

## RELACIÓN ESTRUCTURA-PROPIEDADES DE LA MADERA DE ANGIOSPERMAS MEXICANAS

## Mexican hardwoods structure-properties relationship

GM Bárcenas-Pazos ✉, F Ortega-Escalona,  
G Ángeles-Álvarez, P Ronzón-Pérez

(GMBP) (FOE)(GAA)(PRP) Instituto de Ecología, A.C. Unidad de  
Recursos Forestales. km 2.5 Antigua Carretera a Coatepec No. 351,  
Congregación El Haya. 91070 Xalapa, Veracruz, México  
barcenasp@ecologia.edu.mx

Fecha de recepción: 24 de octubre de 2003

Fecha de aceptación: 10 de agosto de 2005

**RESUMEN.** La relación entre características anatómicas y propiedades físicas, y cinco propiedades mecánicas de la madera de veintitrés especies de angiospermas se analizó utilizando una regresión lineal múltiple. Estas especies fueron recolectadas en los estados de Chiapas y Tamaulipas, México. Se utilizaron diez variables independientes, de las cuales ocho fueron caracteres anatómicos (cinco de los cuales están relacionadas con el parénquima radial, dos relacionadas con las fibras y uno es la combinación de caracteres de vaso y parénquima axial), y dos fueron propiedades físicas (densidad básica y porcentaje de contracción tangencial total). Se estimaron los valores para cinco propiedades mecánicas: módulo de ruptura en flexión, esfuerzo máximo en compresión paralela a la fibra, esfuerzo máximo en cortante y dureza *Janka* lateral y en los extremos a partir de las variables independientes con ecuaciones de regresión lineal múltiple paso a paso. Se obtuvieron las ecuaciones de regresión. Los coeficientes de determinación obtenidos ( $R^2$ ), de 0.78 a 0.89, sustentan que a partir de esas variables se pueden estimar las propiedades mecánicas de la madera.

**Palabras clave:** madera, caracteres anatómicos, propiedades físicas propiedades mecánicas, relación estructura-propiedades, angiospermas mexicanas.

**ABSTRACT.** The relationship between anatomical features and some physical properties and five mechanical properties of twenty-three hardwood species was analyzed by employing a multiple linear regression. These species were recollected in the Chiapas and Tamaulipas states of Mexico. Ten independent variables were utilized, eight of these comprised anatomical features (five of which are related to the radial parenchyma, two related to the fibers and one is the combination of vessels and axial parenchyma features), and two were physical properties (basic density and the total tangential shrinkage). Values for five mechanical properties, bending module of rupture, maximum strength in compression parallel to grain to the fiber, shear maximum strength and side and transverse *Janka* hardness were estimated by using the a multiple linear regression equations (step wise) on basis of the independent variables. The regression equations were obtained. The coefficients of determination ( $R^2$ ), with values from 0.78 to 0.89, have proved that the mechanical properties of wood can be estimated by using those independent variables.

**Keywords:** wood, anatomic features, physical properties, mechanical properties, structure-properties relationship, Mexican hardwoods

## INTRODUCCIÓN

Dentro de las propiedades tecnológicas de las maderas, las físico-mecánicas son de las más importantes, pues se utilizan como índices para evaluar si las características o calidad de una madera son adecuadas para un uso particular (Panshin & DeZeeuw 1980; Brazier & Howell 1979, Schniewind 1989) La determinación de las propiedades mecánicas es un proceso que requiere de equipo, personal calificado, un programa de ensayos, material y tiempo para realizar los ensayos destructivos. Los estudios anatómicos de la madera

pueden significar un ahorro de tiempo y dinero y, por la relación que tienen con las propiedades mecánicas, permiten predecirlas. Algunas características anatómicas pueden ser útiles para deducir sus propiedades físico-mecánicas y sus usos, sin necesidad de identificarla botánicamente. En otro matiz, cuando se procesa una madera "nueva" para la industria forestal y se intenta comercializarla, la información publicada sobre sus características o estudios tecnológicos es limitada. La correlación estructura-propiedad determinada con un número reducido de especímenes, puede ser aplicada para proponer

índices de las propiedades físico-mecánicas de cualquier madera.

Los análisis estadísticos de correlación han sido empleados para estudiar la relación entre estructura y propiedades de la madera así como para predecir una determinada propiedad a partir de ciertas características anatómicas (Schniewind 1961; Ifju & Kennedy 1962; Taylor 1968; Demaree & Erickson 1976; Siemon *et al.* 1976; Leclercq 1980; Guerrero *et al.* 1992). El ancho de los anillos, los volúmenes de sus elementos estructurales, la densidad y las contracciones han sido útiles para analizar el comportamiento de la madera (Coetzee 1973). Aún cuando la densidad básica, medida como la razón entre peso anhidro y el volumen en verde ( $pa/vv$ ) ha sido repetidamente utilizada como un índice de las propiedades mecánicas de la madera, no hay estudios de su efecto conjunto con caracteres anatómicos y valores de contracción sobre la resistencia mecánica de la madera. La densidad básica ( $pa/vv$ ) de la madera es una característica hereditaria, que también es afectada por prácticas silvícolas. El valor de la densidad básica se ha aplicado para estimar algunos de valores de resistencia mecánica, como módulos de elasticidad y de ruptura en flexión y el esfuerzo al límite proporcional en compresión perpendicular, altamente relacionados con la densidad básica (Brown *et al.* 1952; Williamson 1975; Panshin & DeZeeuw 1980). La relación de la densidad básica con diferentes propiedades físicas y mecánicas de la madera ha sido estudiada desde principios del siglo pasado (Newlin & Wilson 1919; Liska 1965; Armstrong *et al.* 1984; Anónimo 1987; Zhang 1994).

