



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-1.1086>

Artículo de revisión

Aportes de investigación del INIFAP en tecnología de la madera y sus procesos de industrialización

Research contributions of INIFAP on wood technology and its industrialization processes

Juan Carlos Tamarit-Urias¹, Patricia Aguilar-Sánchez¹, Rogelio Flores-Velázquez² y Martha Elena Fuentes-López^{1*}

Abstract

The technological characterization of the wood of forest species in Mexico is essential to determine its optimal potential use and, thereby, achieve successful transformation and industrialization processes. Within this context, the *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)* (National Institute for Research in Forests, Agriculture and Livestock) (INIFAP), through strategic lines of research in science and technology of wood and forest industries and products, has generated scientific knowledge that contributes to improving production systems and processes in the forest products industry within the framework of sustainable development. A compilation and synthesis of the most important results drawn from relevant works in basic and applied research carried out by INIFAP during the years 1986 to 2020 is presented herein. The topics addressed in the sphere of wood technology are physics, mechanics and chemistry of wood, while in terms of industrialization processes, aspects of sawing, drying and machining of wood are developed. Due to the abundance of taxa whose wood is commonly classified as difficult to use, such as the group of oaks and others known as common tropical, emphasis has been placed on the description and use of this type of species for temperate and tropical regions of Mexico. Also presented herein are research perspectives and challenges in wood technology, forest industries and products.

Key words: Wood quality, technological characterization, industry and forest products, primary transformation processes, uses of wood, xylotechnology.

Resumen

La caracterización tecnológica de la madera de especies forestales de México es fundamental para determinar su uso potencial óptimo; y con ello lograr procesos de transformación e industrialización exitosos. En este contexto, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) mediante líneas estratégicas de investigación en ciencia y tecnología de la madera, e industrias y productos forestales ha generado conocimiento científico que contribuye a mejorar los sistemas y procesos de producción en la industria, en el marco del desarrollo sustentable. Se presenta una compilación y síntesis de los resultados obtenidos a partir de trabajos relevantes en investigación básica y aplicada que se han realizado en el INIFAP durante los años 1986 a 2020. En el presente documento se abordan temas en tecnología de la madera referentes a la física, mecánica y química de la madera; en tanto que, en materia de procesos de industrialización se desarrollan aspectos de aserrío, secado y maquinado de la madera. Por la abundancia de taxones cuya madera, comúnmente, se cataloga como difícil de utilizar tales como el grupo de encinos y de otras denominadas comunes tropicales, se ha puesto énfasis en la caracterización y aprovechamiento en ese tipo de especies para las regiones templadas y tropicales de México. Además, se incluyen las perspectivas y retos de investigación en tecnología de la madera, industrias y productos forestales.

Palabras clave: Calidad de la madera, caracterización tecnológica, industria y productos forestales, procesos de transformación primaria, usos de la madera, xilotecnología.

Fecha de recepción/Reception date: 26 de febrero de 2021

Fecha de aceptación/Acceptance date: 10 de agosto de 2021

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental San Martinito. México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: fuentes.martha@inifap.gob.mx

Introducción

México cuenta con 64.9 millones de hectáreas de bosques y selvas, ecosistemas en los que cohabitan 46 especies del género *Pinus* (pino), alrededor de 150 de *Quercus* (encino) y más de 62 taxones maderables tropicales de diversos géneros; en conjunto, sus taxa cubren 47.7 % de la superficie forestal nacional. La producción maderable en el año 2017 fue de 8.5 millones de m³ rollo; el pino contribuyó con 70.87 %; las especies comunes tropicales con 13.39 % y los encinos con 9.84 % (Conafor, 2019).

El potencial económico, social y ambiental que representan las especies maderables induce a generar conocimiento tecnológico para la industria forestal, que coadyuve a su mejor utilización, así como a lograr procesos de transformación e industrialización exitosos. El uso correcto de la madera demanda un conocimiento normalizado con estándares internacionales sobre sus atributos, que permitan inferir su comportamiento en los procesos de transformación y en los diversos tratamientos que se requieren para las condiciones de uso a que será expuesta.

En el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) se ha realizado investigación en tecnología de la madera, industrias y productos forestales; asimismo, se ha contribuido al conocimiento y uso de la madera mediante la caracterización xilotecnológica, a partir de líneas de investigación como anatomía macro y microscópica, durabilidad natural, preservación de maderas duras y blandas, entre otras. Sin embargo, en el presente documento solo se presentan los principales aportes derivados de la investigación relacionada a los aspectos físicos, mecánicos y químicos de la madera; así como, a los procesos de transformación primaria de aserrío, secado y maquinado, con énfasis en taxones que pertenecen al grupo de las coníferas con importancia comercial como *Pinus*, latifoliadas del género *Quercus* spp. y algunas especies tropicales clasificadas como duras.

