



**UNIVERSIDAD
MICHUACANA DE
SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERIA EN TECNOLOGIA DE LA
MADERA**

**CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE LA MADERA DE
*Acrocarpus fraxinifolius***

TESIS PROFESIONAL

**Para obtener el título de
INGENIERO EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA**

Presenta:

Julio César Camarena Tello.

Asesora:

M.C. Teresa Sánchez Vargas

OCTUBRE 2009

Contenido

Índice de figuras	III
Índice de fórmulas	III
Índice de tablas	IV
Resumen	V
Abstract	VI
1.- Introducción.....	1
2.- Justificación.....	2
3.- Antecedentes	3
4.- Objetivo.....	4
4.1 Objetivos particulares	4
5.- Marco teórico	5
5.1.- Propiedades Físicas de la Madera.	5
5.1.1.- La humedad en árboles vivos	5
5.1.2.- La humedad de la madera después de ser aserrada.....	6
5.1.3.- Contenido de humedad máximo.	7
5.1.4.- Determinación del contenido de humedad.....	7
5.1.5.- Contracción e Hinchamiento	8
5.1.6.- Densidad.....	11
5.2.- Propiedades Mecánicas de la madera.....	12
5.2.1.- Esfuerzo a la tensión.....	14
5.2.2.- Compresión paralela y perpendicular al grano.....	15
5.2.3.- Esfuerzo a la flexión (Flexión estática.).....	16
5.2.4.- Rajaduras.....	17
5.2.5.- Dureza (Dureza janka.)	18
5.2.6.- Extracción de clavos.	19
6.- Materiales y Métodos	21
6.1.- Descripción general de la localidad, de donde fueron derribados los arboles de <i>Acrocarpus fraxinifolius</i>	21
6.2.- Metodología.....	24
6.3 Determinación de las propiedades Físicas.	26
6.3.1.- Determinación de la Contracción.	26

6.3.2.- Cálculo de la Densidad Básica.....	26
6.3.3.- Determinación del Contenido de Humedad.	27
6.4.- Determinación de las Propiedades Mecánicas.....	28
6.4.1.- Determinación de la Flexión Estática.....	28
6.4.2.- Compresión paralela al grano.	31
6.4.3.- Compresión perpendicular al grano.	33
6.4.4.- Tensión paralela al grano.....	34
6.4.5.- Tensión perpendicular al grano.....	35
6.4.6.- Rajadura	36
6.4.7.- Dureza: radial, tangencial y transversal.	37
6.4.8.- Extracción de clavos: radial, tangencial y transversal.....	38
7.- Resultados	40
8.- Análisis de los resultados.....	42
9.- Conclusiones.....	44
10.- Recomendaciones.	45
11- Bibliografía.	46
12.- Agradecimientos.	50

Índice de figuras

Figura 1.- Relación del máximo contenido de humedad y de la densidad de la madera..	7
Figura 2 Capas de la pared celular de una traqueida o fibra	9
Figura 3 Direcciones Axial (A), Tangencial (T), y Radial (R) en madera rolliza y aserrada	10
Figura 4 Representación esquemática de las muestras y la forma de cargar para la determinación de las propiedades mecánicas de la madera.....	13
Figura 5 Los esfuerzos en una viga bajo la acción de la carga	17
Figura 6 Ubicación geográfica de la localidad de donde procede la madera.....	23
Figura 7 Aserrado de las trozas con cortes orientados radialmente.....	25
Figura 8 Listones aserrados, orientados radial y tangencialmente.....	25
Figura 9 Dirección de las medidas de la contracción en las muestras.	26
Figura 10 Maquina Universal Shimadzu, 10 toneladas de capacidad.	28
Figura 11 Flexión Estática	29
Figura 12 Compresión paralela al grano.	31
Figura 13 Compresión perpendicular al grano.	33
Figura 14 Tensión paralela al grano.....	34
Figura 15 Tensión perpendicular al grano.	35
Figura 16 Rajadura.....	36
Figura 17 Dureza máxima: A) Radial; Tangencial y B) Transversal.	37
Figura 18 Extracción de clavos A) Radial, Tangencial y B). Transversal.	38

Índice de fórmulas

Fórmula 1.- Para el cálculo del Porcentaje de Contenido de Humedad.....	7
Fórmula 2.- Cambio dimensional en por ciento.	10
Fórmula empírica 3 Carga máxima para clavos comunes.	19
Fórmula 4: Contracción	26
Fórmula 5 Densidad Básica	27
Fórmula 6 Contenido de Humedad	27
Fórmulas 7 Esfuerzo Flexión, SLP, R, E.	29
Fórmulas 8 Compresión paralela, SLP, R, E.....	31

Fórmula 9 Compresión perpendicular al grano SLP.....	33
Fórmula 10 Tensión paralela al grano, R.	34
Fórmula 11 Tensión perpendicular al grano, S máx.....	35
Fórmula 12 Rajadura, S máx.....	36
Fórmula 13 Dureza máxima, R. T. T.	37
Fórmula 14 Extracción de clavos, R. T. T.....	38

Índice de tablas

Tabla 1 Resultados Propiedades Físicas	40
Tabla 2 Resultados Propiedades Mecánicas	40

Resumen

Acrocarpus fraxinifolius es nativo de las regiones tropicales de Asia. Distribuido naturalmente en la India, China, Birmania, Borneo, Sumatra, Indonesia, Vietnam y Bangladesh, es un árbol de rápido crecimiento, que anualmente puede crecer 1.3 a 3 metros. El árbol puede alcanzar 60 metros de altura y 2,4 metros de D.A.P. (Diámetro a la altura del pecho), sin embargo, 90 centímetros es el D.A.P. más frecuente (Niembro Rocas 2003).

El presente trabajo fue realizado a solicitud del gobierno del estado de Michoacán, debido a un proyecto para realizar plantaciones forestales.

Las pruebas para conocer las propiedades físicas y mecánicas se desarrollaron bajo la norma ASTM D-143 (1994) Métodos de prueba estándar para pequeños especímenes de madera sin defectos. *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. Encontrándose que estas propiedades están de acuerdo a su relación peso anhidro

volumen verde
$$\sigma_{Basica} = \frac{Q_{anhidro}}{V_{verde}}$$

De acuerdo a los resultados, la contracción tangencial y radial se clasificó como de una contracción media, por lo cual se recomienda usarse para ebanistería, aprovechando el veteado que presenta. Por otro lado de acuerdo a los valores de resistencia mecánica esta especie se clasifica de mediana resistencia. Recomendando ser utilizada en estructuras para cimbra, polines, vigas y viguetas no estructurales, marcos, molduras, paneles, cajas de empaques entre otros.

Abstract

Acrocarpus fraxinifolius is native to the tropical regions of Asia. Distributed naturally in India, China, Burma, Borneo, Sumatra, Indonesia, Vietnam, and Bangladesh, is a fast-growing tree, which annually can grow 1.3 to 3 meter. The tree can reach 60 meters in height and 2.4 meters of D.B.H. (Diameter breast height); however, 90 centimeters is the most frequent D.B.H. (Niembro Rocas 2003)

The present work was done at the request of the Government of the State of Michoacán, due to a project to realize forest plantations.

The tests to know physical and mechanical properties were developed with the norm ASTM D-143 (1994). *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. It was found that these properties are according to their relation anhydrous weight green

volume
$$\sigma_{Basica} = \frac{W_{anhidro}}{V_{verde}}$$

According to the results, the tangential and radial contraction was classified like of an medium contraction, thus is recommended to be used for carpentry, taking advantage of the veins that it has. On the other hand, according to the values of mechanical resistance, this specie is classified of medium resistance. Recommending to be used in structures for centering posts, nonstructural beams and joists, marks, moldings, panels, boxes of packing among others.

1.- Introducción

El material de estudio para esta tesis, procede del predio, finca Las Muñecas del municipio “Venustiano Carranza” del estado de Puebla, México. Las trozas presentaron diámetros de 15 a 25 cm. Proveniente de arboles muy jóvenes de aproximadamente 4.5 años de edad. Encontrándose en el trabajo de caracterización anatómica, del mismo lote de madera en estudio, realizado por (García Moreno y col. 2002); en donde menciona que el 90 % de la conformación de las trozas es albura, la cual resultó ser de color blanco a blanco amarillento con jaspeaduras beige anaranjado, correspondiente en la tabla Munsell (HUE 5Y 8/2) (Munsell 1964).

La especie de *Acrocarpus fraxinifolius* es única en el género *Acrocarpus*, es originaria de la India y Birmania se ha desarrollado favorablemente en México. Presenta rápido crecimiento, la floración y fructificación se presenta después de los ocho años de vida. El árbol es de fuste recto, casi cilíndrico, características muy ventajosas y de gran interés para introducirlo a las plantaciones forestales con fines industriales, (Ontiveros Alvarado y García Moreno 2002).

Arboles jóvenes como los de este estudio, no tienen suficiente duramen desarrollado, por lo tanto, la madera sometida fue de 100 % madera de albura.

Dentro del estudio de la madera, el conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas constituye una base fundamental para determinar los posibles usos a que puede ser destinada.

Las investigaciones que se realizan a nuevas especies maderables, nos ayuda a sustituir a las que se usan tradicionalmente y que se encuentran en peligro de extinción, fomentando la cultura de las plantaciones, a nivel industrial y dándonos la oportunidad de salvar las especies nativas.

Las tendencias son claras, los bosques naturales siguen a la baja. México notificó una disminución del 0,52 por ciento por año de 1990 a 2000, porcentaje que bajó al 0,40 por ciento por año de 2000 a 2005. (FAO 2007) Debido a esto las plantaciones adquieren gran importancia para el sector industrial, sin embargo, las maderas provenientes de estos tipos de plantaciones presentan gran porcentaje de madera juvenil, la cual posee células con paredes más delgadas, más cortas y lúmenes más anchos, característica que podría repercutir en un decremento de su resistencia mecánica y un aumento en la contracción Tangencial y Radial entre otras características.

2.- Justificación.

El presente trabajo fue realizado a solicitud del gobierno del estado de Michoacán, debido a un proyecto que se pretendía consolidar al realizar plantaciones forestales en algunos municipios del estado, se accedió a realizar el presente estudio integral de esta especie en esta facultad, además, por la relevancia que tiene el conocimiento de las propiedades tecnológicas de nuevas especies para ser integradas a los proyectos de plantaciones forestales con fines industriales.

Por lo anteriormente expuesto, se considera importante hacer un análisis de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Acrocarpus fraxinifolius*, especie de rápido crecimiento, con fuste recto, características de gran importancia para la industria y que lo ponen como una de las principales especies en las plantaciones comerciales en México, Guatemala y otras partes del mundo, donde el clima favorezca su propagación.

3.- Antecedentes

En México se carece de información referente a las características Físicas y Mecánicas del *Acrocarpus fraxinifolius*, Por tal razón el presente estudio sirve de base para futuras investigaciones.

(Niembro Rocas 2003) La madera se usa en la construcción de casas y en la fabricación de muebles y embalaje de los casos.

(Menendez Huevo, 2005) Publicó pesos específicos (densidades) del *Acrocarpus fraxinifolius*, que van de 0.58 - 0.68 g/cm^3 sin revelar si corresponde a un peso específico anhidro, ya que también publicó, un peso promedio de 0.69 g/cm^3 al 12% de contenido de humedad, señalando que a mayor peso específico, mayor es la longitud de las fibras y que a mayor altura en el tronco, disminuye el peso específico de la madera.

(Honorato S, y col. 2005) Reportan una contracción tangencial de 7.19% y 2.86% de contracción radial.

(Tamarit Urias, y col. 2008) Reportan Densidad de 0.50 g/cm^3 ; Flexión Estática en condición verde del Módulo de Ruptura de 744 kg/cm^2 y en condición seca de 1,159 kg/cm^2 y para el Módulo de Elasticidad 105 kg/cm^2 condición verde, 122,100 kg/cm^2 en condición seca, sin especificar bajo que contenido de humedad se realizaron los ensayos; Dureza lateral de 752 kg/cm^2 ; Compresión sin especificar si es paralela o perpendicular a las fibras, solo especifica que es a una condición seca con 522 kg/cm^2 , y con 334 kg/cm^2 en condición verde, los estudios fueron en árboles de 12 años edad.

(Bárceñas Pazos y Ordoñez Candelaria 2008) Reportan una densidad de 0.45 g/cm^3 y una clasificación de moderadamente ligera.

4.- Objetivo.

- Determinar las propiedades Físicas y Mecánicas de la madera de *Acrocarpus fraxinifolius*.

4.1 Objetivos particulares

- Clasificación de la madera de acuerdo a sus propiedades físicas y mecánicas.
- Obtener información básica de estas propiedades y contribuir al conocimiento de una especie nueva.

