

Índices materiales en flexión estática de maderas mexicanas con potencial para uso en la construcción

Javier Ramón Sotomayor Castellanos
Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
email: madera999@yahoo.com

Resumen

El objetivo de la presente investigación fue determinar los índices materiales y proponer criterios de selección de 22 especies de maderas tropicales y una especie gimnosperma, con potencial para su uso en la construcción. Se realizaron pruebas de flexión estática. Se determinó el módulo de elasticidad y se proponen los índices materiales para la madera que realiza funciones de columna y viga. Las restricciones de resistencia elástica son 6 GPa, 8 GPa, 10 GPa y 12 GPa. La densidad aparente de la madera entre las especies varió de $0,338 \text{ g cm}^{-3}$ a $1,096 \text{ g cm}^{-3}$. El contenido de humedad promedio fue de 11,5 %. El módulo de elasticidad varió de 1,699 GPa a 13,328 GPa. El empleo de índices materiales, específicamente para componentes trabajando en compresión y flexión, puede servir para identificar especies de madera con la finalidad de emplearlas en proyectos de construcción que, de otro modo, no cumplirían los criterios mínimos para un análisis estructural.

Abstract

The goal of the research was to establish the material indexes of 23 species and to propose a selection criterion of 22 tropical woods and one gymnosperm species, with potential for its use in construction. Static bending tests were realized. Modulus of elasticity and material indexes were determined for wood functioning as column and beams. The restrictions of elastic strength are 6 GPa, 8 GPa, 10 GPa and 12 GPa were proposed. The wood apparent density among species ranged from $0,338 \text{ g cm}^{-3}$ to $1,096 \text{ g cm}^{-3}$. The moisture content was an average 11.5 %. The modulus of elasticity varied from 1,699 GPa to 13,328 GPa. The use of material indexes, applied to structural members working in compression and bending, can identify wood species for its use in construction projects which otherwise do not fulfill the minimal criteria for structural analysis.

Palabras clave:

Densidad aparente, módulo de elasticidad, diseño, cálculo estructural, maderas mexicanas

Keywords:

Apparent density, modulus of elasticity, design, structural calculus, mexican woods

Introducción

El diseño ingenieril con madera demanda cualidades específicas de sus propiedades mecánicas. Estas características se expresan, por ejemplo, como baja densidad aparente, alta elasticidad y conveniente resistencia mecánica. Con el objeto de solucionar estos requerimientos, se procede inicialmente a separar y clasificar un repertorio de materiales; en este caso un inventario de especies de maderas, las cuales posean características físico-mecánicas específicas que las catalogue como candidatas para satisfacer el proyecto de diseño [1]. Los aspectos relacionados con la disponibilidad del material, los costos de manufactura y la apreciación estética y comercial de la madera, son también de vital importancia en diseño. Sin embargo, no se discutirán aquí dado que van más allá del alcance de esta investigación.

Debido al amplio espectro de la biodiversidad forestal esta primera selección de especies puede ser muy extensa. Para delimitarla se proponen límites a las propiedades, lo cual resulta en una segunda selección de maderas que satisfacen de manera más precisa los requerimientos de diseño. Finalmente, la selección se optimiza clasificando las especies preseleccionadas de acuerdo a su capacidad para maximizar su rendimiento. El proyecto se complementa a partir del dimen-

sionado y la tecnología de puesta en servicio del elemento estructural.

El rendimiento de un material no está limitado únicamente por una sola característica, sino por una combinación de varias propiedades. Estas combinaciones de parámetros son nombradas índices materiales. Propiedades que cuando se maximizan, optimizan el rendimiento de un componente de ingeniería; en este caso actuando en un sistema estructural. En el ámbito de la tecnología de la madera, un componente que actúa en un sistema estructural puede tratarse desde la pieza de un mueble, hasta un sistema estructural que soporte una edificación, pasando por tableros compuestos de madera reconstituida. También maderas de ingeniería como las vigas laminadas de madera y viguetas con perfiles diseñados para aumentar su rigidez, y al mismo tiempo disminuir su peso.

Un tirante de madera funcionando como elemento estructural en una edificación, y solicitado principalmente en tensión a lo largo de su eje principal, requiere, por ejemplo, un valor alto en la relación rigidez-peso. Esta puede ser expresada por el módulo de elasticidad específico, que es definido por la relación E/ρ : donde E es el módulo de Young y ρ es la densi-

dad aparente. Para el caso de una viga resistiendo una carga de peso en dirección transversal a su eje principal, es decir, trabajando en flexión, el módulo de Young es sustituido por el módulo de elasticidad en flexión y se habla del índice material de elasticidad.

Cada índice material es idóneo según la función, el objetivo y las restricciones prescritas por los criterios de diseño. La función de un componente responde a la pregunta ¿Qué hace el componente? Por ejemplo, ¿Soporta cargas o admite deformaciones? El objetivo se refiere al cuestionamiento acerca de qué debe ser maximizado o minimizado: debe ser ligero y resistente, además de seguro. Las restricciones resuelven las incógnitas para definir las condiciones de seguridad o estabilidad que son deseables, y si es recomendable modificarlas. Por ejemplo, una viga no puede tener una relación de esbeltez mayor que 4 a 1, y al mismo tiempo una densidad aparente superior a $0,500 \text{ g cm}^{-3}$, sean estos requisitos de diseño o de normatividad. En el caso de un elemento estructural, la función, el objetivo y las restricciones definen los requerimientos límite para la selección de un material y la forma de su sección transversal.