La contracción tangencial es un índice de la cantidad de microfibrillas celulósicas cuya orientación paralela al eje longitudinal del árbol no está influida por la presencia de los radios y que debido a esta orientación contribuyen, en forma importante en el comportamiento físico de la madera. Por lo anterior, la contracción tangencial en conjunto con variables anatómicas y la densidad relativa básica se puede utilizar para predecir la resistencia mecánica de la madera (Lindsay & Chalk 1954; McIntosh 1954; Schniewind 1959; Wardrop 1964; Petric & Scukanec 1975; Revol *et al.* 1982; Harada 1984). El objetivo de este trabajo es estimar cinco propiedades mecánicas de la madera de

angiospermas arbóreas mediante un análisis de regresión lineal, a partir de algunas características anatómicas, básicas y combinadas, la densidad básica ( $pa/vv$ ) y la contracción lineal tangencial total.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La madera empleada en este trabajo provino de 23 especies de angiospermas, 19 fueron recolectadas en la Selva Lacandona, Chiapas, México y cuatro en la Reserva de la Biosfera El Cielo, municipio de Gómez Farías, Tamaulipas, México. Las 19 especies provenientes de la Selva Lacandona fueron recolectadas en la zona comprendida entre los poblados El Granizo, Nuevo Centro de Población (NCP) Velasco Suárez, Bonampak y NCP Frontera Luis Echeverría. Las comunidades vegetales dominantes en la zona muestreada son selvas altas, perennifolia y subperennifolia, así como acahuals derivados de las mismas (Miranda 1952; Hernández 1977; Calzada & Valdivia 1979; Meave del Castillo 1990).

El clima es Amw<sup>w</sup>ig, cálido húmedo con temperatura media anual mayor de 22 °C, con un régimen de lluvia de verano con precipitación media anual de 2 500 mm, canícula y marcha anual de la temperatura tipo Ganges (Anónimo 1970; Orellana 1978; Cardoso 1979). Los suelos predominantes son nitosol, litosol y rendzina (Anónimo 1979). La región muestreada se encuentra irrigada por arroyos que son tributarios de ríos Lacanjá y San Pedro y de los lagos Lacanjá y Santa Clara (de Vos 1988).

En la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, la zona de recolecta se ubicó en un bosque mesófilo de montaña con clima es Cfc, templado húmedo, con lluvias uniformemente repartidas a través del año y con verano frío y corto. La temperatura promedio anual es de 13,8 °C y la precipitación media anual es de 2 522,4 mm (Puig & Bracho 1987). Los suelos predominantes son litosoles, luvisoles crómicos y luvisoles férricos (Bracho & Sosa 1987). En la zona muestreada hay escasos ecosistemas acuáticos de área reducida, temporales e intermitentes. Aunque en las cercanías

del poblado El Porvenir (La Perra) hay tres pequeños manantiales que abastecen a la población.

### Material recolectado

De cada especie se recolectaron de uno a tres árboles y de cada árbol, el número de trozas recolectadas varió entre dos y cuatro. Los ejemplares botánicos de cada árbol se depositaron en el herbario del Instituto de Ecología, A.C. (XAL) y con su madera se elaboraron las probetas para los ensayos físico-mecánicos y tablillas para los anatómicos, mismas que están integradas a la Xiloteca Dr. Faustino Miranda (XALw), del mismo instituto. La relación de especies que incluye este estudio es referida en la Tabla 1. Esta relación

Tabla 1. Especies recolectadas (NA = número de árboles colectados)  
Table 1. Collected species

ESPECIE	FAMILIA	NOMBRE COMÚN	NA	PROCE DENCIA
<i>Acer skutchii</i> Rheder	ACERACEAE	álamo	4	Tamaulipas
<i>Ampelocera hottlei</i> (Standley) Standley	ULMACEAE	cuerillo	2	Chiapas
<i>Aphananth emonoica</i> (Hemsley) Leroy	ULMACEAE	chicharra	2	Chiapas
<i>Astronium graveolens</i> Jacq.	ANACARDIACEAE	jobillo	2	Chiapas
<i>Brosimum alicastrum</i> Sw.	MORACEAE	ramón	1	Chiapas
<i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess	GUTTIFERAE	barí	2	Chiapas
<i>Carya ovata</i> (Mill.) K. Koch var. <i>mexicana</i> (Engel.) Manning	ULMACEAE	nogalillo	4	Tamaulipas
<i>Cedrela odorata</i> L.	MELIACEAE	cedro	2	Chiapas
<i>Dialium guianense</i> (Aubl.) Sandwiih	LEGUMINOSAE	paque	2	Chiapas
<i>Guarea grandifolia</i> A. DC.	MELIACEAE	cedrillo	3	Chiapas
<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	HAMAMELIDACEAE	liquidámbar	4	Tamaulipas
<i>Lonchocarpus castilloi</i> Standley	LEGUMINOSAE	machiche	3	Chiapas
<i>Lysiloma acapulcensis</i> (Kunth) Benth.	LEGUMINOSAE	tripal	2	Chiapas
<i>Magnolia schiedeana</i> Schlecht.	MAGNOLIACEAE	magnolia	4	Tamaulipas
<i>Manilkara zapota</i> (L.) van Royen	SAPOTACEAE	chicozapote	2	Chiapas
<i>Mosquitoxylum jamaicense</i> Krug & Urban	ANACARDIACEAE	pajulte	3	Chiapas
<i>atymiscium yucatanum</i> Standley	LEGUMINOSAE	hormiguillo	2	Chiapas
<i>Quararibea funebris</i> (Llave) Vischer	BOMBACACEAE	molinillo	1	Chiapas
<i>Schizolobium parahybum</i> (Vell.) Blake	LEGUMINOSAE	guanacaste	2	Chiapas
<i>Swietenia macrophylla</i> G. King.	MELIACEAE	caoba	2	Chiapas
<i>Terminalia amazonia</i> (J.F. Gmelin) Exell	COMBRETACEAE	canshan	2	Chiapas
<i>Vatairea lundellii</i> (Standley) Killip ex Record	LEGUMINOSAE	amargoso	2	Chiapas
<i>Vochysia guatemalensis</i> J.D. Smith	VOCHYSIACEAE	maca blanca	2	Chiapas

incluye familia, nombre común y procedencia.

