X 10 ⁶	11,887.5

E. Guacibán

1. Propiedades físicas de la madera de Guacibán.

Figura 5.9. Corte tangencial del Guacibán

Figura 5.10. Corte radial del Guacibán**Cuadro 5.21.** Características organolépticas de la madera de Guacibán

Característica	Descripción
Olor	No distintivo
Color	Rosado (8/3 Hue 5YR)
Sabor	Ausente
Grano	Recto
Textura	Gruesa, homogénea

Cuadro 5.22. Contenido de humedad y pesos del Guacibán

Propiedad	Promedio (gr/pulg³)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Humedad	19.12	1.65	8.63%
Peso aparente (W_g)	0.48	0.29	3.75%
Peso anhidro (G_o)	0.44	0.22	2.97%
Peso específico al 12% (G_a)	0.42	0.21	3.06%
Peso específico verde (G_g)	0.44	0.18	2.55%
Peso unitario al 12% (W_a)	0.48	--	--

La madera de Guacibán se puede considerar como moderadamente pesada por su peso específico al 12% de humedad.

La contracción tangencial fue clasificada como baja, la radial y la volumétrica como media. En lo que respecta a la relación tangencial-radial, se puede clasificar como una madera estable que no se agrieta ni se deforma.

Cuadro 5.23. Contracciones de la madera de Guacibán

Contracción	Promedio (%)	Coefficiente de variación
Axial	0.60	17.43%
Radial	3.46	30.42%
Tangencial	4.56	14.32%
Volumétrica	8.69	10.43%
Tangencial/Radial	1.40	49.38%

2. Propiedades mecánicas de la madera de Guacibán.

Cuadro 5.24. Esfuerzos últimos de la madera de Guacibán

Propiedad		Esfuerzo unitario (δ)		Desviación estándar	Coefficiente de variación	Esfuerzo básico
		Psi (lb/pulg²)	Kg/cm²			
Corte	Radial	972.26	68.60	349.37	35.93%	--
	Tangencial	276.94	19.54	44.18	15.95%	--
Compresión paralela a la fibra		3,968.75	280.02	460.55	11.60%	1,175.25
Compresión perpendicular a la fibra		733.33	51.74	42.16	5.75%	231.54
Dureza	Axial	531.00	37.47	0.12	17.51%	--
	Radial	500.25	35.29	0.16	23.35%	--
	Tangencial	450.00	31.75	0.13	21.32%	--

Las pruebas de corte mostraron las mismas fallas que la Granadilla para cada uno de los cortes. En este caso la contracción radial fue un 71% mayor que la tangencial.

Los esfuerzos básicos de las pruebas de compresión paralela y perpendicular a la fibra siguieron la tendencia y fueron un 29 y un 31% menor respectivamente. En lo que respecta a las fallas presentadas, se observó que todas fueron de tensión simple.

La prueba de dureza demostró que la cara axial fue la que más esfuerzo requirió para la penetración, seguida por la cara radial y tangencial las cuales presentaron valores similares.

Cuadro 5.25. Módulo de elasticidad y ruptura del Guacibán.

	MOE (psi)	MOR (psi)
Compresión paralela a la fibra	0.96 X 10 ⁶	
Flexión estática	2.61 X 10 ⁶	9,062.50

VI. DISCUSIÓN

En lo que respecta al color, se observó que la Granadilla y el Guacibán no contaban con una tonalidad uniforme, más bien en estas maderas se podían apreciar dos colores que variaban dependiendo si era madera de invierno o verano; siendo la madera de tonalidad más oscura la de verano. En lo que respecta al Luín hembra, Zapotillo y Guacibán tienen tonalidades uniformes a lo largo de la veta.

Con los colores definidos, se pudo observar que no todos tienen potencial en el mercado actual, por ejemplo el Danto que posee un color que varía del amarillo al café y el Guacibán que es una madera rosada. Las maderas restantes tienen un mayor potencial ya que tanto el Luín hembra como el Zapotillo poseen maderas claras las cuales tienen la opción de ser tintadas; y la Granadilla que posee dos tonalidades oscuras tiene cierto atractivo a la vista. No obstante lo anteriormente dicho, en algún momento las maderas con poco potencial podrían adquirir valor al encontrarse alguna aplicación para la cual sean aptos los colores que poseen.