El índice material es la combinación de las propiedades materiales que caracterizan su rendimiento para una aplicación prescrita [1]. Un componente estructural realiza la función física de soportar cargas, así como de satisfacer requerimientos funcionales. Estos requerimientos funcionales son especificados también a partir del proyecto de diseño: una viga debe soportar deformaciones de flexión, una columna debe soportar cargas axiales, una placa está sometida a deformaciones ocasionadas por esfuerzos de torsión, etcétera.

El diseño de un elemento estructural cuenta con tres criterios específicos: los requerimientos funcionales, la geometría y las propiedades del material del cual está hecho [1]. De tal forma que la función (1) describe el rendimiento del componente:

$$p = f(F, G, M) \quad (1)$$

Donde:

p = Rendimiento del componente

F = Requerimientos funcionales

G = Parámetros geométricos

M = Propiedades materiales

En la ecuación (1), p describe algún aspecto del rendimiento del componente, por ejemplo: su masa, su volumen o su costo; y f se refiere a que es una “función de” que “depende de”. El diseño óptimo se refiere a la selección del material y de la geometría que maximiza o minimiza p.

Los tres grupos de parámetros en la ecuación (1) son separables si ésta se escribe:

$$p = f_1(F) f_2(G) f_3(M) \quad (2)$$

En la ecuación (2), f_1 , f_2 y f_3 son funciones separables y pueden ser multiplicadas.

Cuando los grupos $f(\cdot)$ son separables, la selección óptima

de un material es independiente de los detalles del diseño, esto aplica para cualquier geometría G y para todos los valores de los requerimientos funcionales F. De tal forma que el subconjunto de materiales candidatos posibles a resolver el diseño, en este caso las especies de maderas disponibles, puede ser identificado sin resolver el problema completo de diseño, o incluso, sin conocer todos los detalles de F y G.

Esta argumentación permite una enorme simplificación: el rendimiento de F y G se optimiza si se maximiza $f_3(M)$, lo que define un coeficiente de eficiencia también llamado índice material [1]. Por contraste, las partes remanentes señaladas en la ecuación (2) $f_1(F)$ y $f_2(G)$, se especifican como coeficientes de eficiencia estructural o índices estructurales. Cada combinación de función, objetivo y restricciones de un proyecto de diseño conducen a un índice material, el cual es una característica de dicha combinación.

La argumentación precedente puede ser adaptada a la madera como material. La diversidad de materiales para el diseño de un producto en específico, puede ser transpuesta a la selección de las especies de madera disponibles para el diseño de productos y estructuras de madera. Ésta es la hipótesis de trabajo de la presente investigación.

En México existen bases de datos acerca de las características físicas y mecánicas de las especies de maderas endémicas. Esta información forma el cuerpo de conocimientos en ciencias y tecnología de la madera en el país. Estas compilaciones de datos reportan resultados experimentales [2] [3], y otras presentan datos estimados empleando modelos teóricos de predicción [4]. Complementando, [5] [6] [7] y [8] presentan características físico-mecánicas e índices materiales de maderas mexicanas determinadas con métodos no destructivos: ultrasonido, ondas de esfuerzo y vibraciones. Durante la revisión bibliográfica no se encontraron datos sobre índices materiales de maderas mexicanas derivados de pruebas de flexión estática, ni orientados hacia su aplicación en la industria de la construcción con madera.

Las propiedades de los materiales utilizados en el cálculo y diseño de ingeniería se pueden presentar en forma de mapas, donde las coordenadas representan sus características físicas. Esta estrategia permite al profesional apreciar integralmente las oportunidades de selección del material, cuyo índice cumpla satisfactoriamente la función, la sollicitación y las restricciones de un proyecto de diseño. Por ejemplo, maximizar la eficiencia mecánica de un elemento estructural y minimizar su peso. A esta estrategia se le llama elaboración y uso de mapas de propiedades materiales (en inglés material-property chart), y su aplicación va frecuentemente acompañada del desarrollo de programas computacionales para facilitar el proceso de selección. A esta idea se le asocian también indicadores de calidad, los cuales son igualmente presentados en mapas de propiedades materiales [9].

Para el caso de las especies de madera con uso actual o potencial para la edificación, esta idea se reporta con gráficos de sus características mecánicas e índices de calidad. Lo anterior en función de una característica física explicativa, normalmente la densidad aparente [10] [11]. Para el caso de características acústicas de la madera, los mapas de propie-

dades materiales son la combinación de descriptores de la señal acústica y dichas propiedades materiales, resultando en criterios de selección de especies para su uso en instrumentos musicales [12].

La necesidad de contar con índices materiales y criterios de selección de madera, para su valoración como material de ingeniería, se puede simplificar por medio de los siguientes argumentos. Por una parte, es necesario reevaluar las características mecánicas de madera aserrada proveniente de plantaciones comerciales, esto debido a su inminente inserción en el mercado. En ese sentido, se habla de árboles con rápido crecimiento y bajas densidades aparentes en relación a las de su especie. Por otra parte, la incorporación de especies no aprovechadas tradicionalmente en la industria de edificación y productos de madera, necesita de indicadores técnicos para su selección como material en el cálculo ingenieril. Finalmente, el desarrollo de nuevos materiales compuestos de madera y la tecnología numérica para su análisis estructural, requieren de información confiable para fines de diseño.