### Determinación de los caracteres anatómicos y de las propiedades físico-mecánicas

Toda la información utilizada en el análisis fue obtenida experimentalmente de material pareado. Las características anatómicas se publicaron en López & Ortega-Escalona 1989 y Ortega-Escalona *et al.* 1991, en donde se describen los métodos para su obtención así como los análisis estadísticos. Los valores de las propiedades físico-mecánicas se determinaron experimentalmente en condición seca (a un contenido de humedad de 12%). Los métodos utilizados, el tamaño de muestra, así como los resultados obtenidos están publicados en Anónimo 1988; Bárceñas-Pazos & Ortega-Escalona 1994 y Bárceñas-Pazos 1995. Los valores para *Liquidambar macrophylla* Oersted son inéditos. Los valores promedio para cada esfuerzo (MOR, ECP, ECG; DJL y DJE en condición seca) fueron incluidos en el análisis estadístico (Tabla 2).

### Propiedades mecánicas

#### Flexión estática.

El valor analizado fue el módulo de ruptura (MOR), kg/cm<sup>2</sup>. La propiedad de flexión estática se refiere a la resistencia que ofrece la madera a cargas, cuando es utilizada como una viga (Torelli 1982).

#### Compresión

paralela a la fibra. El valor incluido fue el esfuerzo máximo en compresión paralela (EMC), kg/cm<sup>2</sup>, que es la resistencia que ofrece la madera a una

Tabla 2. Valores de resistencia para cinco propiedades mecánicas. MOR es el Módulo de ruptura en flexión estática; EMC es el Esfuerzo máximo en compresión paralela a la fibra; EPG es el esfuerzo máximo en cortante paralelo a la fibra; DJL es la Dureza *Janka* lateral y DJE en la Dureza *Janka* en los extremos

Table 2. Strenght values for five mechanical properties

ESPECIE/PROPIEDAD	MOR kg/cm <sup>2</sup>	EMC kg/cm <sup>2</sup>	EMG kg/cm <sup>2</sup>	DJL kg	DJE kg
<i>Acer skutchii</i>	1 102	356	155	509	671
<i>Ampelocera hottlei</i>	1 114	658	111	647	848
<i>Aphananthe monoica</i>	1 164	592	163	790	1 000
<i>Astronium graveolens</i>	1 395	787	136	836	794
<i>Brosimum alicastrum</i>	1 017	654	134	682	961
<i>Calophyllum brasiliense</i>	1 128	642	135	482	608
<i>Carya ovata</i> var. <i>mexicana</i>	1 254	543	159	966	966
<i>Cederla odorata</i>	672	274	73	254	381
<i>Dialium guianense</i>	1 742	886	191	1 562	1 640
<i>Guarea grandifolia</i>	1 028	632	109	433	677
<i>Liquidambar styraciflua</i>	960	394	121	419	557
<i>Lonchocarpus castilloi</i>	1 446	822	143	918	1 087
<i>Lysiloma acapulcensis</i>	934	582	113	433	643
<i>Magnolia schiedeana</i>	1 249	454	142	591	738
<i>Manilkara zapota</i>	1 765	852	191	1280	1 314
<i>Mosquitoxylum jamaicense</i>	1200	694	113	641	722
<i>Platymiscium yucatanum</i>	1 158	635	109	640	782
<i>Quararibea funebris</i>	769	422	82	325	479
<i>Schizolobium parahybum</i>	361	273	49	225	329
<i>Swietenia macrophylla</i>	850	454	99	329	534
<i>Terminalia amazonia</i>	1 186	583	128	591	808
<i>Vatairea lundellii</i>	1 044	572	101	504	689
<i>Vochysia guatemalensis</i>	661	302	74	257	374

acción que actúa en la dirección paralela a las fibras (Torelli 1982).

**Cortante paralelo a la fibra.** El esfuerzo máximo a cortante (EMG), kg/cm<sup>2</sup>, mide la capacidad que tiene la madera para resistir acciones que tienden a producir deslizamiento de un plano interno de la madera sobre su adyacente (Vargas 1987).

**Dureza *Janka*.** Es la resistencia que opone la madera a la abrasión, desgaste, penetración y la compresión que en ella se ejerce. Para su determinación se utiliza el método *Janka*, que consiste en medir el esfuerzo necesario para introducir en las caras transversales y en las laterales (tangencial y radial) de una probeta, una semiesfera de acero de

un centímetro cuadrado de área hasta una profundidad igual a su radio (Vargas 1987). Los valores de dureza (kg) se determinaron en las direcciones paralela y perpendicular a la fibra (DJE y DJL).

### Variables anatómicas empleadas

Para el cálculo de estas variables se utilizaron los datos obtenidos experimentalmente y diseñaron las variables combinadas. Para la estimación de la variable X1, el área porcentual de la pared de las fibras (APF) se calculó con el diámetro promedio de éstas para obtener el área total de una fibra (AF) mediante la determinación del área de un círculo. El diámetro del lumen se estimó al restar al diámetro dos veces el grosor promedio de la pared. Con la fórmula del círculo se determinó el área del lumen de una fibra. El área de la pared de fibra (PF) se calculó restando al área total de la fibra el área del lumen. Con estos datos y el área porcentual que ocupan todas las fibras en la madera (AFT) se estimó el porcentaje ocupado por el área de la pared de las fibras (APF) dentro del área que abarcan todas las fibras, con la ecuación  $APF = AFT \times PF/AF$ . Para

determinar el valor de la X2 ( $APF \times LONG$ ) se multiplicó el APF, descrito en las líneas anteriores, por la longitud promedio de las fibras (LONG). El porcentaje de radios con respecto al total del volumen de la madera X3, X4 es la suma del porcentaje de vasos más el porcentaje de parénquima axial. La variable X5 es el número de radios por su ancho; X6 es el número de radios multiplicado por la longitud dividida entre el ancho de radios; X7 es el porcentaje de radios dividido entre el número de radios por el ancho de los mismos; X8 es el porcentaje de radios entre el número de radios por el producto de la longitud entre el ancho de radios; X9 es la densidad básica (pa/vv) y X10 es la contracción tangencial total (%). Las variables anatómicas incluidas en el análisis de regresión se presentan en la Tabla 3.