Para integrar los resultados de investigación más relevantes en los temas de tecnología de la madera e industrias forestales antes señalados, se realizó una minuciosa y exhaustiva revisión documental en las publicaciones oficiales disponibles de la Serie

INIFAP. También, se consultó literatura científica en forma de artículos publicados por investigadores de esta institución. Para delinear un marco teórico básico y de discusión en cada tema, se revisó bibliografía científica especializada, así como las normas técnicas de caracterizaciones específicas. En menor medida, se incorporaron publicaciones de personal científico ajeno a la Institución, las cuales se utilizaron para efectos de contraste, referencia y complementariedad de la información consignada.

Con base en la premisa fundamental de que el fin último de la tecnología de la madera siempre será proporcionar elementos científicos-técnicos para que la industria forestal genere productos que satisfagan y solucionen necesidades de la sociedad, es de esperarse que con las aportaciones del INIFAP en esta materia sea posible avizorar perspectivas de investigación con temas y líneas de investigación que conformen una agenda actualizada, prioritaria y estratégica, que además privilegie la innovación, el crecimiento y el desarrollo; lo que contribuirá a que la industria forestal de México sea más eficiente y competitiva en el marco del desarrollo sustentable.

Física y mecánica de la madera

Las propiedades físicas y mecánicas de la madera son las más importantes para determinar su uso como madera sólida. Esos atributos sirven como índices de calidad para precisar el uso más conveniente; también, influyen en el comportamiento dimensional de la madera en sus planos transversal, tangencial y radial ante las condiciones climáticas del medio que pueden propiciar efectos no deseables. La resistencia de la madera es fuertemente afectada por la humedad y el sentido de la carga, en relación con el plano longitudinal. En sentido longitudinal, la resistencia a la flexión es directamente proporcional a la densidad de la madera. Las células longitudinales son estructuras que le dan rigidez y resistencia, dado que reciben de forma directa las cargas. Las propiedades físicas más estudiadas son la densidad básica (Db), el contenido de humedad (CH), las contracciones, la relación de anisotropía y el punto de saturación de la fibra (FSP) (Kollman, 1959).

Las propiedades físicas de la madera de algunos taxones del género *Quercus* se han determinado en los estados de Puebla, Guanajuato y Oaxaca (Fuentes y Flores, 1995; Honorato y Fuentes 2001). Los encinos son un grupo taxonómico con distribución y abundancia amplia en México, además tiene un alto potencial productivo; sin embargo, se aprovechan en usos y productos con bajo valor agregado. En su caracterización se emplean los métodos indicados en la Norma Americana ASTM D143 (Fuentes y Flores, 1995; Honorato y Fuentes, 2001). Se han estudiado las propiedades físicas de nueve especies de encinos: *Quercus affinis* Scheidw, *Q. glabrescens* Benth., *Q. crassifolia* Bonpl., *Q. mexicana* Bonpl., *Q. laurina* Humb. & Bonpl., *Q. obtusata* Humb. & Bonpl., *Q. rugosa* Née., *Q. durifolia* Seemen ex Loes. y *Q. castanea* Née., cuyas maderas se clasificaron con alta densidad, y sus valores oscilaron de 0.62 a 0.84 g cm⁻³ (Fuentes y Flores, 1995; Honorato y Fuentes 2001).

La densidad básica es el indicador más utilizado para determinar e inferir otras propiedades de la madera, su rendimiento y calidad. La variación de la densidad se presenta entre y dentro de las especies, además aumenta de la médula hacia la corteza; es el resultado del espesor de la pared celular, del diámetro de las fibras, de la cantidad y el tamaño de los vasos y de la composición química de la madera. En aquella cuya densidad es alta, aumenta la contracción y expansión provocadas por la humedad. La resistencia de la madera es mayor a medida que se incrementa la densidad, la cual se evalúa a partir del conocimiento del nivel de humedad al que se miden su masa y volumen (Panshin y De Zeeuw, 1980).

Las contracciones radiales totales se han determinado en un intervalo de 4.3-5.52 %; la contracción tangencial total entre 12.6-16.6 %; mientras que, la contracción volumétrica total en 16.21 a 19.0 % (Fuentes y Flores, 1995; Honorato y Fuentes 2001). Estos valores sugieren cambios dimensionales altos y muy altos, así como una elevada relación de anisotropía; lo que conlleva a una gran propensión a la deformación (rajaduras y agrietamientos) y a una menor estabilidad dimensional. Grandes diferencias en los valores de las contracciones entre los planos radial y tangencial pueden provocar defectos durante el secado, mismos que se acentúan

cuando el contenido de humedad es inferior al Punto de Saturación de la Fibra (SFP, por sus siglas en inglés) (Kollmann, 1959; Fuentes y Flores, 1995).