5.- Marco teórico

5.1.- Propiedades Físicas de la Madera.

Las propiedades físicas de la madera dependen de tres factores principales:

1. La cantidad de elemento básico que forma las paredes celulares de la madera.
2. La disposición y orientación de los materiales que forman la pared celular.
3. La composición química del elemento básico que explica muchas diferencias cuantitativas en el comportamiento de la madera. (Echenique-Manrique y Robles Fernández, 1993).

Las propiedades básicas de la madera:

Anisótropa.- La madera no es un material homogéneo, sino un material muy heterogéneo según el plano o la dirección que se considere, Axial, Radial o Tangencial.

Higroscópica.- Capaz de aumentar o disminuir su volumen de agua según sean las condiciones a las que este expuesta.

Polar.- Por su carácter polar tiene afinidad con los productos polares como el agua, los pegamentos de carácter polar, los barnices etc. (Vignote Peña y Jimenez Peris, 1996).

5.1.1.- La humedad en árboles vivos

La madera en los árboles se encuentra en un ambiente acuoso. La estructura celular contiene excesiva agua (savia) y está completamente hinchada (Hoadley, 1980).

La humedad de la madera en árboles vivos varía en un 30 a 300 %. Esta variación es influenciada por diferentes factores, como la especie del árbol, posición de la madera en el árbol, y la estación del año (Tsoumis, 1991).

Desde el momento que una célula inicial del cambium vascular, se divide para formar nuevas células de xilema, comienza una íntima relación entre la madera y el agua que

se mantiene durante toda su vida. Las paredes celulares se forman en un medio acuoso y, al terminar la diferenciación de las células prosenquimatosas y su muerte, gran cantidad de humedad queda dentro las paredes celulares. Sin duda, la relación humedad-madera tiene una influencia decisiva sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera y los numerosos problemas que su uso implica (Echenique-Manrique y Robles Fernández, 1993).

5.1.2.- La humedad de la madera después de ser aserrada.

Se estima que más del 90% de los problemas con la madera está involucrada la humedad. Por esto no se debe dejar pasar por alto la relación básica madera-humedad (Hoadley, 1980).

Independientemente de la humedad contenida en la madera en el árbol vivo, al ser expuesta al ambiente resulta en una pérdida de humedad. La cantidad final perdida va a depender de las condiciones atmosféricas existentes. En orden inverso, la madera seca expuesta en un ambiente con una humedad relativa alta, o en contacto con agua líquida, absorberá humedad; por lo tanto, su contenido de humedad aumentará. La saturación tal vez aumente en valores muy altos, esto dependiendo en la densidad de la madera (Tsoumis, 1991).

El contenido de humedad de la madera verde, es decir, la del árbol recién derribado, varía según la especie, albura, duramen, sitio, edad y época del año en que se corta el árbol (Echenique-Manrique & Robles Fernández, 1993). Los contenidos de humedad de algunas maderas de Latino América varían de un 44 a un 249% para la albura, y de 33 a 98% para el duramen (USFPL 1974).

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, dado que, afecta a la mayoría de los procesos de transformación de la madera. Así, la humedad de la madera influye de forma determinante en la concepción de procesos tales como el aserrado, el cepillado, el encolado, el barnizado, etc. y sobre todo en sus dimensiones, es decir, que la madera varía sus dimensiones con el contenido de humedad, hinchándose cuando gana humedad y mermando cuando la pierde (Vignote Peña y Jimenez Peris, 1996).

5.1.3.- Contenido de humedad máximo.

El máximo contenido de humedad que la madera puede contener en las paredes celulares y cavidades celulares, dependerá del espacio disponible en la masa. Este espacio en la forma de cavidad celular vacía, es prácticamente expresado por densidad seca (Fig. 1); sin embargo, el espacio ocupado por el agua en la pared celular debería de sumarse (Tsoumis, 1991).

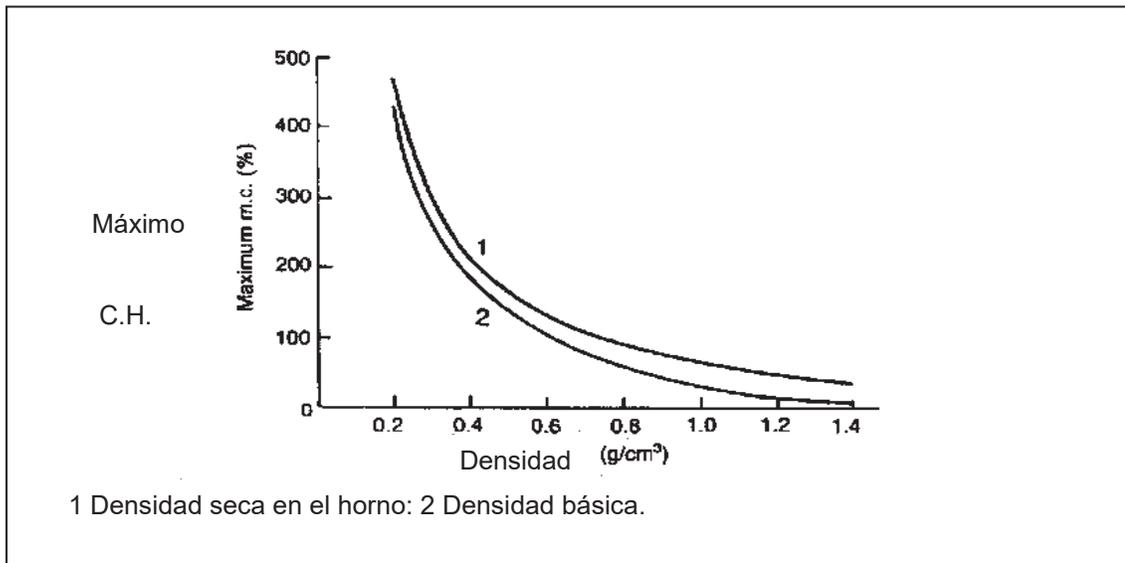


Figura 1.- Relación del máximo contenido de humedad y de la densidad de la madera (Tsoumis, 1991).

5.1.4.- Determinación del contenido de humedad

(Tsoumis, 1991), describe que el contenido de humedad de la madera se puede hallar por diferentes métodos. Los métodos directos son complicados por la separación de la humedad de la madera, mientras que la determinación por métodos indirectos, la humedad se mide directamente. Los principales métodos directos son: Deshidratación, pesado (Fórmula 1) y destilación. En los métodos indirectos, la humedad es medida manualmente por un medidor de humedad eléctrico. De acuerdo a esta relación, el contenido de humedad se puede determinar con la siguiente:

Fórmula 1.- Para el cálculo del Porcentaje de Contenido de Humedad.

$$CH \% = \frac{PI-PA}{PA} * 100$$

Donde:

CH= Contenido de humedad (%)
PI= Peso inicial de la madera (g)
PA = Peso de la Madera Anhidra (g)

El contenido de agua de la madera, se mide como el cociente del peso de agua en un pedazo dado de madera, al peso de la madera cuando es totalmente anhidra. El peso del agua liberada de la madera usualmente hace referencia al peso en horno seco, ya que secar la madera en horno, es el método más común para conocer este contenido de agua. Tradicionalmente el contenido esta expresado en porciento de contenido de humedad (Hoadley, 1980).

El método de secado al horno es lento y no se recomienda para las especies que tienen contenidos relativamente altos de sustancias volátiles como resinas, aceites o grasas. (Echenique-Manrique y Robles Fernández, 1993), para este tipo de maderas con altos contenidos de materiales volátiles se recomienda el método por destilación. (McMillen, 1956: ASTM, 1986a).

5.1.5.- Contracción e Hinchamiento

La contracción e hinchamiento de la madera, se ven afectados por muchos factores, tal como la humedad, densidad, estructura anatómica, extractivos, composición química y esfuerzos mecánicos. La densidad, estructura, extractivos, y composición química (con sus respectivas limitantes) afecta de forma diferente entre las especies de madera. La contracción es reducción, el hinchamiento es un incremento de las dimensiones de la madera debido al cambio en su contenido de humedad. Tales cambios dimensionales ocurren cuando la humedad de la madera fluctúa por debajo del punto de saturación de la fibra; los cambios de humedad por encima de este punto, independientemente de su magnitud, no tendrán efecto en las dimensiones. La madera es anisotrópica con respecto a la contracción e hinchamiento (la reducción o incremento de las dimensiones, por el mismo cambio del contenido de humedad, es diferente en las direcciones del crecimiento del árbol). Específicamente, los cambios dimensionales son menos en el sentido longitudinal (a lo largo de la troza del árbol), más grande en el sentido radial (de la médula a la corteza), y todavía más grande en sentido tangencial por los anillos de crecimiento (Fig. 3). La diferencia de la contracción e hinchamiento en

las diferentes direcciones de crecimiento se debe principalmente a la estructura de la pared celular.

Como se muestra en la Figura 2 la pared celular está formada por una pared primaria y una secundaria. La pared primaria es muy delgada, y la secundaria está compuesta por tres capas (S1, S2, S3) con diferente orientación de las microfibrillas.

En la capa exterior (S1) y la interior (S3), las microfibrillas están orientadas casi transversalmente a lo largo de la célula, mientras que la central (más gruesa) capa (S2) está casi paralela a lo largo de la célula (Fig. 2). Cuando la humedad es adsorbida, la capa media (S2) tiende a hincharse en proporción al número de microfibrillas (en proporción si ésta es delgada), pero las otras dos capas (S1 y S2) ejercen una contracción por la diferencia de orientación de las microfibrillas. La contracción axial (longitudinal) que es pequeña se debe a la orientación de las microfibrillas de la capa S2. Si éstas microfibrillas fueran precisamente paralelas, longitudinalmente la contracción sería nula. Este cambio tan pequeño se da por la poca desviación paralela. La verdadera razón por la cual existe diferencia entre la contracción e hinchamiento en forma radial y tangencial se desconoce aún. Se hacen varias atribuciones pero con exactitud no se sabe. (Tsoumis, 1991).

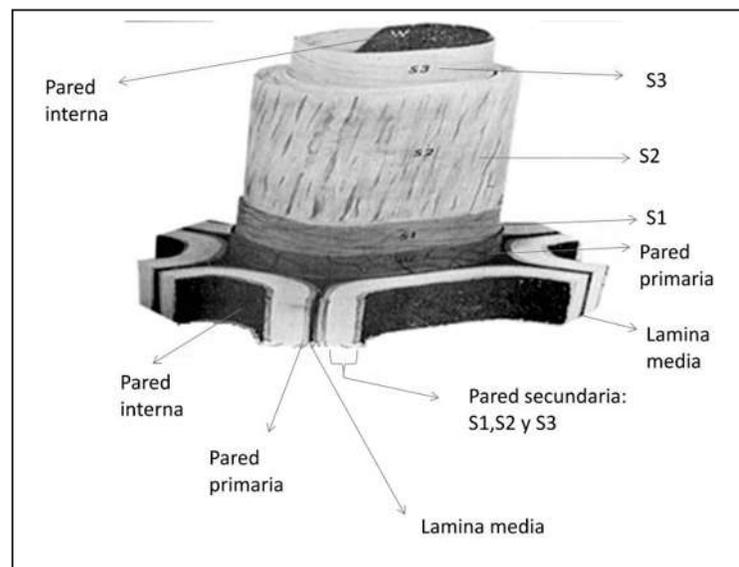


Figura 2 Capas de la pared celular de una traqueida o fibra (Tsoumis 1991)

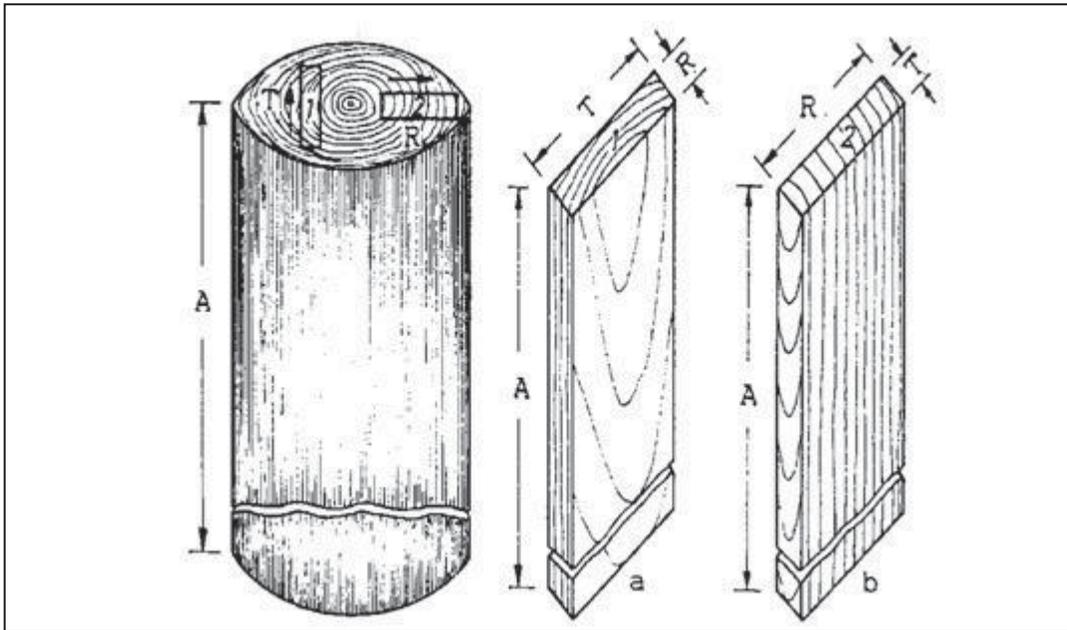


Figura 3 Direcciones Axial (A), Tangencial (T), y Radial (R) en madera rolliza y aserrada. Se observa diverso arreglo y figura de los anillos de crecimiento en madera aserrada siendo *a* corte tangencial y *b* corte radial

Se pueden definir los fenómenos de contracción y expansión, como la disminución y el incremento de dimensiones de la madera por unidad de longitud o de volumen que ocurren durante la desorción y adsorción respectivamente. (Echenique-Manrique y Robles Fernández, 1993) citan también a (Stamm, 1964) que expresa el cambio dimensional en porcentaje con la siguiente:

Fórmula 2.- Cambio dimensional en por ciento.

$$C = \frac{A-B}{A} * 100$$

Donde:

C = Cambio dimensional en por ciento.