## Modelo estadístico y análisis de datos

La relación entre la estructura anatómica-propiedades físicas y cada una de las cinco propiedades mecánicas se analizó mediante una de Regresión Múltiple Lineal por selección de variables (Frane 1992). Debido a la falta de exactitud de cómo cada tipo celular contribuye a la respuesta física de la madera, se añadieron a las ocho variables independientes anatómicas dos más, la densidad básica (X9) (pa/vv) y la contracción tangencial (X10). Ambas son fáciles de determinar y su magnitud se relaciona con la resistencia mecánica de todas y cada una de las células de la madera. La densidad básica (pa/vv) incluye las paredes celulares y la CT, es un índice de la cantidad de microfibrillas celulósicas orientadas paralelamente al eje del árbol y su orientación no está influida por los radios, además, por su orientación contribuyen, en forma importante, al respuesta física de la madera.

Las variables independientes utilizadas fueron los valores promedio del porcentaje de radios; la densidad básica (pa/vv) y porcentaje de contracción tangencial total, el resto de las variables fueron la combinación de los promedios de los caracteres anatómicos de cada una de las 23 maderas. Para cada variable dependiente estimada se realizó un análisis independiente de RLM por pasos (step forward), hasta encontrar el modelo con mejor ajuste.

## RESULTADOS

### Flexión estática

Para estimar el módulo de ruptura ( $MOR_{est}$ ) en  $kg/cm^2$  se incluyeron el  $MOR_{exp}$  y las variables independientes que presentaron un efecto significativo ( $p < 0.001$ ). Estas variables fueron X9, densidad básica (pa/vv) y X10 contracción tangencial total (1), con un coeficiente de determinación de ( $R^2$ ) de 0.89

$$MOR_{est} = -384.7 + 2170.9 X2 + 32.9 X10 \dots\dots\dots(1)$$

### Compresión paralela a la fibra

El esfuerzo máximo en compresión paralela ( $EMC_{est}$ ,  $kg/cm^2$ ) se estimó mediante las

variables que resultaron incluidas en el modelo, las cuales fueron el EMC experimental, X2 área de fibras por su longitud, X3, porcentaje de radios y X9, densidad básica (pa/vv) con un nivel de significancia de 0.001 (2). El factor de determinación resultante entre los valores experimentales y los estimados fue  $R^2 = 0.89$

$$ECP_{est} = 54.6 + 6.0 X2 + -13.8 X3 + 1047.9 X9 \dots\dots\dots(2)$$

### Cortante paralelo a la fibra

En la estimación del esfuerzo máximo en cortante (EMG),  $kg/cm^2$ , con un nivel de significancia del 0.001, resultaron incluidas las variables X9, densidad básica (pa/vv) y X10, porcentaje de contracción tangencial total (3). El factor de determinación obtenido fue de  $R^2 = 0.78$

$$EMG_{est} = -40.5 + 214.4 X9 + 5.6 X10 \dots\dots\dots(3)$$

### Dureza *Janka* lateral o perpendicular (DJL)

Las variables independientes con efecto significativo ( $p < 0.001$ ) para la estimación de este valor fueron X4, la suma del porcentaje de vasos más el porcentaje de parénquima axial; X9 = densidad básica (pa/vv) y X10, porcentaje de contracción tangencial total (4). El factor de determinación para esta propiedad fue de  $R^2 = 0.85$

$$DJL_{est} = -719.9 - 4.4 X4 + 2132.6 X9 + 36.3 X10 \dots\dots\dots(4)$$

### Dureza *Janka* en los extremos o paralela (DJE)

Las variables incluidas en el modelo resultante, con un nivel de significancia de 0.001 y un factor de determinación  $R^2$  de 0.85, fueron X1, X4, la suma del porcentaje de vasos más el porcentaje de parénquima axial y X9 = densidad básica (pa/vv) (5)

$$DJE_{est} = -274.1 - 9.9 X1 - 2.8 X4 + 2539.3 X9 \dots\dots\dots(5)$$

Con diez variables (ocho anatómicas y dos físicas) se estimaron factores de determinación ( $R^2$ ) con las ecuaciones obtenidas, de 0.78 a 0.89, considerando que la capacidad de predicción obtenida es razonablemente adecuada. Del total de las variables independientes incluidas en este análisis, se estableció el efecto significativo ( $p < 0.001$ ) de únicamente seis de ellas (X1, X2, X3, X4,

X9 y X10). Las variables que no tuvieron influencia en la estimación de las cinco propiedades analizadas fueron: X5 es el número de radios por su ancho, X6 es el número de radios multiplicado por la longitud dividida entre el ancho de radios, X7 es el porcentaje de radios dividido entre el número de radios por el ancho de los mismos, y X8 es el porcentaje de radios entre el número de radios por el producto de la longitud entre el ancho de radios.