El SFP representa el punto de inflexión a partir del cual se presentan cambios importantes en las propiedades físicas y mecánicas. En el INIFAP se han obtenido porcentajes que fluctúan de 25 a 35 % de contenido de humedad. La anisotropía varía entre 2.5 y 3.4, registros que se relacionan con abundantes rayos uniseriados y poliseriados (Fuentes y Flores, 1995; Honorato y Fuentes, 2001). Valores que están dentro del intervalo establecido para las especies de angiospermas con duramen definido (Kollmann y Coté, 1968).

Las propiedades mecánicas definen el comportamiento, aptitud y capacidad de la madera para resistir fuerzas externas en sus diferentes planos; guardan una dependencia proporcional con la densidad y la humedad. La rigidez y resistencia mecánica son importantes en aplicaciones con fines estructurales, en el dimensionado de diferentes piezas para evaluar su deformación y determinar su resistencia.

La flexión estática se refiere a la resistencia que ofrece la madera a las cargas; así cuando se utiliza como una viga (cargas transversales a su eje longitudinal) se producen deformaciones y esfuerzos de compresión, cortante y tracción (Honorato y Fuentes, 2001). La compresión paralela a la fibra corresponde a la resistencia de la madera a las cargas, cuando se utiliza como columna. La madera presenta su menor resistencia a la tracción en el plano perpendicular y la mayor (de 10-20 veces más) en el sentido paralelo a la fibra; en la dirección transversal se produce una separación de las fibras, y en la longitudinal, la rotura de las mismas (Vignote y Martínez, 2006).

La resistencia a la tracción también depende de la densidad; al respecto, en la madera de primavera (más ligera) su resistencia es una sexta parte de la que se tiene en la madera de verano. La resistencia al esfuerzo cortante o cizalladura, frecuentemente, disminuye por los nudos o grietas en la madera y es equivalente a entre 10 y 15 % de la resistencia a la tensión paralela (Vignote y Martínez, 2006).

Los valores de las propiedades mecánicas de la madera de encino se han estimado en condición verde, a 12 % de contenido de humedad (cuadros 1 y 2) (Fuentes y Flores, 1995; Honorato y Fuentes, 2001), se basaron en la Norma Americana ASTM D143 (ASTM, 1992) y la Norma Francesa AFN NFB51-009 (1985) para evaluar la resistencia al impacto. Asimismo, se determinaron la flexión estática y compresión paralela a la fibra con los esfuerzos al límite proporcional, módulo de ruptura, módulo de elasticidad, trabajo al límite de proporcionalidad y trabajo a la carga máxima; además de, la compresión perpendicular a la fibra, tensión perpendicular, esfuerzo cortante, rajado, dureza e impacto. Consistentemente, los valores obtenidos a 12 % de humedad fueron superiores a la condición verde (Fuentes y Flores, 1995; Honorato y Fuentes 2001).



Cuadro 1. Propiedades mecánicas de la madera de especies del género *Quercus*.

Especie	CH	Flexión estática (kg cm ⁻²)			Compresión axial (kg cm ⁻²)			CP	Impacto		
		ELP	MOR	MOE	ELP	MOR	MOE	ELP	W	K	R
<i>Q. affinis</i> Scheidw	Verde	471	667	117	323	332	76	73	3.2	0.48	159
	12%	1 110	2 133	251	540	621	113	153	6.3	0.81	279
<i>Q. glabrescens</i> Benth.	Verde	508	732	123	356	370	84	78	4.4	0.62	176
	12%	984	1 384	195	568	650	124	132	5.3	0.69	260
<i>Q. crassifolia</i> Bonpl.	Verde	471	692	112	335	357	86	90	3.2	0.49	155
	12%	1 006	1 410	190	598	678	140	144	4.6	0.60	243
<i>Q. mexicana</i> Bonpl.	Verde	446	687	104	292	313	71	84	3.1	0.45	146
	12%	736	1 155	163	484	535	91	96	3.6	0.59	215
<i>Q. laurina</i> Humb. & Bonpl.	Verde	486	723	115	340	350	77	86	3.7	0.45	159
	12%	1 024	1 845	182	435	496	86	153	4.0	0.51	190
<i>Q. obtusata</i> Humb. & Bonpl.	Verde	459	681	263	295	331	348	81	4.0	0.28	209
	12%	750	1 108	434	499	590	328	190	5.6	0.32	224
<i>Q. rugosa</i> Née	Verde	376	625	210	239	289	213	67	4.4	0.29	172
	12%	711	1 194	364	423	558	259	172	5.1	0.32	210
<i>Q. durifolia</i> Seemen ex Loes.	Verde	398	608	235	230	276	229	85	3.5	0.28	188
	12%	662	1 022	298	439	539	331	140	3.4	0.30	190
<i>Q. castanea</i> Née	Verde	545	767	309	257	313	240	85	3.1	0.31	187
	12%	885	1 256	377	539	628	425	148	4.8	0.32	200

Fuente: Fuentes y Flores (1995); Honorato y Fuentes (2001).