A = la dimensión mayor, generalmente la que la pieza tiene cuando su contenido de humedad es superior al punto de saturación de la fibra.

B = la dimensión menor, generalmente la que la pieza tiene cuando su contenido de humedad es inferior al punto de saturación de la fibra.

La contracción de la madera tiene diferentes valores según la dirección que se considere. Así en dirección axial la contracción es prácticamente inapreciable, mientras que en dirección radial (r) y tangencial (t) es grande, siendo esta última de 1.5 a 2 veces más grande que la primera. Cuanto más iguales sean ambas contracciones, menos tensiones se producen en la madera y más estabilidad tendrá. Por ello, el valor de la relación entre ambos coeficientes de contracción lineal, sumarán o restarán los problemas de estabilidad que presenta el coeficiente de la contracción de la madera. Maderas con relación entre coeficientes $R \frac{t}{r} > 2$ presentan elevada tendencia de deformación por acanalado, siendo problemática su utilización en muebles y carpintería (Vignote Peña y Jimenez Peris, 1996).

5.1.6.- Densidad

(Relación: Peso seco / Volumen verde)

El peso específico de la madera ha sido la primera de sus propiedades físicas estudiadas; la aparente sencillez de su determinación y la opinión generalmente aceptada, desde Buffon y Duhamel du Monceau, de que era en el peso específico donde mejor se podría apreciar la calidad de la madera como material de construcción, iniciaron e impulsaron indudablemente las investigaciones sobre dicha propiedad. Por razones técnicas, debe utilizarse únicamente el peso específico aparente anhidro, por ser el único valor, ya que es seguro e invariable (Kollman, 1959).

Esta característica física influye de forma muy directa en casi la totalidad de las características físicas y mecánicas, y por lo tanto, es muy importante. La densidad, es importante en procesos como el secado, en el que a medida que la madera es más densa, más agua contiene (para la misma humedad de la madera) y más energía y tiempo cuesta en eliminarse. Así, en la obtención de pasta, se obtendrán mayores rendimientos con madera densas que ligeras (dado que se compra por volumen y se vende por peso). De la misma forma, la utilización de la madera en la obtención de energía es más indicada cuanto más densa sea (Vignote Peña y Jimenez Peris, 1996).

La densidad de la madera se ve influenciada por la humedad, la estructura, los extraíbles y componentes químicos. La densidad de la madera es la medida de “la cantidad de material en la pared celular contenida en un cierto volumen, y da referencia de el volumen vacío”. Las diferencias en la densidad y el volumen vacío se deriva por las diferencias anatómicas, tal como los diferentes tipos de células (traqueidas, vasos y células de parénquima), la cantidad en que están estas distribuidas, lo grueso de la pared celular y el tamaño de la cavidad celular. La variación de la densidad existe en el mismo árbol, entre árboles de la misma especie, y entre especies. (Tsoumis, 1991).

5.2.- Propiedades Mecánicas de la madera.

Las propiedades mecánicas de la madera, son medidas por su resistencia a esfuerzos exteriores, las cuales tienden a deformar la masa. La resistencia de la madera a tales fuerzas depende de la magnitud y el modo de la carga (tensión, compresión, cortante, flexión etc.). En contraste con los metales y otros materiales de estructura homogénea, la madera muestra diferentes propiedades mecánicas en sus diferentes direcciones de crecimiento (Axial, Radial y Tangencial) y por lo tanto, ésta es mecánicamente anisotrópica. Las propiedades mecánicas de la madera son afectadas por varios factores principalmente, humedad, densidad, temperatura, duración de la carga y defectos. En la figura 4, se presentan las muestras de acuerdo a los estándares americanos (ASTM): 1 tensión axial, 2 tensión transversal, 3, cortante 4 rajaduras, 5 compresión axial, 6, compresión transversal 7, dureza axial, 8 dureza lateral, 9 flexión estática, (las muestras están representadas esquemáticamente, no en escala). (Tsoumis 1991).

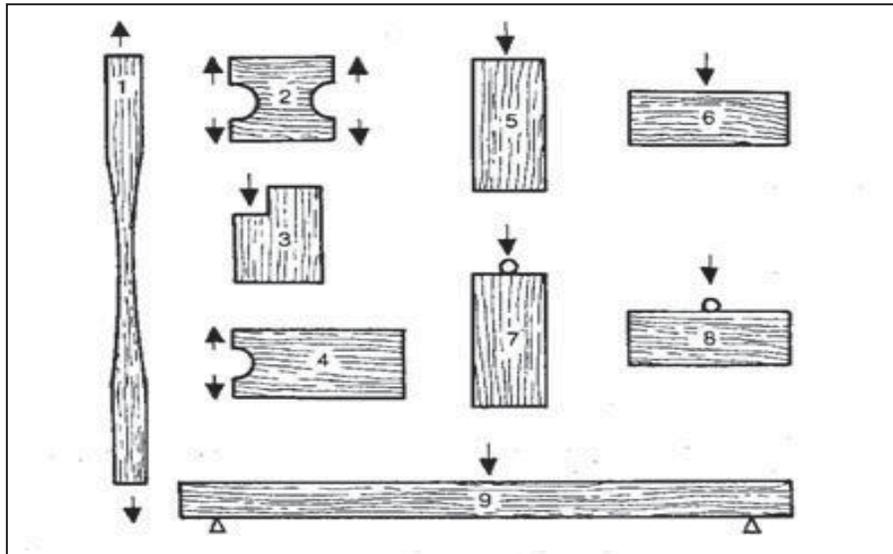


Figura 4 Representación esquemática de las muestras y la forma de cargar para la determinación de las propiedades mecánicas de la madera

La tensión máxima que la madera puede resistir, depende de la clase y de la condición de la madera y si las tensiones actúan a lo largo o a través del grano. El término esfuerzo se ha usado en muchos sentidos, incluyendo todas las características mecánicas, pero se utiliza más a menudo en un sentido más limitado el cual no incluye las características de rigidez tales como dureza y rajadura. La primera serie de recopilación de datos, fue muy pequeña, fue hecha en base al décimo informe del censo (1880) bajo dirección de la C. S. Sargent. Desde entonces, el Servicio Forestal ha realizado ciertas pruebas en cooperación con varias universidades de diferentes estados, pero la serie más comprensiva de tal prueba se está haciendo en el laboratorio de los Productos Forestales patrocinado en cooperación con la Universidad de Wisconsin en Madison. Éstas pruebas se hacen sobre todo en pedazos pequeños libres de defectos, de 2 por 2 pulgadas en la sección representativa para obtener los datos confiables para la comparación, pero algunas pruebas también se hacen en vigas y columnas más grandes para aprender el efecto de debilitamiento de defectos de varias clases. En estas pruebas, la influencia de los factores tales como el peso seco de la madera, el contenido de agua, el índice de crecimiento, la posición en el árbol, y el lugar del cual se extrajo el árbol se toman en consideración (Koehler, 1924).

5.2.1.- Esfuerzo a la tensión

El esfuerzo a la tensión de un material esta en base a su resistencia a las fuerzas que tienden a separarlo. La madera demuestra su esfuerzo a la tensión más elevada a lo largo del grano. De hecho, es tan fuerte que es excesivamente difícil tirar de la madera longitudinalmente y arrancar un pedazo, puesto que los pernos u otras cerraduras cortarían generalmente hacia fuera en los extremos antes de que la madera falle en la tensión. Es por eso que es necesario hacer las cerraduras a un margen determinado de los extremos, la madera se utiliza raramente donde se desarrollan tensiones de alta resistencia, para estos casos las barras, los cables, o las cadenas de acero son las utilizadas (Koehler, 1924).

Las fallas perpendiculares al grano se observan cuando partimos la leña, cuando los clavos se conducen en la madera inflexible, cuando los tableros ahuecados están en un plano forzado, cuando se realiza una demostración del karate y cuando se cepilla a lo largo, el recorte que se levanta de la cara de la pieza cepillada. Pero se considera que se cuenta con el conocimiento suficiente de la debilidad de la madera en este respeto, para diseñar y usar la madera y evitar tales fallas. Quizás las fallas en tensión más comunes y entendidas son debido al cambio dimensional desigual. Los agrietamientos en las caras transversal radial o tangencial y el apanalamiento son ejemplos clásicos, al igual que las grietas radiales que abarcan la médula (Hoadley, 1980).

El esfuerzo de la madera a la tensión se considera diferente si la carga es axial (paralela al grano) o transversal. La tensión paralela al grano, es mucho más elevada arriba de 50 veces o más que la transversal. En la dirección transversal la influencia de las cargas radiales o tangenciales no son estables. Los valores de esfuerzo en la tensión paralela de las diferentes maderas varían entre 50 a 160 N/mm^2 , mientras que en la tensión transversal tiene un rango de 1-7 N/mm^2 . En algunas maderas tropicales, la tensión paralela alcanza los 300 N/mm^2 . Cada célula (coníferas: traqueidas, latifoliadas: fibras) presenta una elevada tensión paralela 200-1300 N/mm^2 , y el esfuerzo de las microfibrillas es a un más alto. El esfuerzo de la cadena de celulosa está teóricamente estimado en 7500 N/mm^2 . La sucesiva reducción del esfuerzo de la cadena de celulosa con la madera se da por la desviación de la cadena de celulosa y

las microfibrillas debido al paralelismo del eje del árbol, y por el bajo esfuerzo de las sustancias entre las cadenas de celulosa, microfibrillas, y células. Estas sustancias son hemicelulosas, lignina, sustancias pécticas y extractivos (Tsoumis, 1991).

5.2.2.- Compresión paralela y perpendicular al grano.

Una descripción sencilla que (Hoadley, 1980) hace para la compresión en la madera:

- **Compresión paralela:** Cuando la madera se tensiona de una forma que acorta sus fibras longitudinalmente, está bajo la compresión paralela al grano, como en una columna que apoya un pórtico.
- **Compresión perpendicular:** Cuando los objetos pesados se apoyan sobre la superficie de una mesa de madera o en un piso de madera, aplican cargas (igual a su peso) ejerciendo en la madera compresión perpendicular al grano.

Los valores publicados para las características de esfuerzo, expresan comúnmente un sólo valor para el esfuerzo a la compresión perpendicular al grano, que es el promedio de esfuerzos radiales y tangenciales. En algunas especies puede haber diferencias insignificantes entre los dos valores. En otras, sin embargo, la estructura anatómica puede dar lugar a diferencias radiales y tangenciales significativas. Por ejemplo, en maderas duras la porosidad de los anillos tales como Pino de Oregón o Abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), un pedazo tensionado en la dirección radial será no más fuerte que la capa más débil de madera temprana (Hoadley, 1980).

La resistencia de la madera a la compresión paralela a las fibras está involucrada en muchos usos como columnas, postes, patas de muebles y otros. Con excepción de algunas maderas duras en las que la resistencia a tensión y compresión son del mismo orden, la resistencia a compresión de la madera en dirección paralela a las fibras varía aproximadamente de la mitad a una tercera parte de su resistencia a tensión en la misma dirección. La resistencia a la compresión perpendicular a las fibras está íntimamente ligada a la dureza y a la resistencia al corte perpendicular a las fibras. Es frecuente que se tomen los resultados de pruebas de dureza como índice de la resistencia a este tipo de acción (Echenique-Manrique y Robles Fernández, 1993).