Uno de los corolarios usuales de las investigaciones acerca de esta temática, es la evaluación de las características tecnológicas propias de una muestra de madera, las cuales son determinadas experimentalmente. Ese punto de vista se confunde fácilmente con la clasificación o aptitud de toda la madera de un género o especie para cierto uso específico, el cual, finalmente, es el que tradicionalmente le dan los usuarios, los artesanos o los industriales del ramo.

Sin embargo, cuando el diseñador o el ingeniero quieren desarrollar un nuevo producto no existen criterios que les guíen hacia la correcta selección de una especie de madera; o lo opuesto, determinar si una madera en particular podría ser empleada en un producto innovador. Por su parte, la industria de la edificación requiere información de índices materiales de la madera. Esto permite diseñar y calcular componentes estructurales que trabajan en compresión y en flexión. De tal forma que, para este estudio de caso, se hace necesario proponer un enfoque racional para la apreciación de una madera basada en sus propiedades físicas.

El objetivo de la presente investigación fue determinar los índices materiales de 23 especies, así como proponer criterios de selección de maderas con potencial para su uso en la construcción. Para tal fin se realizaron pruebas de flexión estática, empleando probetas *ad-doc* de las maderas presentadas en las Tablas 1a y 1b.

Materiales y métodos

El material experimental consistió en madera de 23 especies recolectada en terrenos forestales de México. Las especies fueron identificadas en el Laboratorio de Mecánica de la Madera de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, perteneciente a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Las Tablas 1a y 1b presentan la lista de especies en estudio, ordenadas por su densidad aparente. Veintidós especies son angiospermas. Únicamente la especie *Abies religiosa* es gimnosperma, la cual se presenta como referencia por su empleo generalizado en la industria de la construcción. Para cada especie, se prepararon 20 probetas

con dimensiones de 0,05 m x 0,05 m en su sección transversal y con longitudes entre 0,4 m y 0,5 m. Las probetas estuvieron orientadas, en medida de lo posible, en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. La madera se estabilizó durante 24 meses en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C (± 1 °C) y una humedad relativa de 60 % (± 2 %), hasta que alcanzó un peso constante.

La magnitud del peso y del volumen de las probetas se sitúan entre las normalizadas de pequeñas dimensiones y libres de defectos propios a la madera [13] [14]; y las de las piezas aserradas con defectos y de dimensiones de empleo [15]. A diferencia de las probetas normalizadas, algunas de las probetas aquí estudiadas contenían pequeños nudos (máximo 0,003 m de diámetro), ligeras desviaciones de la fibra (máximo 1 en 20) y se encontraban un tanto desalineadas respecto a las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. Estas características son propias de las especies en estudio. Por lo tanto, se considera que las probetas fueron representativas de la madera que se emplea en la industria de la edificación.

El contenido de humedad (CH) de la madera, se determinó por el método de diferencia de pesos con grupos complementarios de probetas con dimensiones de 0,02 m x 0,02 m x 0,06 m. El promedio fue de 11,5 %, con un coeficiente de variación de 1 %. Se considera que este parámetro no interviene de manera significativa en los resultados. La densidad aparente (ρ_{CH}) de la madera, se calculó con el cociente peso/volumen de cada probeta al momento del ensayo.

Las pruebas de flexión estática consistieron en cargar la probeta ubicada en la parte media de la distancia entre apoyos (Figura 1), utilizando una máquina de pruebas universales *Tinius Osen*®. La velocidad promedio de desplazamiento de la carga fue de 0,002 mm min⁻¹. Para asegurar la sollicitación en el dominio elástico del diagrama carga-deformación se aplicó una carga máxima de 200 N, correspondiente a una deformación de flexión máxima de 0,0002 m.

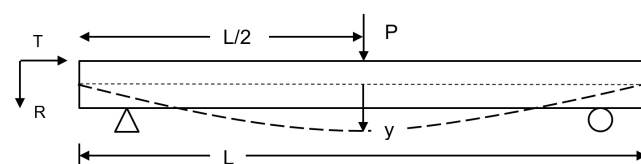


Figura 1. Diagrama de las pruebas de flexión P = Carga; L = Longitud de la probeta, dirección longitudinal; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial.

El módulo de elasticidad se calculó con la fórmula (3) [16]:

$$E = \frac{Pl^3}{48Iy} \quad (3)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad (N m⁻²)

P = Carga (N)

l = Distancia entre apoyos (m)

y = Deformación en L/2 (m)

I = Momento de inercia de la sección transversal (m⁴)

Los índices materiales se calcularon de acuerdo a la función, carga y requisito para columnas y vigas funcionando en una estructura con madera.

El índice IM_1 para la función columna, solicitada en compresión y requiriendo máxima rigidez con un peso mínimo, se calculó con la fórmula (4) [1]:

$$IM_1 = \frac{E}{\rho_{CH}} \quad (4)$$

El índice IM_2 para la función viga, solicitada en flexión y requiriendo máxima rigidez con un peso mínimo, se calculó con la fórmula (5) [1]:

$$IM_2 = \frac{E^{1/2}}{\rho_{CH}} \quad (5)$$

El criterio de selección viene dado por la restricción de resistencia elástica, y equivale al límite mínimo aceptable para un proyecto de diseño. Estos límites se grafican como rectas paralelas en los mapas de propiedades materiales, cuyos ejes están en escala logarítmica. Los criterios de selección son 6 GPa, 8 GPa, 10 GPa y 12 GPa. Estas restricciones propuestas se pueden adaptar a los criterios prescritos en la normalización de la industria de la construcción, así como en los códigos constructivos gubernamentales.