CH = Contenido de humedad; ELP = Esfuerzo al límite de proporcionalidad; MOR = Módulo de ruptura; MOE = Módulo de elasticidad (kg cm⁻² × 1000); CP = Compresión perpendicular; W = Trabajo a la ruptura (KJ m⁻²); K = Coeficiente de resiliencia; R = Reacción instantánea a la ruptura (kg).



Cuadro 2. Otras propiedades mecánicas de la madera de especies del género *Quercus*.

Especie	Dureza PEF (kg)		Janka PAF (kg)		Cortante EM (kg cm ⁻²)		Rajado EM (kg cm ⁻²)		TP EM (kg cm ⁻²)	
	Verd	12 %	Verd	12 %	Verd	12 %	Verd	12 %	Verd	12 %
<i>Q. affinis</i> Scheidw	575	1 011	583	1 180	115	175	78	89	65	82
<i>Q. glabrescens</i> Benth.	730	908	696	1 042	120	152	73	93	66	67
<i>Q. crassifolia</i> Bonpl.	612	838	665	1 169	114	143	95	111	65	67
<i>Q. mexicana</i> Bonpl.	510	594	523	1 001	103	133	88	97	63	64
<i>Q. laurina</i> Humb. & Bonpl.	648	821	646	1 094	122	145	97	116	64	71
<i>Q. obtusata</i> Humb. & Bonpl.	792	1 320	799	1 443	109	208	93	99	66	66
<i>Q. rugosa</i> Née	733	1 234	752	1 361	114	192	72	95	46	57
<i>Q. durifolia</i> Seemen ex Loes.	658	904	674	1 099	121	184	85	112	62	68
<i>Q. castanea</i> Née	632	1 002	692	1 203	117	199	80	131	49	85

Fuente: Fuentes y Flores (1995); Honorato y Fuentes (2001).

PEF = Perpendicular a la fibra; PAF = Paralelo a la fibra; EM = Esfuerzo máximo; TP = Tensión perpendicular; Verd = CH verde.

La madera tiene su mínima resistencia mecánica en condición verde y a medida que se seca, esta mejora de manera significativa; así, se tiene que la resistencia a la compresión y a la flexión se duplica cuando la humedad corresponde a 12 y 15 %. En condición verde, las especies analizadas y clasificadas de acuerdo con Dávalos y Bárcenas (1998), Dávalos y Bárcenas (1999) y Sotomayor (2005) se ubicaron en un nivel medio de resistencia unitaria a la ruptura en los esfuerzos de flexión estática, compresión axial y elasticidad. Las especies se clasificaron como maderas de dureza lateral y transversal alta y muy alta; con un contenido de humedad de 12 % (valor usado internacionalmente para fines de comparación).

A medida que la madera se seca por debajo del SFP, las paredes celulares se vuelven más duras y rígidas; en consecuencia, hay un aumento de las propiedades mecánicas, excepto de la tenacidad. Las resistencias unitarias a la ruptura en flexión estática, se clasificaron como altas y muy altas, la elasticidad de alta a muy alta (Fuentes y Flores, 1995; Honorato y Fuentes 2001); lo que evidencia que son maderas muy rígidas que

tienden a deformarse poco. El módulo de elasticidad en el sentido longitudinal puede ser hasta 100 veces mayor que en el sentido perpendicular; y en el sentido radial, el módulo de elasticidad es dos veces más grande que en el tangencial. Las resistencias unitarias a la compresión axial fueron medias, en tanto que a la compresión perpendicular se clasificaron como altas (Fuentes y Flores, 1995; Honorato y Fuentes 2001).

Los valores de trabajo a la carga máxima resultaron con buena capacidad de amortiguamiento y alta resiliencia; presentaron su mayor resistencia al impacto en el plano tangencial más que en el radial, lo cual indica que son maderas de alta tenacidad, difíciles a la separación de las fibras.

Con los resultados de la caracterización física y mecánica combinados con información de estudios de anatomía de la madera (Pérez-Olvera, y Dávalos-Sotelo, 2008; Fuentes y Flores, 1995; Honorato y Fuentes 2001), se dedujo que las maderas analizadas son aptas para utilizarlas en la elaboración de productos con valor agregado como estructuras para la construcción, pisos industriales, artículos deportivos, así como en artesanías y muebles por sus características estéticas, diferentes tonalidades de color, veteado pronunciado, textura gruesa y porosidad anular que proporcionan vistosas superficies en corte tangencial que son de gran relevancia en ebanistería y chapa.