Se pudo constatar que los contenidos de humedad de las diferentes maderas eran distintos, siendo de 15.45% para la Granadilla, 46.38% para el Luín hembra, 18.13% para el Danto, 38.58% para el Zapotillo y 19.11% para el Guacibán. Esto se pudo deber en parte a que debido a factores climáticos no fue posible extraer del bosque todas las especies al mismo tiempo por lo que algunas pasaron más tiempo en el patio, lo que les permitió perder más humedad. Pueden existir otros factores que escapan al alcance de este estudio como lo es la disposición microscópica de las fibras, lo cual puede facilitar o dificultar la salida del agua.

El peso específico es un valor muy importante ya que es un parámetro que puede ayudar a determinar la selección y clasificación de la madera para un uso industrial específico, facilidad de trabajo en máquinas, rendimientos de pulpa, etc. Por la misma importancia de este dato, se realizó una serie de cálculos para obtener el resultado a una humedad del 12%, lo cual es una forma de estandarizar el resultado permitiéndonos compararlo con los datos de otras maderas. Este dato obtenido nos permitió clasificar las maderas según su peso específico (Cuadro 3.3.). Se encontró que la Granadilla es una madera extremadamente pesada, le siguen el Luín hembra y el Danto siendo estas maderas excesivamente pesadas, en cuarto lugar se encuentra el Zapotillo como madera pesada y en último lugar se encuentra el Guacibán como madera ligeramente pesada.

Se pudo determinar tanto en la teoría como en la práctica que la mayoría de las maderas siguen la tendencia en la cual el eje tangencial es el que más se contrae, seguido por el eje radial y por último el eje axial. De estos datos obtenidos se deriva un dato aún más importante: la relación tangencial-radial, en donde se determina la estabilidad de la madera (Cuadro 3.2.). Los datos obtenidos de esta relación mostraron que tanto el Danto como el Guacibán son maderas estables que no se agrietan ni se deforman, el Luín hembra y el Zapotillo son clasificadas como maderas estables a las cuales se ha de poner poca atención durante el secado y por último la Granadilla fue clasificada como una madera muy inestable, la cual debe ser secada con mucho cuidado.

La prueba de corte se realizó para el eje radial y para el tangencial. Al observar los resultados se pudo determinar que todas las especies tienen esfuerzos de corte mayores para el eje radial, únicamente variando en la proporción. En esta prueba se determinó que la Granadilla ponía más resistencia al corte radial con 4968.348 psi, le siguen el Danto con 3809.612 psi, el Luín hembra con 2367.742 psi, el Zapotillo con 1998.916 psi y el Guacibán con 972.256 psi. A partir de estos resultados se determinó la diferencia entre el corte radial y tangencial obteniendo que el Danto tiene un corte radial 79% más fuerte que el tangencial, le siguen la Granadilla y el Guacibán con un 71%, en cuarto lugar sigue el Zapotillo con un 62% y en último lugar se encuentra el Luín hembra con un 52%. También cabe mencionar que en esta prueba todos los cortes radiales presentaron fallas de tipo grietas cuneiformes, mientras que los cortes tangenciales tuvieron fallas de aplastamiento (Cuadro 3.9.).

Los esfuerzos de la compresión paralela y perpendicular a la fibra fueron sometidos a una serie de factores de corrección, dentro de los que se encontraban la humedad, variables estadísticas, factores de seguridad, etc., con el fin de simular un resultado bajo condiciones óptimas de laboratorio. El resultado de estas correcciones es llamado esfuerzo básico, el cual resultó ser una cantidad inferior que la obtenida en las pruebas, sin embargo, como se ha podido apreciar anteriormente, estas variaciones de los resultados no son uniformes sino que varían según la especie. Tomando en cuenta lo anterior se determinó que la madera de Granadilla tiene valores menores en un 70% y 75% respectivamente que los valores obtenidos en las pruebas, el Luín hembra con un 33% y 31%, el Danto y el Zapotillo tiene valores de 32% para ambas pruebas y el Guacibán con un 29% y 31%. Esta variación en el resultado se puede deber a que mientras menor sea la variación, la madera puede presentar mejores parámetros para la prueba.