**DISCUSIÓN**

La madera se podría idealizar como un conjunto de elementos celulares de sección circular orientados longitudinalmente y seccionados por los radios dispuestos a manera de pequeñas cuñas que parten del centro hacia el perímetro. Dentro de los elementos celulares longitudinales, las fibras son los más robustos y a ellas se debe gran parte de la resistencia de la madera (Panshin & DeZeew, 1980, Guerrero *et al.* 1992). Las fibras funcionan como columnas individuales, las cuales reciben parte de las acciones y se apoyan en las células vecinas, ya que las paredes adyacentes están cementadas (Bodig & Jane 1982; Panshin & DeZeew, 1980). El arreglo por capas de la pared celular también influye en la capacidad de la madera para resistir las

acciones a tensión o a compresión. Debido a que las capas S<sub>1</sub> y S<sub>3</sub> forman una envoltura de microfibrillas entre cruzadas sobre la capa S<sub>2</sub>, ésta presenta

Tabla 3. Características anatómicas, básicas y combinadas. X1 es el área de pared de fibras (APF); X2 es el APF por la longitud de fibras; X3 es el porcentaje de radios; X4 es la suma del porcentaje de vasos más el porcentaje de parénquima axial; X5 es el número de radios por su ancho; X6 es el número de radios multiplicado por la longitud dividida entre el ancho de radios; X7 es el porcentaje de radios dividido entre el número de radios por el ancho de los mismos; X8 es el porcentaje de radios entre el número de radios por el producto de la longitud entre el ancho de radios; X9 es la densidad básica (pa/vv) y X10 es la contracción tangencial total (%)

Table 3. Anatomical features, basic and combined

ESPECIE / VARIABLE	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
<i>Acer skutchii</i>	26	23 686	17	23	210	57,4	0,081	0,296	0,51	8,45
<i>Ampelocera hottlei</i>	37	41 625	18	37	192	107,6	0,094	0,167	0,64	6,76
<i>Aphananthe monoica</i>	30	37 650	23	35	234	58,5	0,098	0,393	0,69	7,21
<i>Astronium graveolens</i>	43	58 609	14	17	245	47,2	0,057	0,297	0,72	7,46
<i>Brosimum alicastrum</i>	41	49 774	13	34	240	68,2	0,054	0,191	0,65	5,91
<i>Calophyllum brasiliense</i>	28	36 960	16	39	121	215,0	0,132	0,074	0,54	8,24
<i>Carya ovata var. mexicana</i>	36	45 576	19	22	162	165,4	0,117	0,115	0,62	11,04
<i>Cedrela odorata</i>	26	36 400	20	20	295	30,0	0,068	0,667	0,36	4,30
<i>Dialium guianense</i>	33	46 893	14	36	230	83,9	0,061	0,167	0,79	9,10
<i>Guarea grandifolia</i>	26	44 200	17	38	184	77,5	0,092	0,219	0,51	6,42
<i>Liquidambar styraciflua</i>	17	32 385	12	66	171	98,5	0,070	0,122	0,47	11,00
<i>Lonchocarpus castilloi</i>	39	67 392	15	36	207	55,2	0,072	0,272	0,69	7,89
<i>Lysiloma acapulcensis</i>	29	35 032	11	24	110	36,6	0,100	0,301	0,52	5,52
<i>Magnolia schiedeana</i>	32	52 544	21	28	264	46,7	0,080	0,449	0,53	9,62
<i>Manilkara zapota</i>	50	82 000	24	24	253	62,2	0,095	0,386	0,86	5,46
<i>Mosquitoxylum jamaicense</i>	50	56 450	14	22	182	64,6	0,077	0,217	0,59	7,64
<i>Platymiscium yucatanum</i>	31	36 146	13	35	150	102,6	0,087	0,127	0,61	7,75
<i>Quararibea funebris</i>	26	48 256	24	37	400	53,2	0,060	0,451	0,48	7,63
<i>Schizolobium parahybum</i>	22	28 072	12	19	160	37,8	0,075	0,317	0,30	5,34
<i>Swietenia macrophylla</i>	28	39 704	17	29	234	46,1	0,073	0,368	0,42	6,11
<i>Terminalia amazonia</i>	34	54 910	18	26	210	171,4	0,086	0,105	0,61	6,99
<i>Vatairea lundellii</i>	32	54 400	18	44	270	44,2	0,067	0,407	0,56	7,18
<i>Vochysia guatemalensis</i>	22	40 788	19	41	288	50,6	0,066	0,376	0,43	7,66

resistencia y rigidez ante las acciones de compresión paralela, es decir, disminuyen en algún grado el pando de las microfibrillas de la capa S<sub>2</sub> (Wardrop & Addo-Ashong 1965; Dinwoodie 1968; Grossman & Wold 1971; Keith 1971).

La lignina y las hemicelulosas que componen la pared forman una matriz rígida, en la que están embebidas las microfibrillas que

también contribuyen a la respuesta de la madera en compresión. La lámina media que une las células a lo largo de sus caras laterales, altamente lignificada, también contribuye a la resistencia de la madera (Panshin & DeZeew 1980). La pared celular está formada por microfibrillas orientadas paralelamente al eje del árbol, las cuales debido a su disposición y orientación con respecto al eje longitudinal de la pared celular, contribuyen a la resistencia mecánica de la madera. (Panshin & DeZeew 1980; Schniewind 1989). Éstas colaboran en la resistencia que presenta la madera ante las acciones de compresión y de tensión involucradas en la flexión.

Los puentes de hidrógeno existentes entre las microfibrillas celulósicas evitan que haya enlaces covalentes rígidos entre ellas, permitiendo su estabilidad, aún cuando haya movimiento de las mismas provocado por la aplicación de acciones a tensión o a compresión (Panshin & DeZeew 1980). Los puentes de hidrógeno, inter e intra cadenas celulósicas, forman una red compleja capaz de inhibir cualquier tendencia de las cadenas celulósicas a sufrir traslaciones o rotaciones dentro de las microfibrillas.