A manera de referencia, se pueden señalar las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de madera, contenidas en el Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México [17]. En el mismo se especifican valores correspondientes al 5° percentil para el módulo de elasticidad en maderas coníferas, que van de 4,9 GPa a 6,4 GPa, y para maderas latifoliadas, de 4,4 GPa a 11,8 GPa.

Resultados y discusión

Las Tablas 1a y 1b presentan los nombres de las especies, su densidad aparente con su clasificación de acuerdo con [18] (Anexo 1), y sus módulos de elasticidad. Los elementos estadísticos son la media (\bar{x}) y la desviación estándar (σ). El coeficiente de variación promedio para la densidad aparente fue de 6,28 % y para el módulo de elasticidad de 14,68 %, valores que son aceptables para la caracterización mecánica de la madera [16].

En la Figura 2 se presentan las dispersiones del módulo de elasticidad en función de la densidad aparente y su correlación en los resultados experimentales para cada una de las 23 especies estudiadas. Estos datos contrastan con los presentados por [19] para 43 especies tropicales mexicanas (Anexo 2). Cada uno de los puntos correspondientes a los resultados experimentales de una especie, representa el promedio de resultados de 20 probetas.

El módulo de elasticidad es función de la densidad aparente de la madera, el modelo de regresión es de la forma $(y) = a \ln(x) + b$, tal como se muestra en la Figura 2. Este resultado es comparable con los datos reportados en la bibliografía

[19]. No obstante que los datos de referencia citados aluden a especies diferentes a las aquí estudiadas, las magnitudes de los valores del módulo de elasticidad son mayores que los resultados experimentales, todos ellos en relación con su densidad aparente.

Tabla 1a. Nombre de las especies, densidad aparente, clasificación, y módulos de elasticidad.

Especie Clasificación	ρ_{CH} (g cm ⁻³)	E (GPa)
<i>Spathodea campalunata</i>	\bar{x} 0,338	1,699
Muy bajo	σ 0,018	0,364
<i>Gyrocarpus americana</i>	\bar{x} 0,391	3,406
Muy bajo	σ 0,014	0,279
<i>Abies religiosa</i>	\bar{x} 0,399	4,073
Muy bajo	σ 0,025	1,432
<i>Tilia mexicana</i>	\bar{x} 0,442	6,023
Bajo	σ 0,055	0,963
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	\bar{x} 0,448	3,637
Bajo	σ 0,035	0,456
<i>Cupressus lindleyi</i>	\bar{x} 0,486	6,208
Bajo	σ 0,065	1,213
<i>Cedrela odorata</i>	\bar{x} 0,517	4,863
Medio	σ 0,081	0,918
<i>Swietenia macrophylla</i>	\bar{x} 0,531	6,168
Medio	σ 0,035	1,163
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	\bar{x} 0,598	6,060
Medio	σ 0,022	0,398
<i>Dalbergia paloescrito</i>	\bar{x} 0,624	7,424
Medio	σ 0,048	1,723
<i>Tabebuia rosea</i>	\bar{x} 0,635	5,877
Medio	σ 0,034	0,651
<i>Fagus mexicana</i>	\bar{x} 0,642	6,926
Medio	σ 0,048	1,206

ρ_{CH} = Densidad aparente ; E = Módulo de elasticidad; \bar{x} = Media;
 σ = Desviación estándar; Clasificación [18](Anexo 1).

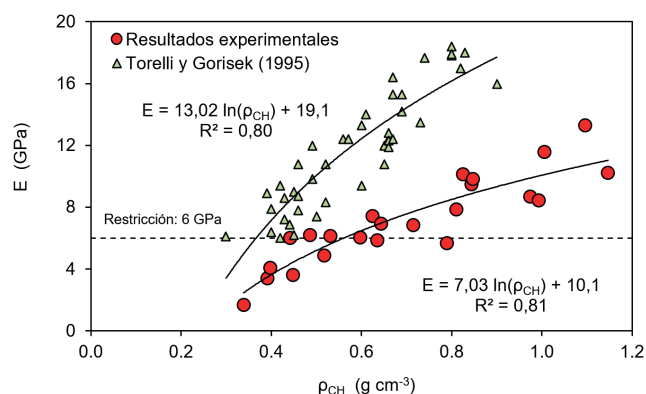


Figura 2. Dispersión del módulo de elasticidad (E) en función de la densidad aparente (ρ_{CH}) de los resultados experimentales y los datos de [19] (Anexo 2); así como su correlación y coeficiente de determinación (R^2).

Tabla 1b. Nombre de las especies, densidad aparente, clasificación, y módulos de elasticidad.

Especie Clasificación		ρ_{CH} (g cm ⁻³)	E (GPa)
<i>Andira inermis</i>	\bar{x}	0,716	6,824
Alto	σ	0,029	0,657
<i>Psidium sartorianum</i>	\bar{x}	0,789	5,686
Muy alto	σ	0,028	0,541
<i>Juglans pyriformis</i>	\bar{x}	0,810	7,868
Muy alto	σ	0,027	0,816
<i>Caesalpinia platyloba</i>	\bar{x}	0,825	10,130
Muy alto	σ	0,021	1,055
<i>Albizia plurijuga</i>	\bar{x}	0,844	9,478
Muy alto	σ	0,057	0,546
<i>Quercus spp.</i>	\bar{x}	0,847	9,810
Muy alto	σ	0,029	1,099
<i>Lysiloma acapulcensis</i>	\bar{x}	0,974	8,654
Muy alto	σ	0,036	0,942
<i>Cordia elaeagnoides</i>	\bar{x}	0,992	8,459
Muy alto	σ	0,081	0,997
<i>Acosmium panamense</i>	\bar{x}	1,005	11,562
Muy alto	σ	0,062	1,612
<i>Tabebuia chrysantha</i>	\bar{x}	1,096	13,328
Muy alto	σ	0,024	1,335
<i>Dalbergia granadillo</i>	\bar{x}	1,147	10,236
Muy alto	σ	0,059	2,584

ρ_{CH} = Densidad aparente ; E = Módulo de elasticidad; \bar{x} = Media;
 σ = Desviación estándar; Clasificación [18](Anexo 1).