El esfuerzo de la madera a la compresión también es diferente si las cargas son aplicadas paralelas o transversales al grano. El esfuerzo a la compresión paralela es alto (-arriba de 15 veces-) y varía entre 25 y 95 N/mm^2) mientras que los valores para transversal varía entre 1 y 20 N/mm^2). Se ha observado, que en maderas de coníferas, el esfuerzo a la compresión tangencial es más alto que la radial, mientras que la situación en las maderas de latifoliadas es opuesta (Tsoumis, 1991).

5.2.3.- Esfuerzo a la flexión (Flexión estática.)

No hay capítulo completo sobre esfuerzo de la madera sin una discusión de la flexión o del comportamiento a la flexión. El desarrollo natural del árbol hace una combinación de columna y viga, y no es para sorprenderse de la maravillosa eficiencia cuando carga a compresión paralela al grano o en la flexión (perpendicular al grano). Se tiene la ventaja más grande de la fuerza de la madera cuando se utiliza bajo la forma de vigas. Entender la mecánica de las vigas es fundamental para el diseño estructural, y es algo complicado. Considérese un centro de carga, simplemente soportado por una viga. La flexión resultante de la carga tiende a acortar o a comprimir la superficie superior y estirar la superficie más baja. Las tensiones desarrolladas son tensiones axiales: compresión a lo largo de la superficie superior, tensión a lo largo de la superficie más baja. Ambas tensiones son máximas en las superficies y disminuyen a cero en el plano horizontal central de la viga, que se llama el eje neutral. Las tensiones axiales superficiales más grandes ocurren en el centro y disminuye a cero hacia los extremos de la viga. Esta tensión axial y esfuerzo de la compresión se llaman esfuerzos de flexión, o esfuerzo de la fibra. En los materiales tales como acero, que tienen resistencia igual en la compresión y la tensión, las tensiones de flexión en las superficies superiores y más bajas son iguales (Hoadley, 1980).

El esfuerzo a la flexión estática es una propiedad mecánica muy importante, porque en la mayoría de las estructuras de madera están sujetas a cargas que le causan flexión. El esfuerzo de la madera a la flexión es usualmente expresado por el módulo de ruptura, el cual muestra el más alto esfuerzo en las fibras externas de la madera, cuando la viga se trueno bajo la influencia de la carga, cuando ésta es aplicada, gradualmente por unos cuantos minutos. El módulo de ruptura varía entre 55 y 160

N/mm^2 , mientras, los módulos del esfuerzo a la flexión y el esfuerzo a la tensión paralela tiene similitud. Por tal razón, se pueden usar los módulos para ambos cuando se carezca de alguno de ellos. (Figura 5) P: + Compresión y - tensión, N, plano neutral. La distribución de los esfuerzos a tensión y compresión se muestra gráficamente (derecha) de acuerdo a la sección transversal de la viga. (Tsoumis, 1991)

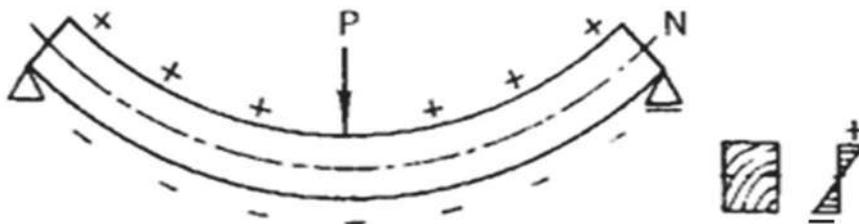


Figura 5 Los esfuerzos en una viga bajo la acción de la carga

La acción crítica en miembros sometidos a cargas transversales, como las vigas, suele ser la flexión. Debido a la estructura y propiedades particulares de la madera, las vigas de este material se fabrican de manera que las fibras queden orientadas perpendicularmente a las fuerzas transversales que deben soportarse, es decir, las fibras deben quedar paralelas al eje longitudinal de la viga. En estas condiciones, la madera resiste acciones flexionantes con gran eficiencia, ya que la relación entre su rigidez en flexión y su peso es alta (Echenique-Manrique y Robles Fernández 1993).

5.2.4.- Rajaduras.

La facilidad con la cual la madera se raja depende más de la dirección de las fibras que cualquier otra propiedad. La madera de grano recto generalmente se raja más fácilmente que la radial y tangencial, pero en maderas con grano entrecruzado es al revés. La madera verde se raja más fácilmente que la madera seca. El peso de la madera no tiene ninguna relación consistente con la facilidad para rajarse (Koehler, 1924).

La resistencia de la madera para rajarse se refiere a las fuerzas actuando hacia el exterior como lo haría una cuña. Debido a su estructura, la madera tiene una resistencia paralela a la rajadura baja (fácil de rajarse). Esto es una ventaja para ciertos usos (raja

para leña) y es una desventaja para otros (rajarse la madera por clavos o tornillos). Los diferentes tipos de madera poseen una resistencia diferente para la rajadura. La resistencia es baja cuando la carga es aplicada en una cara transversal y en dirección radial (debido a la presencia de los rayos). La prueba de rajadura es similar al de tensión transversal (una muestra similar es usada) y los valores para la rajadura son expresados en N/mm (newton por mm de ancho de la cara de la rajadura.) (Tsoumis, 1991)

5.2.5.- Dureza (Dureza janka.)

La dureza de la madera es una medida de su resistencia a la penetración. También indica la resistencia al desgaste, aunque el último también es influenciado por la cohesión de las fibras. Hay poca diferencia en las medidas para la dureza en las caras radiales y tangenciales, pero la dureza de los extremos es mayor que la dureza lateral. Por esta razón, los bloques para piso se terminan por los extremos y se hacen los mazos de modo que el grano del extremo reciba el golpe. La dureza de la madera puede aumentar, secándola a un contenido de humedad casi anhidro y después impregnándolo con resina de alto grado de fusión o parafina (Koehler, 1924).

La dureza, es una medida de la resistencia de la madera para que un cuerpo exterior penetre su masa. La resistencia es alta, arriba del doble en la dirección paralela que las de los lados, pero la diferencia entre la cara radial y tangencial raramente son importantes. La dureza es relacionada en el esfuerzo de la madera por la abrasión y ralladura con varios objetos. Así como lo fácil o difícil para trabajar la madera con herramientas y máquinas (Tsoumis, 1991).

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 blando, aunque en algunos aspectos se puede considerar un defecto (facilidad de rayado y por tanto de pérdida de apariencia de la superficie) tiene como ventajas, su facilidad de procesado (corte, unión). La dureza es muy importante a la hora de estimar la trabajabilidad de la madera. Las maderas muy duras, incluso las clasificadas como duras, no son comerciales, salvo casos excepcionales, debido al gran esfuerzo que

debe aplicarse en su mecanización. Por el contrario, ciertos usos, como la carpintería, sobre todo el parquet, o el mueble, exigen un mínimo de dureza lo que excluye a las maderas muy blandas (Vignote Peña y Jimenez Peris, 1996).

5.2.6.- Extracción de clavos.

La resistencia de un clavo al ser retirado directamente de un pedazo de madera está íntimamente relacionada con la densidad o la gravedad específica de la madera, del diámetro del clavo, y de la profundidad que ha penetrado. La condición superficial del clavo y el tipo de caña y punta también influenciarán la resistencia a ser retirado. Los valores dados están para los clavos conducidos perpendicularmente al grano de la madera. Cuando el clavo es conducido paralelo a las fibras de madera, en el extremo de la probeta, la resistencia a la extracción en las maderas suaves puede ser de un 75 o igual a un 50 % de la resistencia obtenida cuando los clavos son dirigidos perpendicularmente al grano. La dirección en la cual se conduce el clavo tiene menos influencia en la resistencia al retirarlo en maderas densas que en maderas más suaves. Al conducir el clavo de manera inclinada en la madera, la resistencia a la extracción generalmente es superior que cuando se hace conducir derecho (Laboratory, Treeseach, 1965).

La resistencia del clavo a la extracción directa de un pedazo de madera depende de la densidad de la madera, del diámetro del clavo, y de la profundidad de la penetración. La condición superficial del clavo a la hora de la extracción también tiene influencia a la resistencia inicial del retiro. Para clavos comunes, brillantes de alambre conducidos en el grano lateral de la madera seca o madera verde, los resultados en muchas pruebas han demostrado que la máxima carga de extracción está dada por la siguiente:

Fórmula empírica 3 Carga máxima para clavos comunes.

$$P = 54.12G^{5/2} \text{ DL; (sistema métrico)}$$

Donde:

P: Carga máxima para clavos (N)

L: Profundidad (milímetros) de la penetración del clavo en el miembro desde la punta del clavo.

G: Gravedad específica de la madera basada en el peso anhidro y el volumen a un 12% de contenido de humedad.

D: Diámetro del clavo (milímetros).

Los resultados por la ecuación representan los datos medios. Los valores de ciertas especies de madera en sus pruebas, comparados con los de la ecuación son algo mayor o menor en valor. (Soltis, 1999).

6.- Materiales y Métodos

6.1.- Descripción general de la localidad, de donde fueron derribados los arboles de *Acrocarpus fraxinifolius*

La madera proviene del predio Finca las muñecas, del Municipio Venustiano Carranza, en el Estado de Puebla (Fig. 6).

Situación política:

- A. Paraje: Kilómetro 20 de la brecha Lázaro Cárdenas-Mecapalapa
- B. Predio: Finca Las Muñecas
- C. Municipio: Venustiano Carranza.
- D. Entidad Federativa: Puebla

Situación Geográfica:

- A. Latitud: 20° 30' 49' N
- B. Longitud: 97° 51' 03' O
- C. Altitud: 450 m.s.n.m.
- D. A 45 Km. al Oeste de Poza Rica en dirección a Tulancingo sobre la carretera Tulancingo-Tuxpan se encuentra la desviación en la Villa Lázaro Cárdenas para Mecapalapa la cual da al sitio.

Tipo de Clima

Cálido Húmedo con abundantes lluvias en verano.

La temperatura media anual

Es de 22° C a más de 24° C.

La precipitación total al año.

Varía entre 1200 y 2500 mm, el porcentaje de lluvia invernal es mayor de 10.2 %

Topografía

- A. Relieve general: Ondulado.
- B. Situación del Bosque: Fondo de Valle
- C. Pendiente: Entre 6 y 10°
- E. Presencia de arroyos, escasos permanentes

Suelo

- A. Origen aluvial y coluvial
- B. Superficie desprovista de vegetación: El área es una plantación Forestal, rodeada de pastizales inducidos
- C. Afloramiento y tipo de roca: Los depósitos aluviales están constituidos por arcillas, limos arenas y gravas no consolidados. Hay también clásticos de caliza, arenisca y pedernal y rocas volcánicas.
- D. Espesor de la hojarasca: 10 cm.
- E. Espesor del humus: 15 cm.
- F. Textura: En el primer horizonte (0-30 cm.): Arcilloso media; arcilla 28%; limo 18% y arena 54%; y en el segundo horizonte (30-100 cm.) media 36% migaron de arcilla y 64% arenoso
- G. Drenaje Superficial: Medio

Otros Datos

El sitio se encuentra entre la planicie costera del Golfo y la Subprovincia de Sierras Altas de la Sierra Madre Oriental.

La región corresponde a la cuenca del Río Cazonas.

Presenta un coeficiente de escurrimiento del 20 al 30%

Geológicamente corresponde a depósitos aluviales del Cuaternario

Se encuentra en una etapa de madurez para una región húmeda

Aledaños a los aluviones se encuentran lomeríos con lutitas

Los suelos dominantes en el sitio son:

1. Vertisol pelico + cambisol vertico
2. Regosol calcárico + feozem calcárico + cambisol calcarico.

Son suelos profundos mayores a 100 cm.

En cuanto a la vegetación natural está se encuentra notablemente alterada, hay algunos remanentes de Selva Alta Perennifolia con Vegetación Secundaria. Las especies que se pueden ver son *Pisidium sartorium* (capulín); *Eugenia sp.* *Guazuma ulmifolia*; *Leucaena esculenta*; *Nectandra sp.* ; *Cassia sp.* *Eupatorium sp.* ; Sin embargo, la mayor parte de la región está cubierta de pastizales inducidos con *Cynodon*; *Digitalia*; *Echinochloa*, *Paspalum*; para criar ganado Cebú.