El módulo de elasticidad (MOE) se define como la relación esfuerzo-deformación unitaria en el punto donde éstas son proporcionales, sin embargo, es una medida de referencia para ser comparada con otras maderas, no importando que tenga dimensionales psi. Este dato fue obtenido tanto para la flexión estática, como para la compresión paralela a la fibra. En el caso de la flexión estática la madera con el mayor MOE fue la Granadilla con 5.7×10^6 psi, seguido del Danto con 4.64×10^6 psi, en tercer lugar se encuentra el Luín hembra con 3.16×10^6 psi, el cuarto lugar lo ocupa el Guacibán con 2.6×10^6 psi y en último lugar se tiene al Zapotillo con 2.52×10^6 psi. Para la compresión paralela a la fibra el orden varió ya que en primer lugar se encuentra el Danto con 2.06×10^6 psi, en segundo lugar se encuentra el Zapotillo con 1.41×10^6 psi, seguido por la Granadilla 1.35×10^6 psi, en cuarto lugar se encuentra el Luín hembra con 1.17×10^6 psi y en último lugar se tiene al Guacibán con 0.96×10^6 psi.

El módulo de ruptura, contrario al módulo de elasticidad, es un valor real que representa el esfuerzo en psi en el cual se da la ruptura de la pieza. Este dato se calcula sólo para la flexión estática, en donde se obtuvo como resultado que la Granadilla tiene el MOR más elevado con 18500.00 psi, seguido del Luín hembra con 13500.00 psi, en tercer lugar se tiene al Danto con 12812.00 psi, en cuarto se encuentra el Zapotillo con 11887.50 psi y en último lugar se encuentra el Guacibán con 9062.50 psi.

Las pruebas de dureza mostraron que la cara axial de la madera requería un esfuerzo levemente mayor de penetración, mientras que las caras radial y tangencial tenían valores menores pero similares entre sí. Este patrón se presentó en las cinco especies que fueron objeto de este estudio.

Hay que tomar en cuenta que para todas las propiedades mecánicas los valores obtenidos se dieron en la humedad en verde que tenía cada especie, no al 12%.

VII. CONCLUSIONES

1. La madera de Granadilla puede ser utilizada para mueblería, construcción, envases y paletas, traviesas, postes y apeas; ya que no posee limitantes en sus propiedades físicas ni mecánicas.

2. La madera de Luin hembra puede ser utilizada para todos los usos expuestos anteriormente, con el beneficio de que al ser una madera bastante clara, puede serle aplicado cualquier tinte.

3. La madera de Danto puede ser utilizada para todas las actividades del Cuadro 3.4, con la limitante que el color no es uno de los más apetecidos por el mercado.

4. La madera de Zapotillo puede ser utilizada para todas las actividades del Cuadro 3.4, teniendo el beneficio de que la madera al ser de color claro puede ser entintada.

5. La madera de Guacibán es una madera con valores bastante bajos en sus propiedades mecánicas, además el color no es muy cotizado por el mercado por lo cual se recomienda su uso para trabajos artesanales.

VIII. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar las pruebas mecánicas del manual ASTM D 143 que quedaron pendientes, con lo cual se tendrá una perspectiva más amplia de las capacidades de estas maderas.
2. Es necesario efectuar propiedades químicas de estas maderas para poder entender el porque de ciertas propiedades mecánicas.
3. Es necesario conocer la volumetría actual y futura de dichas especies para que en base a esto se puedan promocionar para su aprovechamiento tanto en el mercado interno como externo, con lo cual se le pretende dar un valor agregado al bosque.
4. Se recomienda realizar talleres para exponer las propiedades a las personas encargadas de aprovechar el bosque y a la industria en general para que tengan más opción de materia prima a la hora de realizar sus productos.
5. Se recomienda seguir con este tipo de estudios hasta tener caracterizadas todas las especies de Guatemala.