El hilo recto que presentan las especies de *Quercus* determina la facilidad para trabajar su madera en la elaboración de artículos torneados, tallados y labrados (Pérez-Olvera *et al.*, 2015); además de, usarla en tonelería, durmientes y carbón. Este último a partir de los residuos que se generan en los aprovechamientos y en la industria del aserrío en forma de ramas, puntas, tocones, taxones arbustivos con crecimientos sinuosos, cortezas, recortes, tiras y aserrín. La característica más importante que define la calidad y cantidad de braza que se forma durante la combustión, es la cantidad de carbono fijo (mayor a 70 %), ligado a otras propiedades y características de los encinos como su densidad alta, bajos contenidos de ceniza (3-6 %), materiales volátiles (15 %) y poder calorífico entre 30-33 MJ kg⁻¹; valores que representan fuentes importantes de energía (Bautista *et al.*, 2017; De la Cruz *et al.*, 2020).

Caracterización química de la madera

Es relevante conocer la composición química de la madera, la cual en una misma especie varía según la parte del árbol: raíz, tallo o rama; del tipo de madera: normal, tensión o compresión; de la ubicación geográfica, clima y condiciones del suelo (Pettersen, 1984). En investigaciones realizadas en el INIFAP, se ha determinado que el contenido de los compuestos químicos puede ser un poco mayor en las ramas que en la madera a 1.30 m de altura del tronco principal (Honorato y Hernández, 1998). La pared celular de maderas suaves y duras está compuesta, principalmente, por celulosa, hemicelulosa y lignina; cuyos contenidos porcentuales oscilan entre 35 y 50 %, 10-35 % y 15-40 %, respectivamente (Chen, 2014).

La determinación de celulosa, lignina y hemicelulosa es fundamental para inferir la aplicación de la madera en diversos procesos industriales como pulpa para papel, taninos, energía, preservadores orgánicos, tableros, plásticos, entre otros (Bautista y Honorato, 2005; Tamarit y López, 2007). El éxito de las industrias que consumen una gran cantidad de madera depende del conocimiento de su composición química (Honorato, 2002).

La diversidad de los compuestos químicos presentes en la pared celular, así como en su estructura, dificultan en algunas especies su obtención, extracción, purificación y separación. Esto conlleva a que, además de aplicar procesos clásicos de química analítica, se utilicen métodos y procesos modificados.

En México, la composición química de la madera se determina, con las normas TAPPI (*Technical Association of the Pulp and Paper Industry*) y ASTM, las cuales se ajustan según las condiciones del material recolectado (albura, duramen, corteza o mezclas) (Bautista y Honorato, 2005). Para la evaluación cuantitativa de los componentes químicos se realiza un análisis aditivo, en el cual la suma de todos los componentes debe ser 100 % (Tamarit y López, 2007).

En especies del género *Pinus* se ha estimado que los porcentajes de componentes químicos principales varían de 43.9-45.6 % para celulosa; 23.4-24.4 % para