Los radios, elementos celulares dispuestos transversalmente con respecto al fuste y yendo del centro hacia la periferia de éste, al desviar el alineamiento paralelo de las fibras, influyen en la resistencia a la flexión de la madera, la desviación está en función del ancho de los radios (Myer 1922, Kuc'era & Bariska 1982). Los radios son indispensables para la fisiología del árbol que le permiten un flujo radial continuo de sustancias (Myer 1922; Kuc'era & Bariska 1982) cuando son muy abundantes o de gran tamaño, provocan una desviación en el alineamiento paralelo de los elementos celulares longitudinales, disminuyendo su capacidad para resistir acciones a compresión. Los sitios a lo largo de los elementos celulares longitudinales, modificados por la abundante presencia de radios de gran tamaño, son zonas débiles, donde ocurren inicialmente las fallas en compresión paralela (Wardrop & Addo-Ashong 1965; Dinwoodie 1968; Grossman & Wold 1971; Keith 1971; Guerrero *et al.* 1992). En este contexto, la abundancia, talla y disposición de los radios, podrían

afectar en mayor escala la resistencia en compresión de la madera que las fibras.

En las ecuaciones obtenidas en este análisis, la variable independiente que resultó incluida en cuatro de las cinco variables independientes estimadas (EMC, EMG, DJL y DJE) fue la densidad básica relativa (X10), lo que ratifica lo establecido por varios autores (Newlin & Wilson 1919; Liska 1965; Guerrero *et al.* 1992; Zhang 1994) de que, para estimar las propiedades mecánicas de la madera, la densidad básica es un índice confiable; aún cuando no resultó significativa para la estimación del MOR. El porcentaje de contracción, fue la segunda variable más frecuente en resultar incluida en los modelos obtenidos para MOR, EMC, EMG y DJL. Las variables que involucran la abundancia de las fibras (X1, X2) resultaron también significativas ( $p > 0.001$ ) para algunas MOR, EMC y DJE, mientras que la que involucra a los radios (X3), resultó con nivel de significancia únicamente para EMC. El volumen de vasos y parénquima presente en estas 23 maderas (variable X4), resultó significativa para la dureza en ambos sentidos, lateral y en los extremos.

La flexión es la unión de dos tipos de resistencia: en compresión y en tensión (Ifju y Kennedy 1962). Por lo tanto, es de esperarse que las características que desempeñan un papel importante en la resistencia a la flexión sean la unión de los caracteres involucrados en la compresión y en la tensión. La ecuación de la flexión incluye la densidad relativa y el porcentaje que corresponde a las fibras con relación al volumen total de elementos celulares, La primera abarca todas las paredes celulares y la segunda la microfibrillas de las mismas que no están afectadas por los radios. Las acciones de compresión y la tensión involucrados en esta propiedad, actúan sobre las microfibrillas al ser éstas las que por su disposición entran en contacto primero para resistir las fuerzas aplicadas.

En la ecuación de la compresión paralela a la fibra se incluyeron: una variable anatómica que indica el volumen de las fibras (x2), una relacionada con los radios (X3) y la densidad relativa (X9). Las dos primeras variables anatómicas se conjugan para conformar la tercera. Cada variable contribuye parcialmente y por sí misma, a la explicación de la

regresión. Además, el efecto de dos variables conjugadas no es la suma de los efectos individuales de las dos variables. La tercera variable de la ecuación es la densidad básica (pa/vv), que es un índice de la cantidad de paredes celulares por unidad de volumen que van a soportar la compresión.

Las variables incluidas en el modelo para el esfuerzo máximo en cortante paralelo son la densidad básica (X9) y la contracción tangencial (X10). La primera representa la cantidad de pared celular que resistirá las fuerzas cortantes y la segunda indica la cantidad de microfibrillas celulósicas alineadas paralelamente al eje longitudinal de las fibras, y por lo tanto, paralelas también a la aplicación de la fuerza. Cuando la fuerza cortante es paralela al plano radial, la disposición y presencia de los radios contribuyen interrumpiendo la cohesión de los elementos celulares longitudinales, por la desviación que provoca de su alineación, aún antes de la aplicación de la fuerza. Si el cortante es paralelo al plano tangencial, como se diseñan las probetas para determinar esta propiedad, los radios son cortados transversalmente, rompiendo transversalmente las cadenas de celulosa que los forman. Taylor (1969) consideró que en los radios los espacios intercelulares son escasos y sus paredes, con frecuencia, son relativamente gruesas en las zonas en donde un grupo de ellas hacen contacto, y que la falta de espacios intercelulares probablemente sea la causa que los radios tengan una densidad relativamente más alta que el resto de los elementos celulares.

Para la estimación de la Dureza Janka lateral (DJL) y en los extremos (DJE), las variables que resultaron con efecto significativo, fueron volumen de los vasos y células de parénquima (X4) células con poca área de pared celular y diámetros mayores que los de las fibras y los radios, representan la proporción de los tejidos más blandos de la madera y su abundancia condiciona la de los demás tipos de tejidos; también se incluyeron la cantidad total de las paredes (X9) representada por la densidad básica (pa/vv) y la cantidad de microfibrillas representada la contracción tangencial (X10). La resistencia que presenten las maderas a la incrustación de la semiesfera de acero dependerá

del volumen de paredes celulares de la madera, es la que tendrá mayor influencia tendrán por ser más gruesas que las de los elementos de vaso y las células de parénquima. En el caso de la Dureza Janka, la variable X10, no resultó incluida en el modelo.

Para predecir las propiedades mecánicas, los caracteres anatómicos seleccionados, por sí mismos, ofrecen limitaciones predictivas, ya que cada tipo de células contribuyen en conjunto y su influencia se sobrepone, con lo cual resulta difícil separar su efecto. Sin embargo, este trabajo, puede ser un punto de partida para un análisis más detallado de la evaluación de los diferentes elementos celulares y con sobre todo su efecto sobre otras propiedades mecánicas y a diferentes contenidos de humedad. En este estudio se analizaron las variables más sencillas y el menor número de ellas para explicar las propiedades mecánicas de la madera.