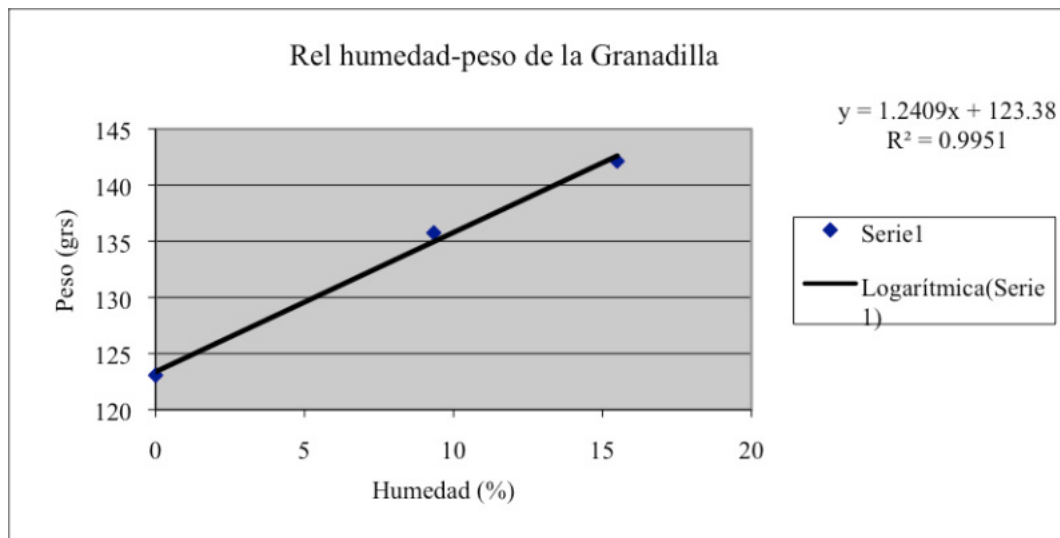
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **ASTM** (American Society for Testing Materials), *ASTM- D 143* (Sociedad Americana de ensayos de materiales)
2. Benítez, RF. y J. Montesinos. 1988. *Catálogo de 100 especies forestales de Honduras: distribución, propiedades y usos*. Siguatepeque, Honduras. Escuela Nacional de Ciencias Forestales –ESNACIFOR. 216 p.
3. Casasola, CR. 1988. *Anatomía y propiedades físicas de las maderas Calophyllum brasiliense, Vochysia hondurensis y Symphonia globulifera*. Tesis Licenciatura en Agronomía. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. 112 p.
4. Craig, R. *Mecánica de Materiales*. 2002. Primera Edición. Compañía Editorial Continental. México. 752 pp.
5. CTEF (Centro Técnico de Evaluación Forestal). 1972. *Estudio de las Propiedades Físico Mecánicas y Estructura Anatómica de 7 especies de Pino de Guatemala*. Guatemala. 114p.
6. Davis, H., G. Troxell y C. Wiskocil. 1982. *Ensayo e inspección de los materiales en ingeniería*. 9ª. Impresión. México D.F. Editorial Continental S.A. de C.V. 576p.
7. Forest Laboratory of Products. 2002. *Wood Handbook*. United States Forest Service Department of agriculture.
8. Globe. 2003. *Soil Investigation. Soil Caracterización*. [En línea]. UCAR / CSU whit support from NASA, NSF and the US Department of State. Consultado 25 ene. 2004. Disponible en <http://www.globe.gov/hq/trr/spanish/1>.
9. Lima, L. 2003. *Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas de 5 especies de árboles tropicales*. Tesis. Ing. Forestal. UVG. 74 pp.