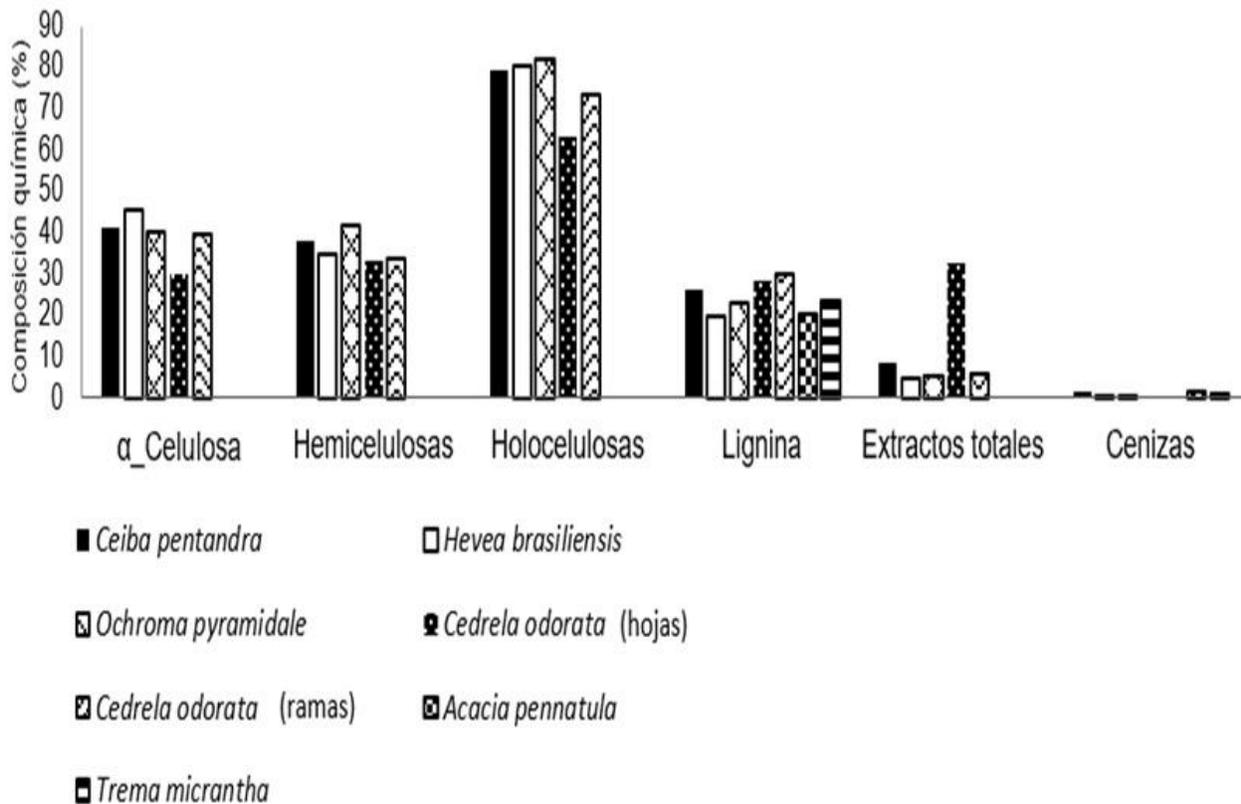
hemicelulosa; 66.7-70.0 % para holocelulosa; y 26.3-28.6 % para lignina (Honorato *et al.*, 2016). El análisis de componentes secundarios (extractos) se ha llevado a cabo con etanol en porcentajes entre 1.02 y 1.28 % y para solubles en etanol-benceno de 3.5-12 %. El contenido de cenizas se registró entre 0.25-0.3 % (Honorato *et al.*, 2016).

La madera de encinos mexicanos se ha subutilizado en forma de leña y carbón, por desinformación y desconocimiento de técnicas y procedimientos adecuados para destinarlas a usos de mayor valor (Honorato y Hernández, 1998; Santacruz y Espejel, 2004). Las determinaciones de sus compuestos químicos principales evidencian que el contenido de celulosa es de 37 a 56 %; hemicelulosa de 22-30 %; y lignina de 18-22 %. Los pentosanos se cuantificaron en la proporción de 18-23 % (Honorato, 1998; Honorato, 2002; Bárcenas *et al.*, 2008).

El contenido de extractivos de encinos se ha estudiado muy poco debido a la dificultad que hay para su purificación y el aislamiento de sustancias. Sin embargo, se ha determinado que la importancia de esos compuestos radica en la influencia que ejercen sobre otras propiedades, características y tratamientos de la madera. Altas concentraciones de extractivos y bajos valores de pH en la madera tienen un efecto negativo en los procesos de acabado y en la aplicación de adhesivos (Honorato y Hernández, 1998, Honorato, 2002).

Los extraíbles solubles en madera y corteza se han hecho con solventes como el etanol-benceno y el hidróxido de sodio (NaOH) al 1 %, además de utilizar agua caliente. Con esta última aplicada en cortezas se obtuvo que el contenido de extraíbles varió entre 10.92 y 21.25 % en proporción al peso total de la muestra de madera; cuando se usó madera, los valores fueron de 4.61 a 10.0 %. Con etanol-benceno en ambos tipos de materiales los contenidos fueron de 5-13.23 % y de 1.14-5.24 %, respectivamente. Al usar una solución de NaOH al 1 % en corteza las concentraciones variaron de 31 a 44.90 %, y para madera de 20.89-26 % del total de los extractivos presentes. El contenido de taninos en corteza de encinos correspondió al intervalo de 5.48-54.04 %, y en madera de 0.59-33.44 % (Honorato *et al.*, 2015; Rosales *et al.*, 2016; Apolinar *et al.*, 2017).

También se ha estudiado la composición química de la madera de las siguientes especies tropicales: *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. (ceiba), *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll. Arg. (hule), *Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb. (balsa), *Cedrela odorata* L. (cedro rojo), *Inga spuria* Humb. & Bonpl. ex Willd. (vainillo), *Juglans pyriformis* Liebm. (nogal), *Acacia pennatula* (Schltdl. & Cham) Benth. (huizache) y *Trema micrantha* (L.) Blume (capulín) (Figura 1); el propósito de esas investigaciones fue inferir sus posibles aplicaciones como pulpa para papel, resinas y adhesivos, vainillina, carbohidratos, bioplásticos, fenoles y flavonoides, entre otras; así como conocer su potencial energético para fines de usos combustibles, el cual se midió a través del poder calorífico cuyo intervalo resultó de 17.76-18.54 MJ kg⁻¹ (Honorato, 2002; Honorato *et al.*, 2015; Rosales *et al.*, 2016; Apolinar *et al.*, 2017).