Algunas pocas fincas cultivan café de baja calidad por la altitud a la que se encuentra.
(Kuranin, 2001)

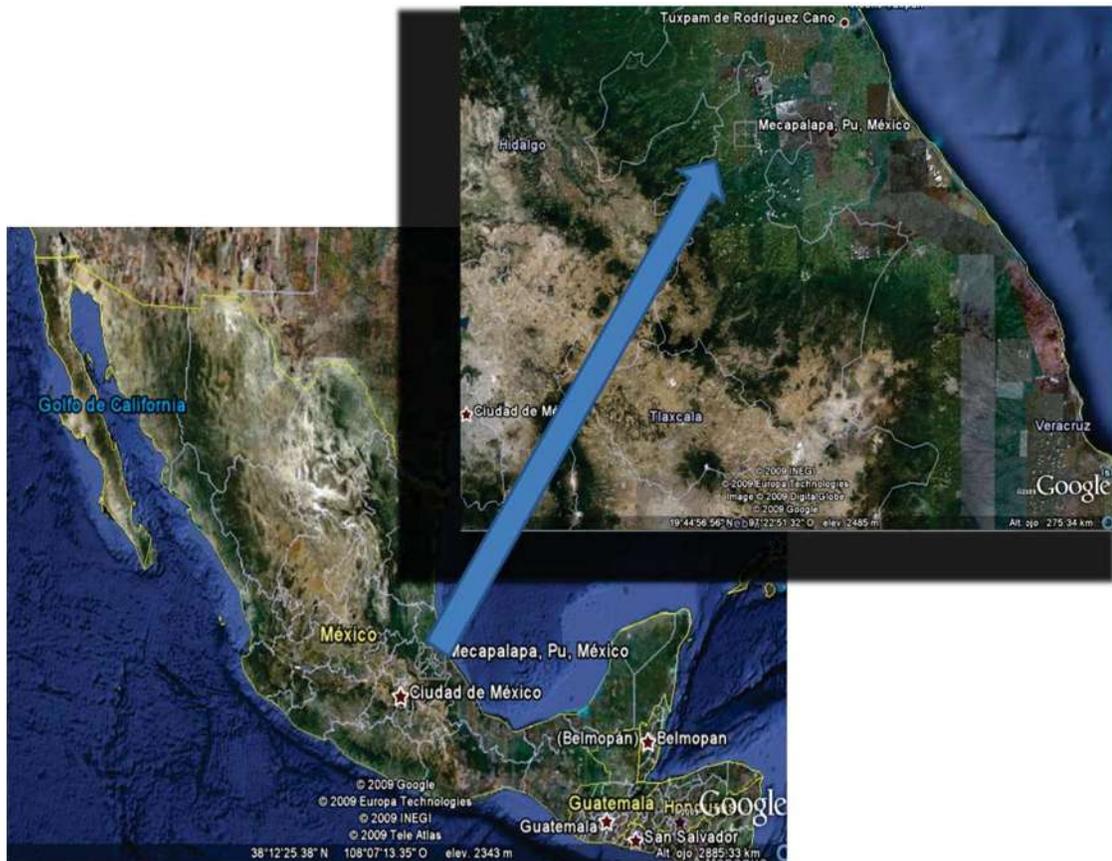


Figura 6 Ubicación geografía de la localidad de donde procede la madera.

6.2.- Metodología

El desarrollo experimental se realizó en el laboratorio “Francisco Carreón Reyes” en el Área de Física y Mecánica de la Madera de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, el cual cuenta con un aserradero equipado con sierras bandas, de banco, radiales y todo lo necesario para obtener las probetas para los diferentes ensayos. Se cuenta también con dos estufas de secado una experimental de 1 m³ y la otra Industrial de 10000 PT de capacidad, horno eléctrico para deshidratar probetas pequeñas para conocer lo referente al contenido de humedad, una máquina universal para realizar ensayos que permitan determinar las propiedades mecánicas en las maderas, así como toda la infraestructura que se requiere para desarrollar diferentes tipos de investigaciones a nivel micro y macro de la estructura de la madera.

El proceso de la investigación se inicio determinando el Contenido de humedad, la cual, se encontraba la madera inicialmente, el cual fue de un 72% y antes de comenzar el secado en la estufa era de 38% promedio. Debido a que se carece de programas de secado y por tener similitud en cuanto a densidad con el fresno esta fue secada con este programa de secado diseñado por Robert Hildebrand. El comportamiento de la madera durante el secado fue impredecible, presentando fuertes contracciones internas, que se mejoraron con el control de la humedad relativa dentro de la cámara de secado. El contenido de humedad final se estabilizó en 13%, quedando la madera lista para obtener las probetas para el estudio de sus propiedades físico-mecánicas y de preservación

El material se aserró para obtener listones dispuestos de tal manera para obtener cortes perfectos radiales y tangenciales (Fig. 7), para conservar la pieza sin deformación. Los diámetros de las trozas variaron de 15 a 25 centímetros. El material (Fig. 8), asignado a la determinación de la contracción fue separado y preparado en su estado verde. El resto de material para las pruebas mecánicas y de preservación se aserró, posteriormente fue secado a un contenido de humedad del 12 % en una estufa de

secado para después obtener las diferentes probetas para su respectivo estudio mecánico y de preservación.

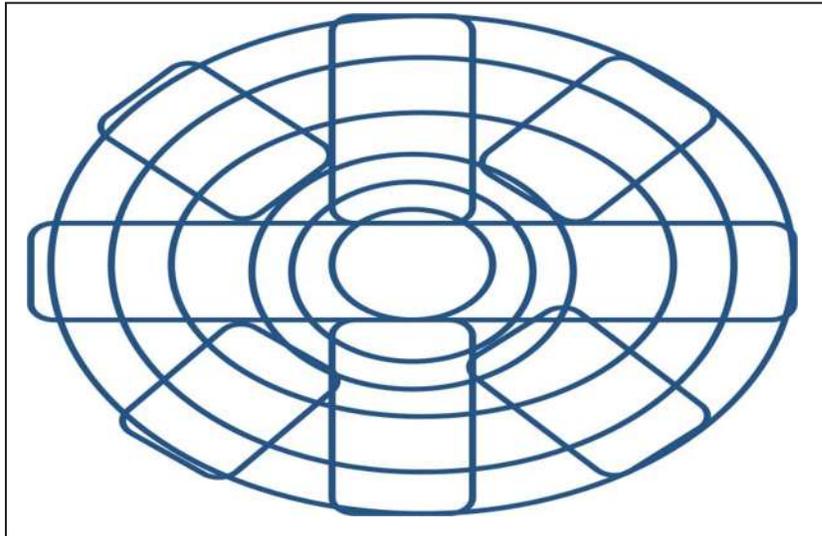


Figura 7 Aserrado de las trozas con cortes orientados radialmente.



Figura 8 Listones aserrados, orientados radial y tangencialmente.

6.3 Determinación de las propiedades Físicas.

6.3.1.- Determinación de la Contracción.

Para la contracción se cortaron 20 probetas (Fig. 9), dimensionándolas a 2.5 cm X 2.5 cm x 10 cm de acuerdo a la norma ASTM D-143 (1994). Las medidas se realizaron con un vernier con una precisión de 0.01 mm y un margen de error de ± 0.03 %. Las contracciones que se determinaron fueron la Radial, Tangencial y Longitudinal.

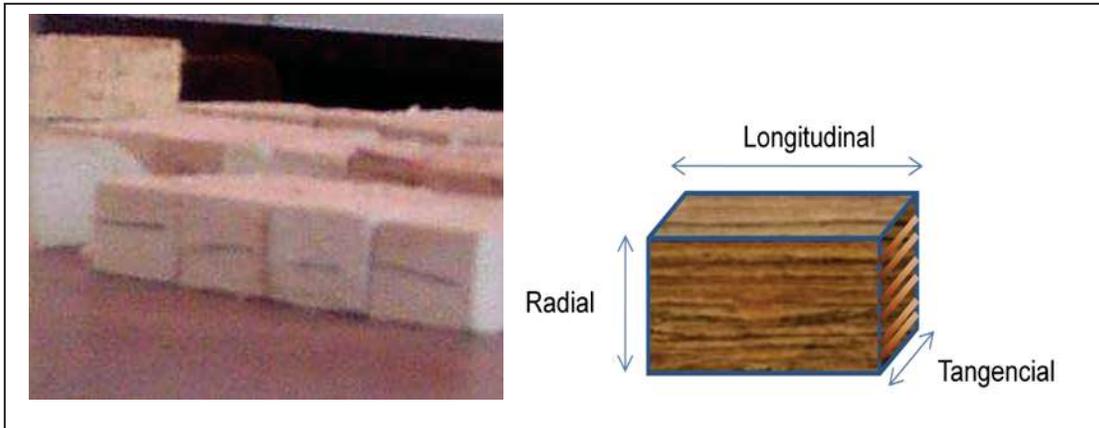


Figura 9 Dirección de las medidas de la contracción en las muestras.

Para el cálculo de la contracción en los diferentes sentidos de la madera se utilizó la siguiente:

Fórmula 4: Contracción

$$B\% = \frac{l1 - l2}{l1} \times 100$$

Donde:

B = Contracción en el sentido en el que se pretende medir ésta variable (En porcentaje)

l1 =Dimensión (inicial) verde, radial, tangencial o longitudinal

l2 =Dimensión (final) seca, radial, tangencial o longitudinal

6.3.2.- Cálculo de la Densidad Básica

El cálculo de la densidad fue hecho en base a la relación peso seco/volumen verde tomando muestras de cada una de las trozas de cada árbol, las mediciones fueron hechas con un vernier digital con una precisión de 0.01mm. de ± 0.03 %. Para conocer

el peso se utilizó una balanza digital con una precisión de 0.01 g. La deshidratación de las muestras se realizó en un horno de secado eléctrico marca Feliza a una temperatura de $103^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$ hasta un peso constante. Para el cálculo de la Densidad Básica de la madera se utilizó la siguiente:

Fórmula 5 Densidad Básica

$$\sigma_b = \frac{P_o}{V_v} = \text{g/cm}^3$$

Donde:

σ_b = Densidad básica: relación peso seco volumen verde.

P_o = Peso anhidro.

V_v = Volumen verde.

6.3.3.- Determinación del Contenido de Humedad.

Para determinar del contenido de humedad, se utilizó una balanza digital marca Sartorius, con una capacidad de 600 g, y una precisión de 0.01 g. La deshidratación de las muestras se realizó en un horno de secado eléctrico marca Feliza a una temperatura de $103^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$ hasta un peso constante.

Para determinar el porcentaje del contenido de humedad de la madera se utilizó la siguiente:

Fórmula 6 Contenido de Humedad

$$\% \text{ C.H.} = \frac{\omega_h - \omega_0}{\omega_0} \times 100 = \%$$

Donde:

$\text{C.H.} \%$ = Porcentaje de Contenido de humedad

ω_h = Peso húmedo (inicial)

ω_0 = Peso anhidro (final)

6.4.- Determinación de las Propiedades Mecánicas.

Los ensayos fueron realizados en una máquina universal de marca “Shimadzu” de 10,000 Kg de capacidad, con velocidad de carga variable, y con graficador carga-deformación (Fig.10), instalada en el Laboratorio de Pruebas Físico Mecánicas de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera.



Figura 10 Maquina Universal Shimadzu, 10 toneladas de capacidad.

6.4.1.- Determinación de la Flexión Estática

Las dimensiones de las probetas (Fig. 11), fueron conforme a la norma ASTM-D143 (1994). De 1 plg. (2.5 cm) X 1 plg. (2.5 cm) X 16 plg. (41 cm). Los ensayos se realizaron en la Maquina Universal a un rango de carga de 0.5 toneladas y 2:1 de elongación, el número de probetas ensayadas fue de 34.

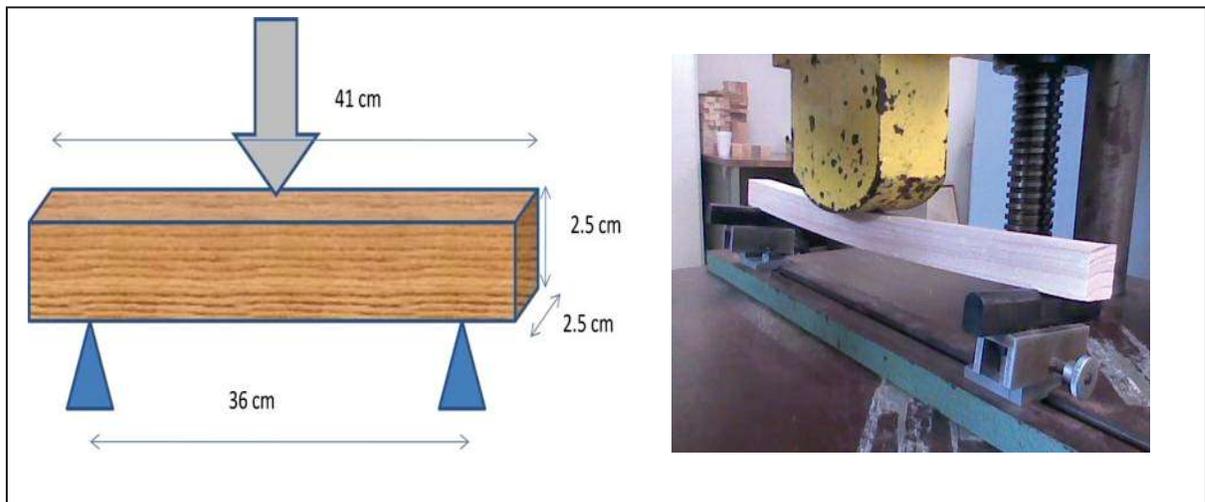


Figura 11 Flexión Estática

Los esfuerzos calculados para este ensayo fueron SLP Esfuerzo al límite de proporcionalidad, R Módulo de ruptura, E Módulo de Elasticidad, de acuerdo a las siguientes:

Fórmulas 7 Esfuerzo Flexión, SLP, R, E.