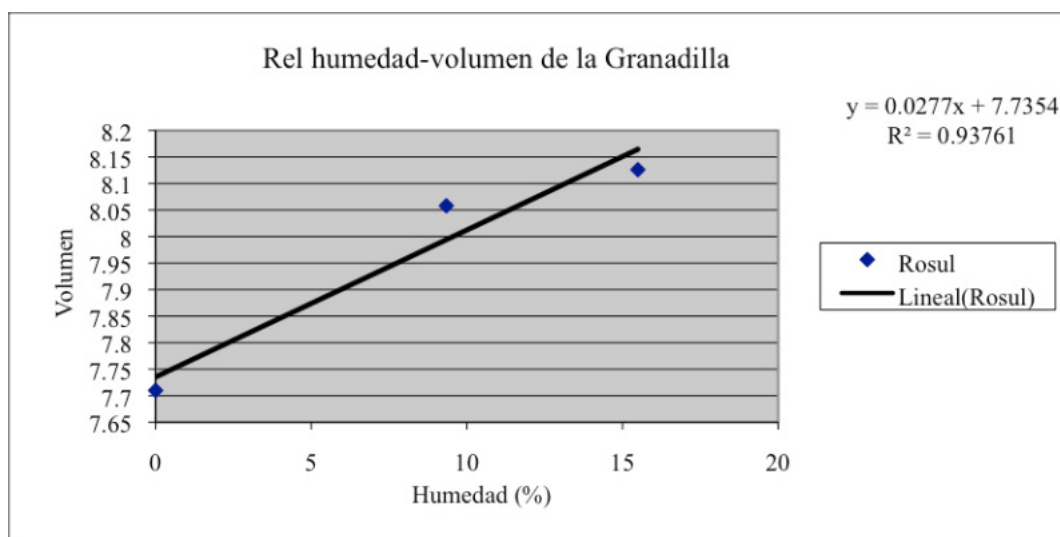
10. Pennington, T. Sarukhán. 1998. *Árboles Tropicales de México*. Fondo de Cultura Económica. México. 521 pp.
11. Seely, F. B. 1954. *Resistencia de Materiales*. Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana. México. 591pp.
12. Universidad Católica del Norte de Chile. 2005. *Laboratorio de Materiales* [En línea]. Consultado 10 de septiembre 2005. Disponible en <http://www.ucn.cl/Facultades/Institutos/laboratorio/materiales3.htm>
13. UVG (Universidad del Valle de Guatemala). 2003. *Guía de Laboratorio de Resistencia de Materiales*. Guatemala. 2p.
14. Vignote, S. y J. Jiménez. 1996. *Tecnología de la Madera*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 602 pp.

X. ANEXOS

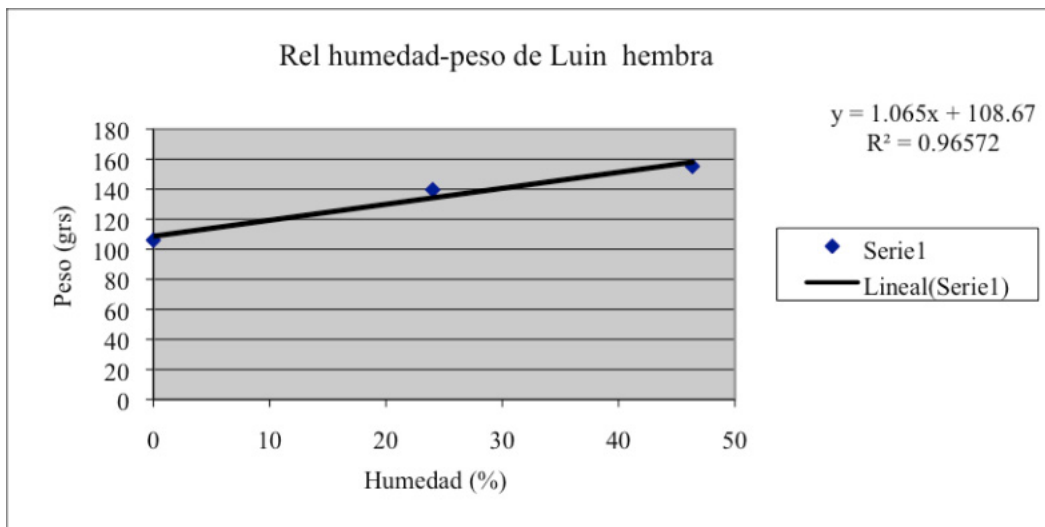
A. Relación humedad-peso de la madera de Granadilla.