Fuente: Honorato *et al.* (2015); Rosales *et al.* (2016); Apolinar *et al.* (2017).

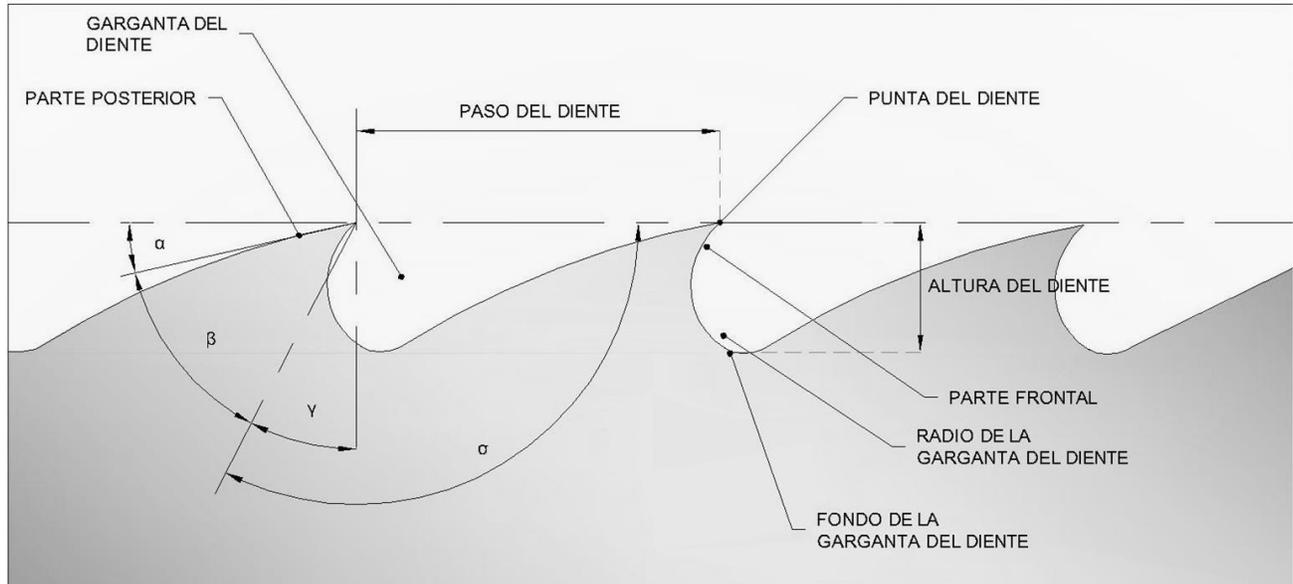
Figura 1. Composición química de la madera de especies tropicales.

La composición química de los taxones estudiados evidencia comportamientos específicos en diferentes procesos; así las especies con alto contenido de alfa-celulosa y hemicelulosa como *Ceiba pentandra*, *Hevea brasiliensis* y *Ochroma pyramidale* son ideales para procesos de pulpeo y bioconversión de carbohidratos.

Los extractos son solubles en diferentes solventes (alcoholbenceno, acetona, etanol, agua fría, agua caliente, entre otros) y pueden clasificarse en ácidos volátiles, aceites esenciales, ácidos resinosos y polifenoles. Los extractos son modificadores de las propiedades físicas, afectan la densidad y el contenido de humedad en equilibrio de la madera y, consecuentemente, modifican de manera indirecta diversas propiedades mecánicas. También, influyen en la durabilidad, color, olor y sabor de la madera. Los extractos fenólicos proveen de resistencia a la pudrición y al ataque de insectos (Darmawan *et al.*, 2011).

Las especies como *Ceiba pentandra* y las hojas de *Cedrela odorata* son ricas en extractivos, esto indica algún grado de afectación en los procesos de aserrío, secado, pulpeo, maquinado, encolado y acabados de la madera (Honorato *et al.*, 2016). Los contenidos inorgánicos (cenizas) más importantes en los procesos de aserrío y trabajabilidad son los cristales y el sílice que inciden en el mayor desgaste del filo de los elementos de corte; de ahí la importancia de que *Acacia pennatula* (Schltdl. & Cham.) Benth y *Ceiba pentandra* presenten contenidos de cenizas altos, entre 1.44 % y 1.59 %, respectivamente (Honorato *et al.*, 2016).