Esfuerzo al límite de proporcionalidad

$$SLP = \frac{3P'L}{2ba^2} = \text{kg/cm}^2$$

Donde:

SLP = Esfuerzo al límite de proporcionalidad.

P' = Carga al límite de proporcionalidad.

L = Claro entre apoyos.

b = Alto.

a = Ancho.

Módulo de ruptura.

$$R = \frac{3PL}{2ba^2} = \text{kg/cm}^2$$

Donde:

R = Módulo de ruptura.

P = Carga aplicada al momento de la falla.

L = Claro entre apoyos.

b = Alto.

a = Ancho.

Módulo de elasticidad.

$$E = \frac{P'L^3}{4ba^3Y'} = \text{kg/cm}^2$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad.

P' = Carga al límite de proporcionalidad.

L = Claro entre apoyos.

a = Ancho.

b = Alto.

Y' = Deformación al límite de proporcionalidad.

6.4.2.- Compresión paralela al grano.

Las dimensiones de las probetas (Fig. 12), son de acuerdo a la norma ASTM D-143 (1994). De 1 plg. (2.5 cm) X 1 plg. (2.5 cm) X 4 plg. (10 cm) (Figura 12). Los ensayos se realizaron en la Maquina Universal a un rango de carga de 0.5 tonelada y 4:1 de elongación, el número de probetas ensayadas fue de 45.

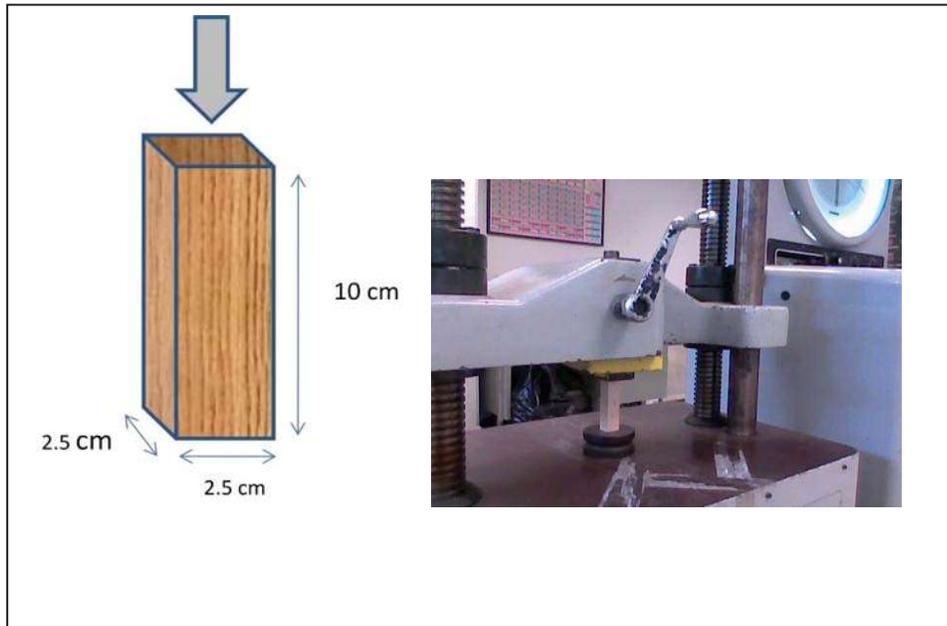


Figura 12 Compresión paralela al grano.

Los esfuerzos calculados para este ensayo fueron SLP Esfuerzo al límite de proporcionalidad, R Módulo de ruptura, E Módulo de Elasticidad, de acuerdo a las siguientes:

Fórmulas 8 Compresión paralela, SLP, R, E.

Esfuerzo al límite de proporcionalidad

$$SLP = \frac{P'}{A} = \text{kg/cm}^2$$

Donde:

SLP = Esfuerzo al límite de proporcionalidad.

P' = Carga al límite de proporcionalidad.

A = Área.

Módulo de ruptura.

$$R = \frac{P}{A} = \text{kg/cm}^2$$

Donde:

R = Módulo de ruptura.

P = Carga aplicada al momento de la falla.

A = Área.

Módulo de elasticidad.

$$E = \frac{P'L'}{AY'} = \text{kg/cm}^2$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad.

P' = Carga al límite de proporcionalidad.

L' = Longitud después de la falla.

A = Área.

Y' = Deformación al límite de proporcionalidad.

6.4.3.- Compresión perpendicular al grano.

Las dimensiones de las probetas (Fig. 13) son conforme a la norma ASTM D-143 (1994). De 2 plg. (5 cm) X 2 plg. (5 cm) X 6 plg. (15 cm) (Figura 13). Los ensayos se realizaron en la Maquina Universal a un rango de carga de 0.5 toneladas y 2:1 de elongación, sobre la cara radial, mediante una placa metálica de 5 cm de ancho, el número de probetas ensayadas fue de 18.

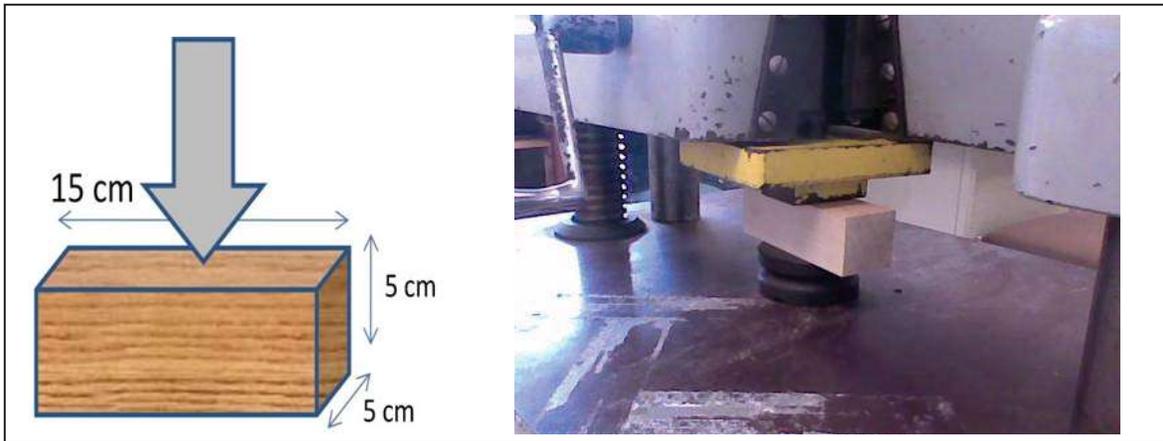


Figura 13 Compresión perpendicular al grano.

El esfuerzo calculado para este ensayo fue el SLP Esfuerzo al límite de proporcionalidad, de acuerdo a la siguiente:

Fórmula 9 Compresión perpendicular al grano SLP.

Esfuerzo al límite de proporcionalidad

$$SLP = \frac{P'}{A} = \text{kg/cm}^2$$

Donde:

SLP = Esfuerzo al límite de proporcionalidad.

P' = Carga al límite de proporcionalidad.

A = Área.

6.4.4.- Tensión paralela al grano

Las dimensiones de las probetas (Fig. 14), son de acuerdo a la norma ASTM D-143 (1994). De 1 plg. (2.5 cm) X 1 plg. (2.5 cm) X 18 plg. (46 cm) con sus respectivas medidas al centro de la probeta. Los ensayos se realizaron en la Maquina Universal a un rango de carga de 1.0 tonelada y 4:1 de elongación, el número de probetas fue de 34.

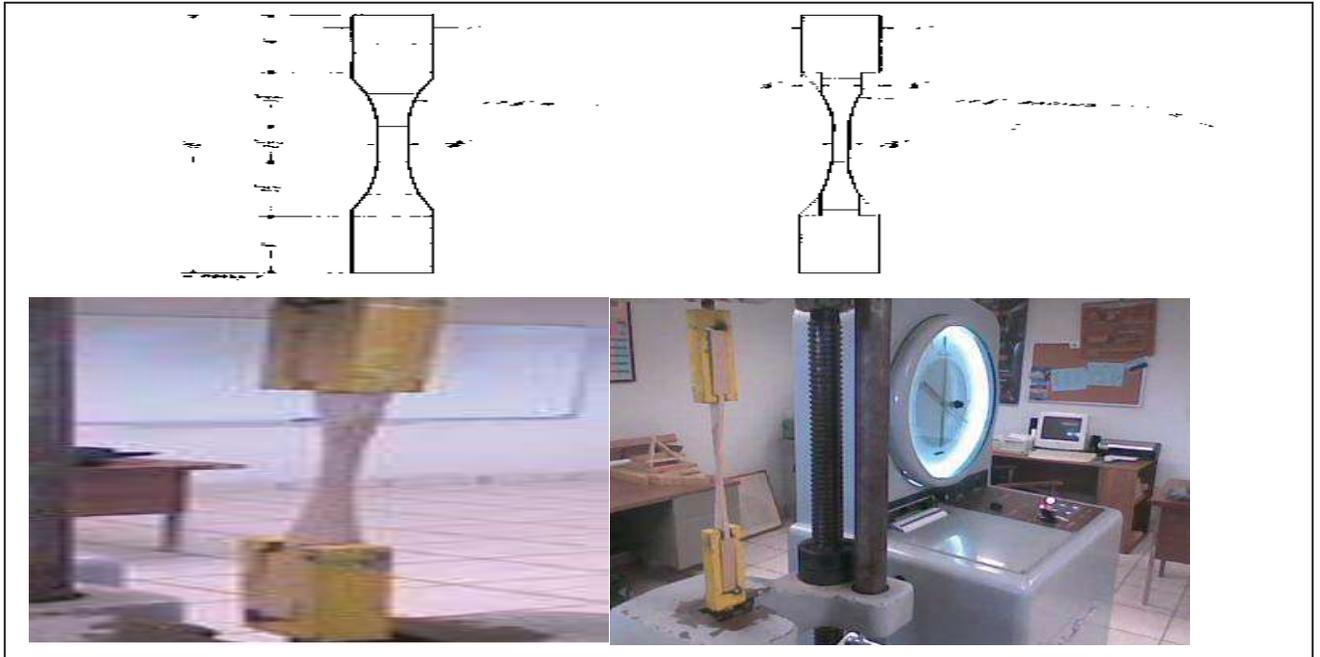


Figura 14 Tensión paralela al grano.

El esfuerzo calculado para este ensayo fue el R Módulo de Ruptura, de acuerdo a la siguiente:

Fórmula 10 Tensión paralela al grano, R.

Módulo de ruptura.

$$R = \frac{P}{A} = \text{kg/cm}^2$$

Donde

R = Módulo de ruptura.

P = Carga al momento de la falla.

A = Área.

6.4.5.- Tensión perpendicular al grano.

Las dimensiones de las probetas (Fig. 15), son de acuerdo a la norma ASTM D-143 (1994). De 2 plg. (5 cm) X 2 plg. (5 cm) X 2 plg. (5 cm), Los ensayos se realizaron en la Maquina Universal a un rango de carga de 0.5 tonelada y 4:1 de elongación, el número de probetas ensayadas fue de 21.