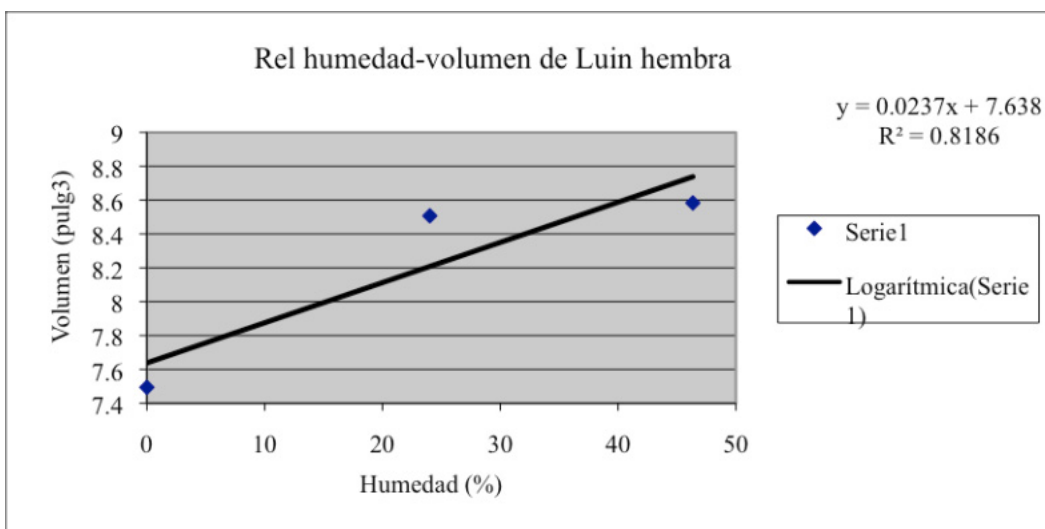
B. Relación humedad-volumen de la madera de Granadilla.



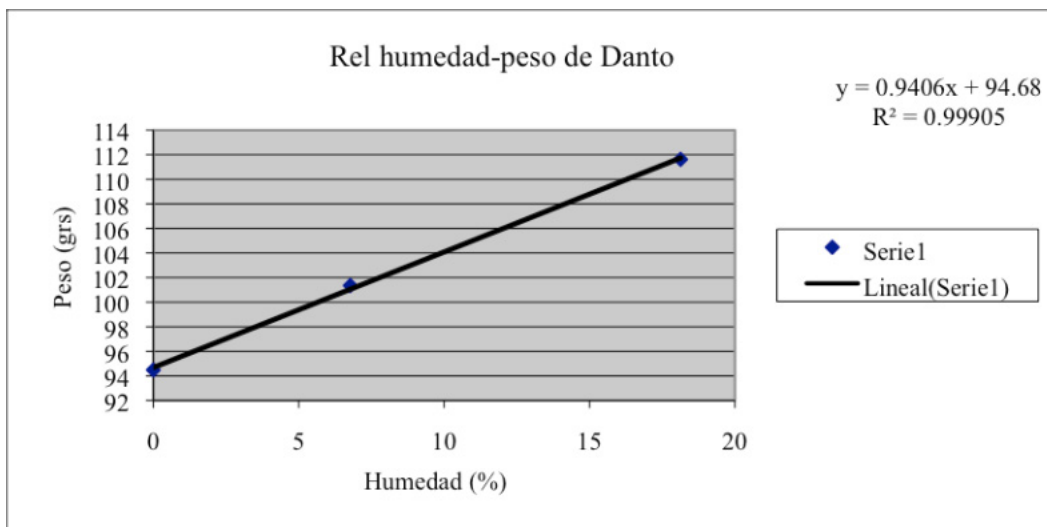
C. Relación humedad-peso de la madera de Luin hembra