Las ecuaciones obtenidas en este trabajo son un elemento en la predicción de la respuesta mecánica de la madera en condición seca para este grupo de maderas. Para la validación de esta propuesta es recomendable que se realicen otras estimaciones comparando los resultados contra: 1) ecuación tradicional DB (pa/vv) - propiedad; 2) características anatómicas + DB (pa/vv) + CT y 3) propiedad - DB (pa/vv) + CT. Los índices de las tres ecuaciones deben de estar dentro de alguna categoría de las clasificaciones de resistencia ya establecidas, para que la predicción sea confiable. Siempre que se cumpla con el principio de ser datos pareados, es decir, obtenidos a partir del mismo material de ensayo. La obtención de modelos de predicción para las propiedades de las maderas mexicanas, basadas en la determinación de algunos caracteres anatómicos, ayudará a generar índices de comportamiento de una manera estadísticamente confiable sin requerir de grandes cantidades de material o acortando los tiempos de obtención de este conocimiento tecnológico.

México ocupa el primer lugar del mundo en riqueza de especies de reptiles, el segundo en mamíferos, el tercero en anfibios y el cuarto en plantas (Soberón *et al.* 1995). En términos muy gruesos, se plantea que en este país están representadas alrededor del 10% de todas las



especies existentes en el planeta, de las cuales un alto porcentaje son endémicas (Anónimo 1995). La conservación de la diversidad biológica del planeta es un problema de la más alta prioridad y de la más grave urgencia. Es necesario, a muy corto plazo,

aprender a hacer compatibles las necesidades crecientes de las poblaciones humanas con la necesidad de conservar los hábitat y usarlos en forma sostenida (Ezcurra 1990).

## LITERATURA CITADA

- Anónimo (1970) Carta de climas Villahermosa 15Q-VIII. Dirección de Planeación, Comisión de Estudios del Territorio Nacional y Planeación. CETENAL, UNAM. México, Distrito Federal.
- Anónimo (1979) Carta edafológica del estado de Chiapas. Secretaría de Programación y Presupuesto. Dirección General de Geografía del Territorio Nacional. México, Distrito Federal.
- Anónimo (1987) Wood Handbook: Wood as an engineering material. Agriculture Handbook No. 72. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Washington, DC. 466 pp.
- Anónimo (1995) Áreas naturales protegidas: economía e instituciones. Gaceta Ecológica. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP Nueva época No. 37: 37-46.
- Armstrong JP, Skaar C, DeZeeuw C (1984) The effect of specific gravity on some mechanical properties of some world woods. *Wood Science & Technology* 18: 137-146.
- Bárceñas-Pazos GM, Ortega-Escalona F (1994) Fichas tecnológicas de cuatro especies de madera del bosque mesófilo de montaña. *Revista Forestal Latinoamericana*. Instituto Forestal Latinoamericano 13/93. Mérida, Venezuela: 41-72.
- Bárceñas-Pazos GM (1995) Caracterización tecnológica de veinte especies maderables de la Selva Lacandona. *Madera y Bosques* 1(1): 9-38.
- Bodig J, BA Jayne (1982) *Mechanics of woods and wood composites*. Van Nostrand Reinhold Co. Inc. Nueva York. 712 pp.
- Bracho R, Sosa VJ (1987) Edafología. En: Puig H & Bracho R (eds). *El bosque mesófilo de montaña de Tamaulipas*. Instituto de Ecología, A.C., Publicación No. 21. México, Distrito Federal: 29-37
- Brazier JD, Howell RS (1979) The use of a breast height core for estimating selected whole tree properties of Sitka spruce. *Forestry* 52(2): 177.185.
- Brown HP, Panshin AJ, Forsaith CC (1952) *Textbook of wood technology*. Vol. II. The physical, mechanical, and chemical properties of the commercial woods of the United States. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York. 783 pp.
- Calzada I, Valdivia PE (1979) Introducción al estudio de la vegetación de dos zonas de la Selva Lacandona, Chiapas, México. *Biótica* 4(4): 149-162
- Cardoso MD (1979) El clima de Chiapas y Tabasco. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía. Distrito Federal. 99 pp.
- Coetzee JB (1973) The value of intra-increment variation studies and its related problems. International Union of Forestry Research Organizations (IUFRO), 5 Meeting. 22 September-12 October, Pretoria and CapeTown Stellenbosch Cities Seats. Republic of South Africa. Papers. 2: 182-185.
- De Vos J (1988) Oro verde. La conquista de la Selva Lacandona por los madereros tabasqueños. 1822-1949. Gobierno del Estado de Tabasco, Instituto de Cultura de Tabasco, Editorial Fondo de Cultura Económica. Distrito Federal. 330 pp.
- Demaree LA, Erickson RW (1976) Temperature-dependent affect of extractive content on redwood shrinkage. *Wood Science* 8(4): 227-233.
- Dinwoodie JM (1968) Failure in timber. Part 1. Microscopic changes in cell-wall structure associated with compression failure. *Journal of the Institute of Wood Science* 21: 37-53.