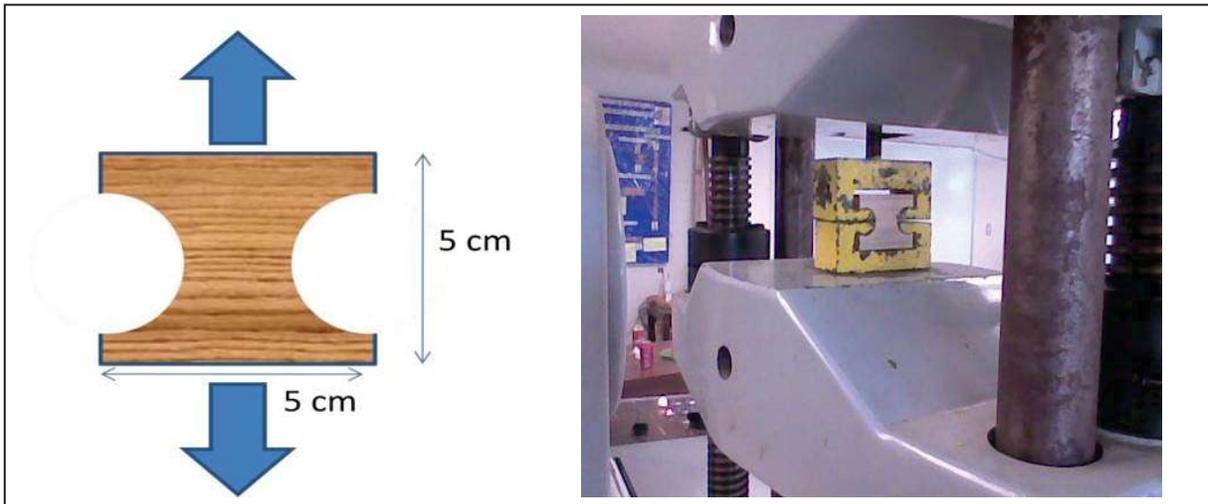


Figura 15 Tensión perpendicular al grano.

El esfuerzo calculado para este ensayo fue el $S_{m\acute{a}x}$. Esfuerzo máximo, de acuerdo a la siguiente:

Fórmula 11 Tensión perpendicular al grano, $S_{m\acute{a}x}$.

Esfuerzo Máximo.

$$S_{m\acute{a}x} = \frac{P}{A} = \text{kg/cm}^2$$

Donde

$S_{m\acute{a}x}$ = Esfuerzo Máximo.

P = Carga al momento de la falla.

A = Área.

6.4.6.- Rajadura

Las dimensiones de las probetas (Fig. 16), son conforme a la norma ASTM D-143 (1994). De 2 plg. (5 cm) X 2 plg. (5 cm) X 3 plg. (7.6 cm). Los ensayos se realizaron en la Maquina Universal a un rango de carga de 0.5 tonelada, el número de probetas ensayadas fue de 25.

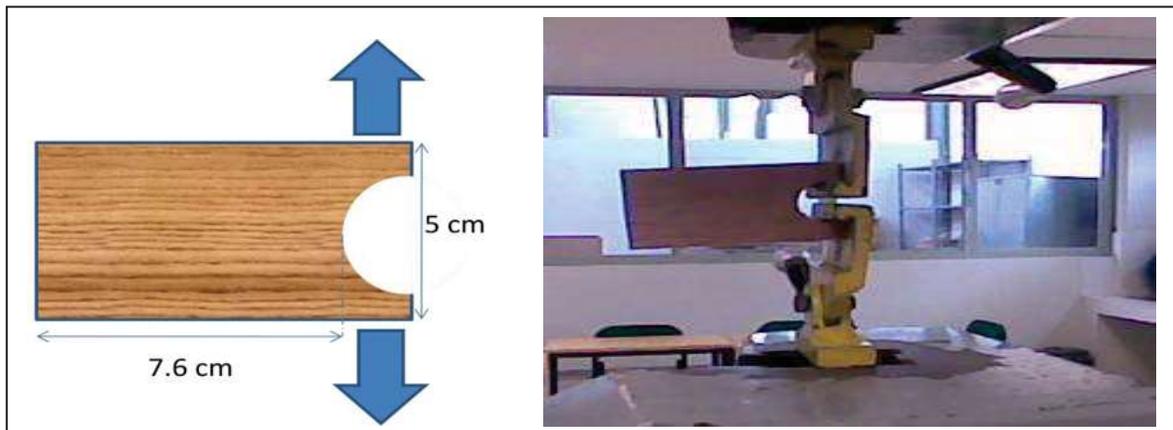


Figura 16 Rajadura.

El esfuerzo calculado para este ensayo fue el $S_{m\acute{a}x}$. Esfuerzo máximo, de acuerdo a la siguiente:

Fórmula 12 Rajadura, $S_{m\acute{a}x}$.

Esfuerzo Máximo.

$$S_{m\acute{a}x} = \frac{P}{B} = \text{kg/cm}$$

Donde

$S_{m\acute{a}x}$ = Esfuerzo Máximo.

P = Carga al momento de la falla.

B = Ancho de la probeta.

6.4.7.- Dureza: radial, tangencial y transversal.

Las dimensiones de las probetas (Fig. 17), son conforme a la norma ASTM D-143 (1994). De 2 plg. (5 cm) X 2 plg. (5 cm) X 6 plg. (15 cm), la dureza se mide con un accesorio con punta en forma de balín, de 1.13 cm de diámetro, equivalente a 1cm^2 de área. Los ensayos se realizaron en la Maquina Universal, el número de probetas ensayadas fue de 18.

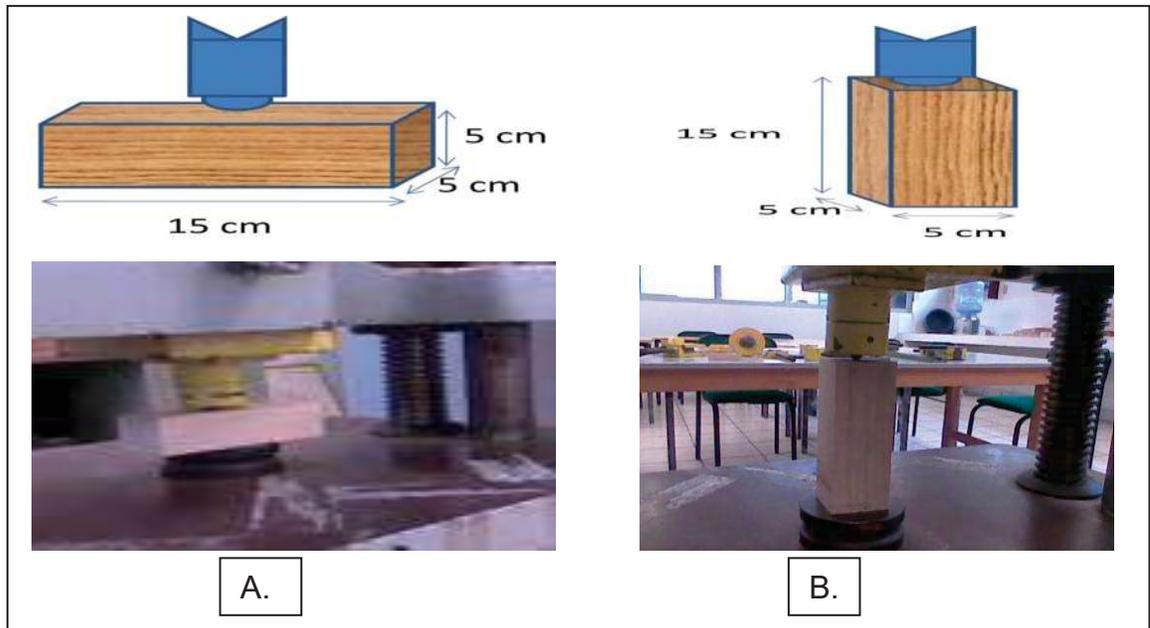


Figura 17 Dureza máxima: A) Radial; Tangencial y B) Transversal.

El esfuerzo calculado para este ensayo fue la dureza, en las caras Radial; Tangencial y Transversal, con respecto al grano, de acuerdo a la siguiente:

Fórmula 13 Dureza máxima, R. T. T.

Dureza máxima.

$$D = \frac{P}{A} = \text{kg/cm}^2$$

Donde

D = Dureza máxima.

P = Carga al momento de la falla.

A = Área.

6.4.8.- Extracción de clavos radial, tangencial y transversal.

Las dimensiones de las probetas (Fig. 18), son conforme a la norma ASTM D-143 (1994). De 2 plg. (5 cm) X 2 plg. (5 cm) X 6 plg. (15 cm), los clavos de punta de diamante de 2.5 mm de diámetro, a un ángulo recto de penetración de 3.2 cm. Los ensayos se realizaron en la Maquina Universal, el número de probetas ensayadas fue de 18.

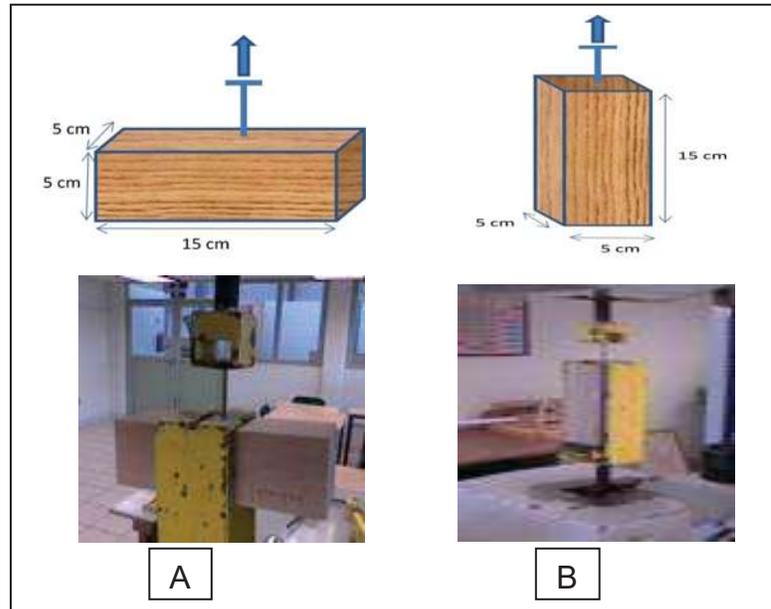


Figura 18 Extracción de clavos A) Radial, Tangencial y B). Transversal.

El esfuerzo calculado para este ensayo fue la Extracción de clavos, en las caras, radial, tangencial y transversal, con respecto al grano, de acuerdo a la siguiente:

Fórmula 14 Extracción de clavos, R. T. T.

Extracción de clavos.

$$Z = P = \text{kg}$$

Donde

Z = Resistencia a la extracción.

P = Carga al momento de la extracción.

Cabe mencionar que en este estudio, la determinación de las propiedades tanto físicas como mecánicas, no fue posible hacer la comparación por árbol, debido a que los diámetros de los árboles destinados para este estudio fueron muy reducidos, y no se logró obtener un número de probetas con las características que marcan las normas; así pues el tamaño de muestra fue calculado en base a los resultados preliminares de las probetas de todos los árboles.

El tamaño de muestra fue determinado de acuerdo al nivel de precisión requerido, y por el error de muestreo aceptable; y se determinó mediante la siguiente expresión:

(Chisnall, 1996)

$$n = \left(\frac{t_{gl} \sigma}{EE} \right)^2$$

Donde:

n = Tamaño de muestra

t = El valor de "t" de student con 10, $gl = 2.228$

σ = Desviación estándar de una muestra preliminar

EE = Nivel de error aceptado (nivel de aceptación), el cual se tomó igual a la mitad del intervalo de confianza para la media.

El tamaño de muestra calculado fue de 10 probetas por ensayo, se utilizó la desviación estándar de los resultados del presente, concluyendo que la variación de los resultados es pequeña, de tal manera que, ese fue el tamaño de muestra obtenido, el número de probetas ensayadas en cada una de las propiedades se describe en la Tabla 2.