Una posible explicación de este hecho es que fueron determinados con probetas normalizadas de pequeñas dimensiones. Alineadas, libres de defectos y anomalías propias de las maderas en cuestión [19]. En cambio, los resultados experimentales fueron determinados en probetas cuyas dimensiones, en su sección transversal, son próximas a las empleadas en elementos estructurales en la industria de la construcción; así como en productos comerciales de madera. Los valores experimentales disminuyeron a partir de la presencia de discontinuidades estructurales, y los posibles desalineados con respecto a las direcciones de anisotropía de la madera. Sin embargo, este orden de las magnitudes es aceptable para fines de diseño y cálculo, dado que es conveniente contar con parámetros de ingeniería representativos a los del material que se debe incorporar en el proyecto constructivo.

La magnitud promedio del módulo de elasticidad es menor que las reportadas por [19]. Aun así, sus correlaciones con la densidad aparente siguen tendencias similares y con altos coeficientes de determinación (R^2). Esta diferencia en los resultados de los dos grupos de maderas, probablemente es ocasionada por la diversidad de las características mecánicas de la madera entre especies [20]. Además, los datos de [19] fueron calculados con probetas normalizadas de pequeñas dimensiones y sin defectos aparentes. En contraste, los resultados experimentales de esta investigación derivan de probetas con características tecnológicas próximas a las de madera comercial, empleada en la industria de la construcción.

Otro factor relacionado con la diferencia entre resultados tiene que ver con que la configuración de las pruebas de flexión probablemente introdujo una deformación adicional, ocasionada por el esfuerzo cortante resultado de la relación con la longitud de la distancia entre apoyos y la dimensión de la probeta paralela a la dirección de la carga (L/h), que es menor a 15. Este caso no se da en pruebas normalizadas donde esta relación es mayor y se minimiza el esfuerzo cortante.

La información proporcionada por las Tablas 1a y 1b, así como la Figura 2, pueden orientar al ingeniero y al diseñador para seleccionar una especie de madera en un proyecto. Sin embargo, es difícil distinguir la especie que mejor se adapte a los requisitos y restricciones de diseño si se hace abstracción de la disponibilidad, del costo y de la valoración estética de una madera.

En este enfoque tradicional se fija reglamentariamente un límite inferior para emplear una especie de madera en usos constructivos (Figura 2). La restricción de diseño es de 6 TN m², que en este caso equivale al criterio de diseño. Para una norma constructiva o en código de diseño, si este valor absoluto se propone como límite inferior aceptable, aparentemente las siete especies que se sitúan por debajo de la línea de restricción no satisfacen el requisito. En este enfoque no se especifican ni la función ni el objetivo prescritos por algún criterio de diseño.

Para la selección de una especie que satisfaga los requisitos de diseño, se propone un enfoque donde se utilicen criterios de selección e índices materiales. En la Figura 3 se esquematiza la misma dispersión de los resultados experimentales del módulo de elasticidad (E), en función de la densidad aparente (ρ_{CH}). Ahí se ilustran también las líneas correspondientes a varias restricciones límites acordes con el índice (IM_1) para componentes que funcionan como columnas en compresión. Estas líneas se grafican acomodando la ecuación (4), de tal forma que, el E es función del índice material IM_1 y de la densidad aparente ρ_{CH} . El criterio IM_1 es constante y la densidad aparente varía. En este caso, los 4 límites planteados van de 6 GPa a 12 GPa, en intervalos de 2 GPa. Estos límites son los criterios de diseño propuestos. Un material cuyo módulo de elasticidad sea menor al del criterio no se recomienda para la elaboración de elementos estructurales.

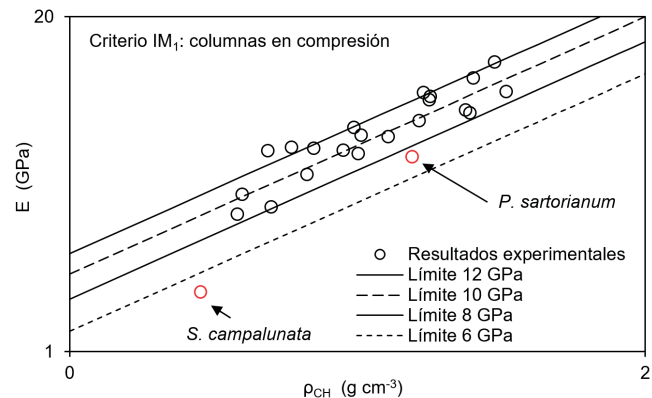


Figura 3. Dispersión del módulo de elasticidad (E) en función de la densidad aparente (ρ_{CH}) y las restricciones límites correspondientes al criterio IM_1 . La escala de los ejes es logarítmica.