- Ezcurra E (1990) ¿Por qué hay tantas especies raras? La riqueza y rareza biológicas en las comunidades naturales. Ciencias No. Especial 4: 82-88.
- Frane J (1992) All possible subsets regression. En: Dixon WJ (ed) BMDP Statistical Software Manual. Vol. 2. University of California Press. Los Angeles: 1085-1104.
- Grossman PVA, Wold MB (1971) Compression fracture of wood parallel to the grain. Wood Science & Technology 5(2): 147-156.
- Guerrero-Ortega L, Guzzi A, Bárcenas-Pazos GM, Ortega-Escalona F (1992) Relación de la estructura de la madera de *Quercus sartorii* Liebm. con cuatro propiedades físico-mecánicas. Revista Forestal Latinoamericana 9: 35-60.
- Harada H (1984) The structure of the wood cell wall. En: Suo S (ed) Proceedings of Pacific Regional Wood Anatomy Conference. Tsukuba, Ibaraki, Japan, October 1-7: 1-5.
- Hernández CA (1977) Estudio de los recursos silvícolas y el potencial de la Selva Lacandona, Chiapas. Tesis de Lic. Universidad de Guadalajara, Escuela de Agricultura. Guadalajara. 121 pp.
- Ifju G, Kennedy RW (1962) Some variables affecting microtensile strength of Douglas-fir. For. Prod. Jour. 12(4): 213-217.
- Keith CT (1971) The anatomy of compression failure in relation to creep-inducing stresses. Wood Science 4(2): 71-82.
- Kuc'era LJ, Bariska M (1982) On the fracture morphology in wood. Part 1: A SEM-study of deformations in wood of Spruce and Aspen upon ultimate axial compression load. Wood Science & Technology 16(4): 241-259.
- Leclercq A (1980) Relationships between beechwood anatomy and its physic-mechanical properties. IAWA Bulletin n.s. 1(1-2): 65-71.
- Lindsay FW, Chalk L (1954) The influence of rays on the shrinkage of wood. Forestry 27(1): 16-24.
- Liska JA (1965) Research progress on the relationships between density and strength. Proceedings of the Symposium on density: A key to wood quality. Ed. U. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin: 89-87.
- López H, Ortega-Escalona F (1989) Angiospermas arbóreas de México No. 2. Anatomía de la madera de once especies. Instituto de Ecología, A.C.-Universidad Autónoma Metropolitana (Azcapotzalco). Boletín Técnico La Madera y su Uso No. 23. Xalapa. 128 pp.
- Mcintosh DC (1954) Some aspects of the influence of rays on the shrinkage of wood. Jour. For. Prod. Res. Soc. 4(1): 39-42.
- Meave del Castillo J (1990) Estructura y composición de la selva alta perennifolia de los alrededores de Bonampak. Instituto Nacional de Antropología e Historia. Colección Científica. Serie Arqueología. México, Distrito Federal. 147 pp.
- Miranda F (1952) La vegetación de Chiapas. Vols. I y II. Ediciones del Gobierno del Estado de Chiapas. Departamento de Prensa y Turismo. Tuxtla Gutiérrez. 334 pp.
- Myer JE (1922) Ray volumes of the commercial woods of the United States and their significance. Journal of Forestry 20(4): 337-351.
- Newlin JA, Wilson TRC (1919) The relation of the shrinkage and strength properties of wood to its specific gravity. Bulletin No. 676. US Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin: 8 pp.
- Orellana RAA (1978) Relaciones clima-vegetación en la región Lacandona, Chiapas. Tesis de Lic. UNAM. Facultad de Ciencias, Distrito Federal. 139 pp.
- Ortega-Escalona F; Castillo-Morales I, Carmona-Valdovinosios TF (1991) Angiospermas arbóreas de México No. 3. Anatomía de la madera de veintiséis especies de la Selva Lacandona, Chiapas. Instituto de Ecología, A.C.-Universidad Autónoma Metropolitana (Azcapotzalco). Boletín Técnico La Madera y su Uso No. 26. Xalapa. 200 pp.
- Panshin AJ, DeZeeuw C (1980) Textbook of wood technology. Structure, identification, properties, and uses of the United States and Canada. McGraw-Hill Book Co. New York. 722 pp.

- Petric B, Scukanec V (1975) Ray tissue percentages in wood of Yugoslavian hardwoods. *IAWA Bulletin* 3: 43-44.
- Puig H, Bracho R (1987) Climatología. En: Puig H & Bracho R (eds) *El bosque mesófilo de montaña de Tamaulipas*. Instituto de Ecología, A.C., Publicación No. 21. México, Distrito Federal: 39-54.
- Revol JF, Gancet C, Goring DAI (1982) *Wood Science* 14: 120-126.
- Schniewind AP (1959) Transverse anisotropy of wood - A function of gross anatomic structure. *For Prod Jour* 9(10): 350-359.
- Schniewind AP (1961) The effect of site and other factors on specific gravity and bending strength of California red Fir. *Forest Science* 7(2): 106-115.
- Schniewind AP (1989) *Concise encyclopedia of wood and wood based materials*. Pergamon Press. Oxford. 248 pp.
- Siemon GR, Heather WA, Hall N (1976) Compression strength values for Caribbean pine and their relationship with basic density and percentage latewood. *Aust. For. Res.* 7: 109-113.
- Soberón J, Durand L, Larson GJ (1995) Biodiversidad: conocimiento y uso para su conservación. *Gaceta Ecológica Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP Nueva época* No. 37: 15-18.
- Taylor FW (1968) Variations in the size and proportions of wood elements in yellow-poplar trees. *Wood Sci. & Technol.* 2: 153-165.
- Taylor FW (1969) The effect of ray tissue on the specific gravity of wood. *Wood & Fiber* 1(2): 142-145.
- Torelli N (1982) Estudio promocional de 43 especies forestales tropicales mexicanas. Programa de cooperación científica y técnica México-Yugoslavia. SARH. SFF., Distrito Federal. 73 pp.
- Vargas JO (1987) *Manual del técnico forestal. Anatomía y tecnología de la madera*. Universidad Mayor de San Simón. Escuela Técnica Superior Forestal. Misión Forestal Alemana. Cochabamba. 119 pp.
- Wardrop AB (1964) The structure and formation of the cell wall in xylem. En: Zimmerman MH (ed) *The formation of wood in forest trees*. Academic Press. New York: 87-134.
- Wardrop AB, Addo-Ashong FW (1965) The anatomy and fine structure of wood in relation to its mechanical failure. En: Osborn CJ (ed) *Proceedings of The Tewksbury Symposium on Fracture*. August 26-30, 1963. University of Melbourne, Melbourne 169-200.
- Williamson GB (1975) Pattern and serial composition in an old growth beech-maple forest. *Ecology* 56: 727-731.
- Zhang SH (1994) Mechanical properties in relation to specific gravity in 342 Chinese woods. *Wood & Fiber Science* 26(4): 512-526.