7.- Resultados

El contenido de Humedad promedio de las probetas antes de realizar las pruebas fue del 13 %. La clasificación de las Propiedades Físico-Mecánicas de la madera de *Acrocarpus fraxinifolius* fue hecha de acuerdo a (Sotomayor Castellanos, 1987)

Tabla 1 Resultados Propiedades Físicas

Densidad Básica g/cm^3		0.49	Media
	Radial	3,75	Baja
Contracción %	Tangencial	7,09	Media
	Longitudinal	5,07	Alta

Tabla 2 Resultados Propiedades Mecánicas

Esfuerzo		Media	Desviación estándar	Número de probetas ensayadas	Número de probetas calculadas	Clasificación
Flexión Estática kg/cm^2	SLP	678.5	142	34	10	Media
	R	853.18	151	34	10	Media
	E	136,119.6	97679	34	10	Media
Compresión paralela al grano. kg/cm^2	SLP	433.12	64	45	10	Media
	R	506.95	68	45	10	Media
	E	51,130.55	15588	45	10	Media
Dureza kg/cm^2	Radial	405.08	82.94	18	10	Media
	Tangencial	384.22	60.43	18	10	Media
	Transversal	519.33	82.62	18	10	Alta
Extracción de clavos kg	Radial	140.583	33.34	18	10	
	Tangencial	129.597	36.66	18	10	
	Transversal	89.38	25.45	18	10	

Esfuerzo		Media	Desviación estándar	Número de probetas ensayadas	Número de probetas calculadas	Clasificación								
Compresión perpendicular kg/cm^2	SLP	108.02	19.62	18	10	Media								
Rajaduras kg/cm	S máx.	65	12	25	10									
Tensión perpendicular kg/cm^2	S máx.	24	6.13	21	10									
Tensión paralela kg/cm^2	R	705.23	238.17	34	10									
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>SLP</td> <td>Esfuerzo al límite de proporcionalidad</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>Módulo de ruptura</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>Módulo de elasticidad</td> </tr> <tr> <td>S máx.</td> <td>Esfuerzo máximo</td> </tr> </tbody> </table>							SLP	Esfuerzo al límite de proporcionalidad	R	Módulo de ruptura	E	Módulo de elasticidad	S máx.	Esfuerzo máximo
SLP	Esfuerzo al límite de proporcionalidad													
R	Módulo de ruptura													
E	Módulo de elasticidad													
S máx.	Esfuerzo máximo													

8.- Análisis de los resultados

Propiedades Físicas

Los resultados obtenidos de los ensayos para determinar la densidad básica indican que se trata de una madera de densidad media, con un valor promedio de 0.49 g/cm^3 por lo que los resultados de resistencia mecánica corresponden a la misma clasificación, esto por la buena correlación que existe entre las características mecánicas de la madera y el peso específico (Echenique-Manrique y Robles Fernández 1993). Por otro lado estos resultados concuerdan en un rango aceptable con los obtenidos por (Bárceñas Pazos y Ordoñez Candelaria 2008) donde se reporta una densidad de 0.45 g/cm^3 y una clasificación de moderadamente ligera.

En cuanto a los valores obtenidos de contracción radial 3.75% y tangencial 7.09%, se clasificaron como baja a, media. Sin embargo los valores obtenidos para la contracción longitudinal, son tan altos como se esperaban. Estos datos concuerdan con los obtenidos por (Honorato S, y col. 2005), donde reporta una contracción tangencial de 7.19% y 2.86% de contracción radial. Por su calificación en cuanto a su estabilidad dimensional (radial-tangencial) la cual resulto ser media, puede ser utilizada para ebanistería en artículos como muebles o artesanías, aprovechando el veteado que presenta.

Propiedades Mecánicas

Para el caso de la Flexión Estática y de acuerdo a los resultados obtenidos el Módulo de Ruptura resulto ser de 853.18 kg/cm^2 y el Módulo de Elasticidad fue de $136,119.6 \text{ kg/cm}^2$ a un C.H. del 12%, estos resultados son difíciles de comparar con los valores publicados por (Tamarit Urias, y col. 2008) que en su trabajo reporta valores en condición verde del Módulo de Ruptura de 744 kg/cm^2 y en condición seca de $1,159 \text{ kg/cm}^2$ y para el Módulo de Elasticidad 105 kg/cm^2 condición verde, $122,100 \text{ kg/cm}^2$ en condición seca, sin especificar bajo que contenido de humedad se realizaron los ensayos. En cuanto a la dureza Radial de 405 kg/cm^2 , tangencial de 384.22 kg/cm^2 y transversal de 519 kg/cm^2 valores obtenidos en el presente, mismos que no

concuerdan con los reportados por (Tamarit Urias, y col. 2008), de 752 kg/cm^2 para la dureza lateral, en condición seca, valores que se consideran muy altos para una densidad de 0.50 g/cm^3 , sin embargo puede ser debido a que la edad de los árboles ensayados por este autor contaban con una edad de 12 años y ya se había formado madera de duramen, sin embargo, la madera ensayada en el presente trabajo tenía una edad de entre los 4 y 4.5 años.

Para los datos de compresión (Tamarit Urias, y col. 2008) reportan una Resistencia a la Compresión sin especificar si es paralela o perpendicular a las fibras, solo especifica que es a una condición seca con 522 kg/cm^2 , y con 334 kg/cm^2 en condición verde; comparado con lo obtenido en el presente trabajo, dando en la compresión paralela al grano: para el Módulo de Ruptura 506.95 kg/cm^2 y un esfuerzo al límite de proporcionalidad de 433.12 kg/cm^2 . Para la compresión perpendicular 108.02 kg/cm^2 .

De acuerdo a los resultados obtenidos en los diferentes ensayos mecánicos, esta especie es clasificada de mediana a baja resistencia, y que de acuerdo a (Tamarit Urias, y col. 2008) concuerda con esta misma clasificación; por otro lado la clasificación que le otorga (Bárceñas Pazos y Ordoñez Candelaria 2008) en cuanto a su resistencia mecánica es baja.

Sin embargo de acuerdo a los valores obtenidos y con los requerimientos de Echenique Manrique y Plumtre, (1994) cumple con las solicitudes de resistencia para ser usada en estructuras de cimbra, polines, vigas, y viguetas no estructurales; marcos, molduras, jambas, dinteles, vierteaguas, barandales, puertas, paneles y cajas de empaques entre otros.

También presenta una menor proporción de madera tardía, en comparación con la madera madura, comportamiento general en cualquier especie de madera juvenil (Tsoumis, 1991), por lo que se considera que hay una menor cantidad de células de madera con paredes gruesas que este soportando la carga aplicada y por lo tanto una resistencia mecánica menor. Sin embargo, se espera que a medida que el árbol produzca madera madura, se incremente su resistencia mecánica y disminuya la contracción.

9.- Conclusiones.

La madera obtenida de los arboles muestreados estaba conformada en un 90% de madera juvenil.

Las características físico-mecánicas de la madera están de acuerdo a su relación peso anhidro volumen verde.

Los valores obtenidos de las pruebas físico-mecánicas son buenos tomando en cuenta que se trata de madera juvenil.

La contracción tangencial en madera juvenil fue la de mayor porcentaje, seguida por la longitudinal y por último la radial.

De acuerdo a los resultados obtenidos de densidad media, los valores de resistencia mecánica, corresponden a la misma clasificación por la relación que existe entre ellas.

10.- Recomendaciones.

Es importante resaltar que antes de recomendar esta madera para plantaciones con fines industriales, se realice un estudio de impacto ecológico sobre ella, ya que algunas especies de fácil propagación suelen presentar problemas con su entorno.

Para reducir los valores de contracción longitudinal sería recomendable esperar a que estos árboles formen madera madura.

Se recomienda seguir con el estudio de estas características pero ahora utilizando madera que presente duramen.

11- Bibliografía.

ASTM, (American Society for testing and Materials). *Standard methods for direct moisture content measurement of wood and wood-based materials*. Philadelphia: ASTM, 1986a.

ASTM, (American Society for Testing and Materials). *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber D 143-94*. West Conshohocken PA USA: ASTM International, 1994.

Bárcenas Pazos, Guadalupe M., y Víctor R. Ordoñez Candelaria. *Sistema de Publicaciones del INE, Detalle de la Publicación, Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz(Biodiversidad, Manejo y Conservación)*. 2008.
<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/542/cap17.pdf> (accessed Agosto 31, 2009).

Chisnall, Peter M. "La esencia de la investigación de Mercados." In *La esencia de la investigación de Mercados*, by Peter M. Chisnall, 215. Naucalpan de Juárez, Edo. de México: Prentice Hall, 1996.

Echenique Manrique, R, y R.A. Plumtre. *Guía para el uso de maderas de Belice y México Universidad de Guadalajara, Consejo Británico, Universidad de Oxford y LACITEMA,A.C. Xalapa Ver. México, 1994.*

Echenique-Manrique, Ramón, and Francisco Robles Fernández. *Ciencia y Tecnología de la Madera I*. Xalapa: Serie Textos Universitarios. Universidad Veracruzana, 1993.

FAO, (Food and Agriculture Organization). *Depósito de documentos de la FAO Situación de los Bosques del Mundo 2007*. 2007.
<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/a0773s/a0773s07.pdf> (accessed 2007).

García Moreno, Teresa, salvador Bocanegra Ojeda, y Claudia Tapia Medina.
Características Anatómicas de la Madera de Arbolado Joven de *Acrocarpus fraxinifolius*
Wight & Arn. Ciencia y Tecnología de la madera, 2002: 8-19.

Hoadley, R. Bruce. *Understanding Wood A crasftmans guide to wood technology*. The
taunton Press, 1980.

Honorato S, J A, J F C Parraguirre L, J Quintanar O, and H. M. Rodriguez C. "Cedro
rosado (*Acrocarpusfraxinifolius*): una opción agroforestal para la sierra norte del estado
de Puebla." *Folleto Técnico No. 1. INIFAP*, 2005: 41.

Koehler, Arthur. *The properties and uses of Wood / Arthur Koehler*. U.S.A.: McGraw-Hill,
1924.

Kollman, Franz. *Tecnología de la Madera y sus Aplicaciones / Franz Kollman Instituto
Forestal de investigaciones, Experiencias y Servicios de la Madera*. Madrid España:
Springer Verlag, 1959.

Kuranin, Reforestadora. *Descripción General de la Localidad*. Morelia, Mich., Mayo 24,
2001.

Laboratory, Forest Products. "Treesearch." Enero 1965.
<http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/32454> (accessed Junio 2004).

Mc Millen, J M. "Methods of determining the moisture content of wood." *USDA, FS,
Forest Products Laboratory, Report No.1649*, 1956: 17.

Menendez Huevo, Herbet. *monografias.com*. Abril 19, 2005.
<http://www.monografias.com/trabajos20/cedro-rosado/cedro-rosado.shtml> (accessed
Febrero 7, 2006).

Munsell, Albert Henry. "Munsell soil color chart." In *Munsell Color Company*, by Albert Henry Munsell. Maryland, 1964.

Niembro Rocas, Anibal. *THE RNGR TEAM REFORESTATION, NURSERIES, & GENETICS RESOURCES. Tropical Tree Seed Manual, Species Descriptions*. 01 01, 2003. <http://www.rngr.net/Publications/ttsm/Folder.2003-07-11.4726/Acrocarpus%20fraxinifolius.pdf/file> (accessed Agosto 14, 2003).

Ontiveros Alvarado, Samuel, and Teresa García Moreno. "Descripción botánica de la especie *Acrocarpus Fraxinifolius* Wight et Arn." *Ciencia y Tecnología de la Madera Revista de la FAcultad de Ingenieria en Tecnología de la Madera Vol.8 Epoca 2*, 2002: 1-7.

Soltis., Lawrence A. "US FOREST SERVICE." *US FOREST SERVICE*. Agosto 10, 1999. <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr113/ch07.pdf> (accessed Octubre 13, 2003).

Sotomayor Castellanos, Javier Ramon. *Calidad de la Madera para la Industria de la Construcción*. Morelia Mich., 1987.

Stamm, A J. *Wood and cellulose science*. Nueva York: Ronald press, 1964.

Tamarit Urias, Juan Carlos, Juan Quintanar Olguin, José Isidro Melchor Marroquín, J. Refugio Roa Durán, and J.Filomeno C. Parraguirre Lezama. *CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE LA MADERA DE SEIS ESPECIES FORESTALES COMPATIBLES CON EL CULTIVO DEL CAFÉ*. 2008. http://mx.geocities.com/rc_veracruz4/pdfs/MemoriaRC2008/FORESTAL/EXTENSOS/FoEx01.pdf (accessed Septiembre 3, 2009).

Tsoumis, George. *Science and Technology of Wood*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

USFPL, (FOREST PRODUCTS LABORATORY). "Wood handbook: Wood as an engineering material. USDA. Agr." *Handbook N° 72. EE.UU.*, 1974: 415.

Vignote Peña, Santiago, and Francisco Javier Jimenez Peris. *Tecnología de la Madera*. Madrid: Mundi Prensa Libros S.A, 1996.

12.- Agradecimientos.

Primeramente agradecer a mi madre Ma. Paula Tello Hinojosa, por el apoyo incondicional, siempre presente en las buenas y en las malas, transmitiéndome la importancia de culminar lo emprendido.

A la vida, por darme la oportunidad de ser padre de Yulia A., Elias M. y Briana I., fuentes de inspiración.

A mi Asesora M.C. Teresa Sánchez Vargas, por la paciencia y asesoría.

A mi Padrino Dr. Enrique Tello Hinojosa por la asesoría de la estructura de la Tesis.

A los sinodales M.A Saúl López Peñaloza (Padrino de Generación), M.C. Armando Muñiz Ramírez y en especial al Dr. David Raya Gonzales y la M.C. Fabiola Eugenia Pedraza Bucio por las correcciones y sugerencias para una mejor presentación de la presente Tesis.

A mis hermanos Paul D. y Virginia M; Amigos y a los compañeros de generación por su apoyo en todo momento.

A mis Maestros por la educación brindada durante la carrera.