De la observación de la Figura 3 se desprende que, de las cuatro especies cuya densidad aparente clasifica como baja, solo la madera de *S. campalunata* ($\rho_{CH} = 0,338 \text{ g cm}^{-3}$ y $E = 1,699 \text{ GPa}$) no satisface la restricción para el criterio mínimo de 6 GPa. De manera que se pueden aprovechar cinco especies que, de acuerdo con el enfoque tradicional, no calificaban para su empleo en columnas. Por ende, se observó que la madera de *P. sartorianum* ($\rho_{CH} = 0,789 \text{ g cm}^{-3}$ y $E = 5,686 \text{ GPa}$) es la única que no satisface el límite de 8 GPa, a pesar que su densidad aparente clasifica como alta. Consecuentemente, es probable que este enfoque analítico sirva para situar en su justa dimensión el empleo de especies para una función, un objetivo y sus restricciones específicas.

En ese sentido, el límite de 6 GPa puede ser la restricción necesaria para un caso particular. Por otra parte, los umbrales que van de 8 GPa hasta 12 GPa, pueden ser categóricos para condiciones de servicio que requieran asegurar, con mayor suficiencia, las condiciones de seguridad estructural y de servicio en una edificación o un producto de madera.

De modo similar, la Figura 4 explica la aplicación del índice IM_2 para vigas en flexión. En dicho esquema, se presenta la dispersión del módulo de elasticidad (E) en función de la densidad aparente (ρ_{CH}); y las restricciones límites correspondientes para el índice IM_2 , con un rango de los límites similar al índice IM_1 . En efecto, estas restricciones representan los criterios de selección de una especie. De esta manera, se puede elaborar un componente cuya función es, en este caso, la de una viga trabajando en flexión.

EDICIÓN DIGITAL

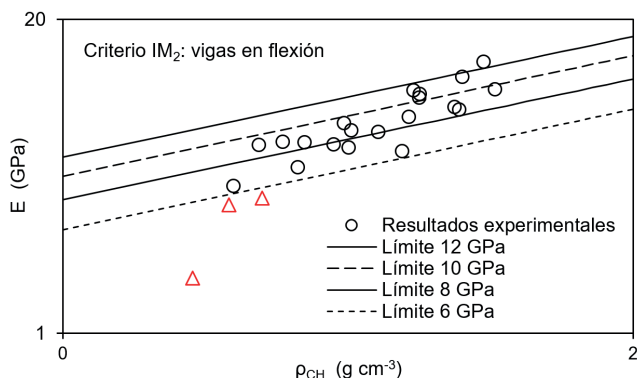


Figura 4. Dispersión del módulo de elasticidad (E) en función de la densidad aparente (ρ_{CH}) y las restricciones límites correspondientes al criterio IM_2 . La escala de los ejes es logarítmica.

De la observación de la Figura 4, se desprende que hay tres maderas más que no satisfacen el límite inferior de 6 GPa. Ello en relación con el criterio de vigas trabajando en flexión. Estas especies están representadas como triángulos, en contraste con las otras maderas que se representan como círculos.

Por una parte, se recuperan cuatro especies del enfoque tradicional (Figura 2); sin embargo, se eliminan dos en relación con el criterio de su uso como columnas (Figura 3). De aquí que la aplicación de los criterios de diseño y de selección de especies, para una función específica y no para un uso tradicional, puede modificar de manera sustancial la apreciación de una especie. Esta, de acuerdo con los cánones habituales, no podría satisfacer un requerimiento de resistencia.

La valoración de una especie de madera únicamente por la magnitud comparativa de su resistencia en cuanto a flexibilidad, como lo es el módulo de elasticidad, no es enteramente válida. Cuando se calcula un elemento estructural, uno de los objetivos de diseño es especificar las dimensiones que satisfacen las propiedades necesarias de su sección. Por lo tanto, si se emplea la ecuación (1) referente al rendimiento del componente, se requiere únicamente optimizar $f_3(M)$; es decir, establecer y emplear el índice material, así como satisfacer el criterio de diseño.

En la Tabla 2 se presenta la densidad aparente y los índices materiales para las especies en estudio. El índice IM_1 no se correlaciona con la densidad aparente ($IM_1 = 8,89 e^{0,157\rho_{CH}}$, con $R^2 = 0,03$). Sin embargo, el índice IM_2 , presenta una correlación $IM_2 = 6,14 e^{-0,657\rho_{CH}}$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,71$, aceptable en las ciencias de la madera. Estos resultados contrastan con la correlación lineal entre el módulo de elasticidad y la densidad aparente: $E = 10,428 \rho_{CH} - 0,151$ con $R^2 = 0,80$.

Tabla 2. Densidad aparente e índices materiales.