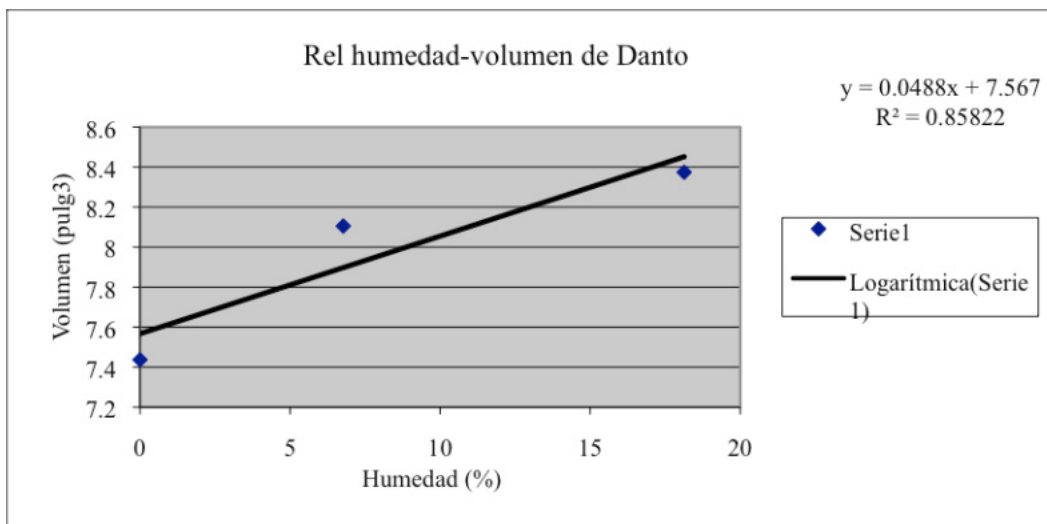
D. Relación humedad-volumen de la madera de Luin hembra



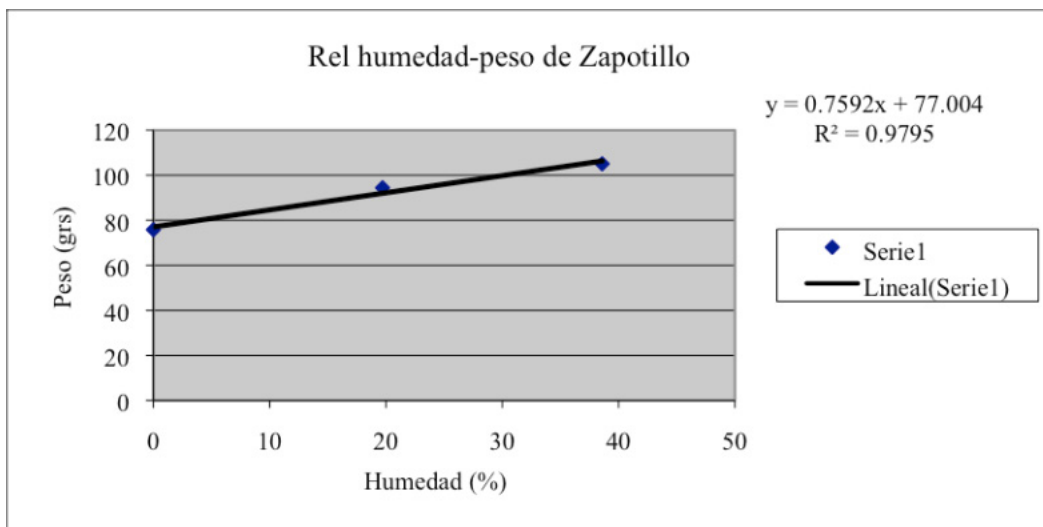
E. Relación humedad-peso de la madera de Danto.