No.	Especie	ρ_{CH}	IM_1	IM_2
1	<i>Spathodea campalunata</i>	0,338	5,02	3,85
2	<i>Gyrocarpus americana</i>	0,391	8,71	4,72
3	<i>Abies religiosa</i>	0,399	10,21	5,06
4	<i>Tilia mexicana</i>	0,442	13,62	5,55
5	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	0,448	8,12	4,26
6	<i>Cupressus lindleyi</i>	0,486	12,76	5,12
7	<i>Cedrela odorata</i>	0,517	9,40	4,26
8	<i>Swietenia macrophylla</i>	0,531	11,61	4,67
9	<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	0,598	10,13	4,12
10	<i>Dalbergia paloescrito</i>	0,624	11,90	4,37
11	<i>Tabebuia rosea</i>	0,635	9,25	3,82
12	<i>Fagus mexicana</i>	0,642	10,79	4,10
13	<i>Andira inermis</i>	0,716	9,53	3,65
14	<i>Psidium sartorianum</i>	0,789	7,21	3,02
15	<i>Juglans pyriformis</i>	0,810	9,71	3,46
16	<i>Caesalpinia platyloba</i>	0,825	12,28	3,86
17	<i>Albizia plurijuga</i>	0,844	11,23	3,65
18	<i>Quercus spp.</i>	0,847	11,58	3,70
19	<i>Lysiloma acapulcensis</i>	0,974	8,88	3,02
20	<i>Cordia elaeagnoides</i>	0,992	8,53	2,93
21	<i>Acosmium panamense</i>	1,005	11,50	3,38
22	<i>Tabebuia chrysantha</i>	1,096	12,17	3,33
23	<i>Dalbergia granadillo</i>	1,147	8,92	2,79

ρ_{CH} = Densidad aparente (g cm^{-3}); IM_1 = Índice material para columnas;
 IM_2 = Índice material para vigas.

En ciencias de la madera, se acepta que la densidad aparente es un buen predictor del módulo de elasticidad, y de acuerdo con esto, lo es también para el criterio IM_2 , el cual se refiere a vigas trabajando en flexión. En cambio, la densidad aparente no predice el criterio IM_2 relativo a una viga trabajando en compresión. Desde otro punto de vista, los resultados descritos en la Tabla 2 son comparables con los reportados por [1] para maderas en general.

En la Tabla 2, los resultados son específicos para veintidós maderas tropicales con potencial para su uso en la construcción. De esta manera, el diseñador cuenta con información específica para una especie de madera. La selección final de una especie para un proyecto en particular dependerá de la disponibilidad del material, de los costos de manufactura y de la apreciación estética de la madera.

En la actualidad existen bases de datos con las características físicas y mecánicas de distintas especies de madera, las cuales son accesibles al ingeniero y al diseñador. En relación con ello, la reglamentación referente a la edificación con madera especifica los valores mínimos admisibles para el análisis estructural. De manera que, la propuesta de adaptar la metodología para la selección de un material, formulada por [1], puede ser viable.

Conclusiones

Se determinaron experimentalmente el módulo de elasticidad y la densidad aparente para 22 especies de maderas tropicales, y una especie gimnosperma. Estas con potencial para su uso en la construcción. Además, se determinaron los índices materiales para elementos estructurales funcionando como columnas y vigas.

La valoración de una especie de madera únicamente por la magnitud comparativa de su módulo de elasticidad, no es enteramente válida. Los criterios de diseño y de selección de especies en su aplicación para una función específica, y no para un uso tradicional, puede modificar de manera sustancial la apreciación de una especie; la cual, de acuerdo con los cánones habituales, no podría satisfacer un requerimiento de resistencia.

El empleo de índices materiales que son particulares a componentes trabajando en compresión y flexión, puede servir para identificar especies de madera empleadas en proyectos de construcción que, de otro modo, no cumplirían los criterios mínimos para un análisis estructural. Este enfoque analítico sirve para situar en su justa dimensión el empleo de especies para una función, objetivo y restricciones específicas.

La densidad aparente es un buen predictor del módulo de elasticidad. Lo es también para el criterio IM2 que se refiere a vigas trabajando en flexión. En cambio, la densidad aparente no predice el criterio IM2, relativo a una viga trabajando en compresión.

La selección de una especie de madera empleando índices materiales como criterio de preferencia, puede ser útil para especificar los valores mínimos admisibles para el análisis estructural, así como utilizarse para reglamentos de edificación con madera.

Agradecimientos

La investigación fue patrocinada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Referencias

- [1] Ashby, M.F. (2011). *Materials selection in mechanical design*. London: Butterworth-Heinemann.
- [2] Torelli, N. (1982). *Estudio promocional de 43 especies forestales tropicales mexicanas*. México: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- [3] Sotomayor C., J. R. (2015a). *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- [4] Sotomayor C., J. R. (2015b). *Comportamiento elástico de la madera*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- [5] Sotomayor C., J. R., Guridi-G., L. I., & García M., T. (2010). *Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas*. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos. Investigación e Ingeniería de la Madera, 6(1), pp. 3-32.
- [6] Sotomayor C., J. R., Banda C., Y., Ramírez P., & M., Suárez B., G. (2013a). *Características dinámicas e indicadores de calidad de la madera de Quercus spp. (encino) del Estado de Michoacán estudiada por métodos no destructivos*. Investigación e Ingeniería de la Madera, 9(2), pp. 14-29.
- [7] Sotomayor C., J. R., Ramírez P., M., & Suárez B., G. (2013b). *Características dinámicas e indicadores de calidad de la madera de Lysiloma spp. (tzalam) del estado de Quintana Roo estudiada por métodos no destructivos*. Investigación e Ingeniería de la Madera, 9(2), pp. 3-13.
- [8] Sotomayor C., J. R., Reyes R., L. A., Rincón G., E. U., & Suárez B., G. (2013c). *Módulos de elasticidad dinámicos e indicadores de calidad de cinco maderas mexicanas estudiadas por métodos no destructivos*. Investigación e Ingeniería de la Madera, 9(1), pp. 3-20.
- [9] Ashby, M. F., Bréchet, Y. J. M., Cebon, D., & Salvo, L. (2004). *Selection strategies for materials and processes*. Materials and Design, 25(1), pp. 51-67.
- [10] Ramírez P., M., & Sotomayor C., J. R. (2014). *Módulos de elasticidad y de ruptura de tres maderas angiospermas mexicanas*. En: Ramos, M., Aguilera, V. (Ed.), Ciencias de la Ingeniería y Tecnología. Guanajuato: Ecorfan. pp. 88-101
- [11] Sotomayor C., J. R., & Ramírez P., M. (2015). *Velocidad de onda y módulos de elasticidad por ultrasonido y ondas de esfuerzo de vigas de madera de Pinus spp.* Revista Ingeniería de Construcción, 30(1), pp. 69-79.
- [12] Wegst, U. G. K. (2006). *Wood for sound*. American Journal of Botany, 93(10), pp. 1439-1448.
- [13] International Organization for Standardization (ISO). (2014). ISO 13061-1:2014 Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. Geneva: International Organization for Standardization.

- [14] American Society for Testing Materials (ASTM). (2014). *ASTM D143-14 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. West Conshohocken: American Society for Testing Materials.
- [15] American Society for Testing Materials. (2010). *ASTM D2915-10 Practice for Sampling and Data-Analysis for Structural Wood and Wood-Based Products*. West Conshohocken: ASTM International.
- [16] Bodig, J., & Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of Wood Composites*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- [17] Gobierno del Distrito Federal. (2004). *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de madera*. I:103-BIS. Gaceta Oficial del Distrito Federal, México. pp. 54-87.
- [18] Sotomayor C., J. R., & Ramírez P., M. (2013). *Densidad aparente y características higroscópicas de maderas mexicanas*. Base de datos y criterios de clasificación. Investigación e Ingeniería de la Madera, 9(3), pp. 3-29.
- [19] Torelli, N. & Gorisek, Z. (1995). *Mexican tropical Hardwoods: Mechanical properties in green condition*. Holz als Roh- und Werkstoff, 53(6), pp. 421-423.
- [20] Bowyer, J. L., Shmulsky, R., & Haygreen, J. G. (2011). *Forest Products and Wood Science*. Oxford, Wiley-Blackwell.

Anexo 1. Criterios de clasificación de la densidad para maderas mexicanas [18].

Intervalo	Límites	ρ_{CH} (g cm ⁻³)
Muy bajo	Máximo	0,428
Bajo	Inferior	0,428
	Superior	0,516
Medio	Inferior	0,516
	Superior	0,692
Alto	Inferior	0,692
	Superior	0,780
Muy alto	Mínimo	0,780

ρ_{CH} : Densidad aparente.

Anexo 2. Lista de especies, densidad aparente y módulo de elasticidad de 43 maderas tropicales mexicanas [19].

	ρ_{CH} (g cm ⁻³)	E (GPa)		ρ_{CH} (g cm ⁻³)	E (GPa)
<i>Schizolobium parahybum</i>	0,30	6,1	<i>Misanteca pekii</i>	0,60	13,3
<i>Alchornea latifolia</i>	0,39	8,9	<i>Zuelania guidonia</i>	0,61	14,0
<i>Dendropanax arboreus</i>	0,40	7,9	<i>Pithecellobium arboreum</i>	0,65	10,8
<i>Poulsenia armata</i>	0,40	6,4	<i>Pseudolmedia oxyphyllaria</i>	0,65	12,0
<i>Cymbopetalum penduliflorum</i>	0,42	6,0	<i>Platymiscium af. Yucatanum</i>	0,66	12,4
<i>Swietenia macrophylla</i>	0,42	9,4	<i>Sickingia salvadorensis</i>	0,66	11,9
<i>Bursera simaruba</i>	0,43	7,2	<i>Terminalia amazonia</i>	0,66	12,8
<i>Guatteria anomala</i>	0,43	8,6	<i>Vatairea lundellii</i>	0,66	12,3
<i>Pseudobombax ellipticum</i>	0,44	6,9	<i>Aspidosperma megalocarpon</i>	0,67	16,4
<i>Pterocarpus hayasii</i>	0,45	9,0	<i>Lonchocarpus hondurensis</i>	0,67	15,3
<i>Spondias mombin</i>	0,45	6,2	<i>Vitex gaumeri</i>	0,67	12,4
<i>Nectandra spp.</i>	0,46	10,8	<i>Ampelocera hottlei</i>	0,69	14,2
<i>Simarouba glauca</i>	0,46	7,8	<i>Quercus anglohondurensis</i>	0,69	15,3
<i>Vochysia hondurensis</i>	0,46	8,7	<i>Brosimum alicastrum</i>	0,73	13,5
<i>Cordia alliodora</i>	0,49	9,8	<i>Lonchocarpus castilloi</i>	0,74	17,7
<i>Talauma mexicana</i>	0,49	12,0	<i>Dialium guianense</i>	0,80	18,4
<i>Pachira aquatica</i>	0,50	7,4	<i>Dipholis stevensonii</i>	0,80	17,8
<i>Calophyllum brasiliense</i>	0,52	10,8	<i>Sweetie panamensis</i>	0,80	17,9
<i>Pithecellobium leucocalyx</i>	0,52	8,3	<i>Quercus skinneri</i>	0,80	17,0
<i>Guarea glabra</i>	0,56	12,4	<i>Swartia cubensis</i>	0,83	18,0
<i>Sebastiania longicuspis</i>	0,57	12,4	<i>Manilkara zapota</i>	0,90	16,0
<i>Blepharidium mexicanum</i>	0,60	9,4			

ρ_{CH} = Densidad aparente; E = Módulo de elasticidad.