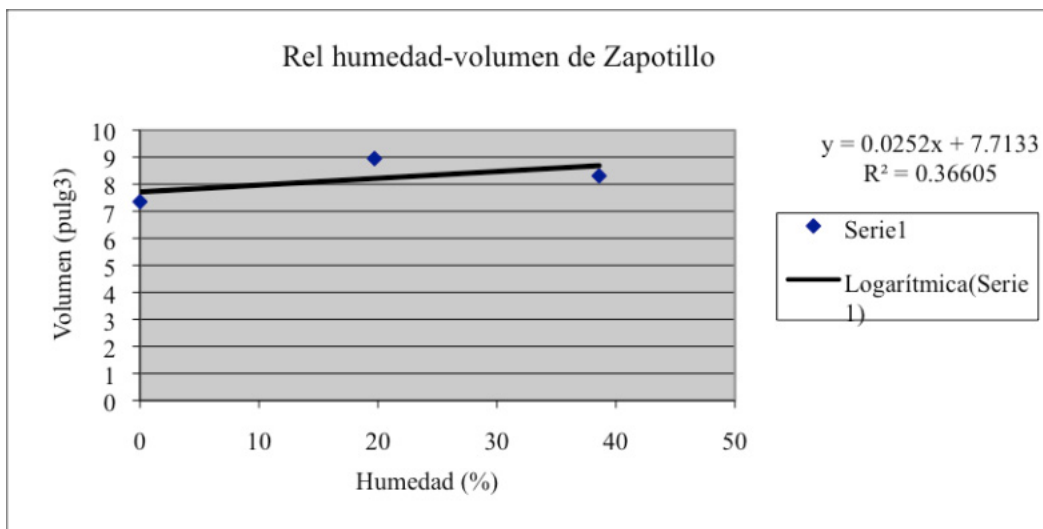
F. Relación humedad-volumen de la madera de Danto.



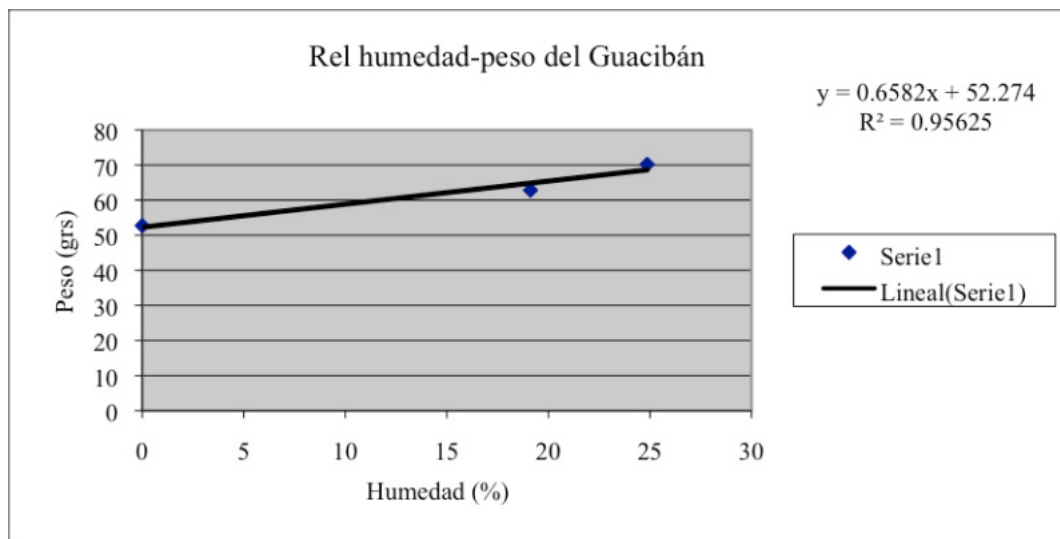
G. Relación humedad-peso de la madera de Zapotillo.



H. Relación humedad-volumen de la madera de Zapotillo.



I. Relación humedad-peso de la madera de Guacibán.



J. Relación humedad-volumen de la madera de Guacibán.