La lignina, rica en carbono e hidrógeno, afecta el pulpeo y los procesos de bioconversión, ésta se utiliza principalmente en la producción de poliuretano. La cantidad de lignina y los extraíbles se relacionan, estrechamente, con el poder calorífico; por lo que las especies estudiadas y señaladas en la Figura 1, pueden utilizarse con fines dendroenergéticos en los sectores industrial, doméstico y residencial; aunque *Acacia pennatula* y *Ceiba pentandra* registran valores altos en contenidos de cenizas que influyen en su uso como biocombustible (Honorato *et al.*, 2016).



α = Ángulo de limpieza o ángulo libre; β = Ángulo de diente; γ = Ángulo de corte o ángulo de ataque; σ = Ángulo frontal ($\gamma + 90^\circ$).

Figura 2. Geometría de los dientes de la sierra cinta.

La composición química es responsable del comportamiento en los diversos procesos de transformación de la madera; por ello, es relevante determinar los componentes químicos principales de los diferentes taxones, y con base en ellos definir los usos industriales específicos que garanticen el aprovechamiento óptimo e integral de la madera.

Aserrió

México se caracteriza por presentar un sector forestal industrial poco desarrollado, con altos costos de producción, tecnologías obsoletas e instaladas en unidades de producción de baja a mediana capacidad, con personal poco capacitado y por usar madera en rollo sin clasificar a precios altos. En el proceso de aserrío con sierra banda o sierra sin fin, la densidad y la dureza combinadas con un contenido de humedad bajo y la presencia de incrustantes minerales en la madera son factores determinantes en los esfuerzos a que se somete la sierra durante el corte; ocasionan

el desafilado, fisuras o grietas y pueden provocar la fractura de los dientes. Con la adopción de parámetros adecuados en las sierras como los ángulos del diente (Figura 2), paso de diente, profundidad de garganta, ancho de corte, entre otros es posible obtener una buena calidad de aserrío, la cual se evalúa mediante la uniformidad en el espesor de las tablas producidas.

La parte más importante de las sierras son los dientes, por el hecho de constituir los elementos de corte. Existen seis problemas de gran importancia que repercuten en los beneficios potenciales del aserrío con sierras banda: la simetría de los dientes, mantenimiento de los dientes, fisuras en el centro de la hoja, torcedura de la sierra, desgaste del perfil del volante; además de la relación de velocidad y profundidad del corte, en función de la capacidad de alimentación de la garganta (Zavala, 2003; Martínez *et al.*, 2006).

Respecto al aserrío, en el INIFAP se han realizado investigaciones referentes a la competitividad de la industria de la madera aserrada, los canales de comercialización, análisis de la industria, variación de corte en madera de pino y encino, entre otros. Sobresalen las determinaciones sobre las características que deben reunir las sierras banda para procesar la madera de encino, en las que la geometría de los dientes mostrada en la Figura 2 (paso de diente, profundidad de garganta, espacio libre lateral, ángulo de corte, ángulo del diente y ángulo libre) es relevante para aumentar la resistencia al desgaste e incrementar el rendimiento, ya que se asierra mayor volumen de madera con buena calidad de corte (Kirbach, 1982; Zavala, 2003; Martínez *et al.*, 2006).

Con el paso de diente se determina la cantidad de trabajo que una sierra puede realizar; para maderas duras y muy duras Sandvik (1964) indicó que el distanciamiento óptimo del paso de diente debe ser de 1.25 a 2.75". Schrewe (1983) señaló que el distanciamiento también se relaciona con el ancho y el calibre de la sierra, además del diámetro de los volantes. El paso de diente tiene que ser menor en sierras de 3" a 6" de ancho, calibre de 18 a 19" y diámetro de volantes de 4 a 6 pies; mientras que, un paso

de diente mayor es adecuado para sierras de 12 a 16" de ancho, con calibre de 12 a 13" y diámetro de volantes de 8 a 10 pies (Lunstrum, 1985).

Para aserrar madera de encinos, Flores *et al.* (2007a) recomiendan un paso de diente de 1 a 2¼" (25.4 a 57.15 mm) con base en el calibre de la sierra, a menores espesores de la sierra, se debe dar menor paso de diente (Figura 2). Flores *et al.* (2001) registran que el paso de diente para sierras de 8" de ancho es de 1.5"; Martínez *et al.* (2006) documentan que para sierras de 5" de ancho el mejor resultado se obtiene con un paso de diente de 1.25".

La función de la garganta en la sierra cinta es alojar el aserrín durante el asierre y, posteriormente, arrojarlo fuera del corte. Diversos estudios coinciden en que la profundidad de garganta apropiada para maderas duras con dientes recalcados es de 1/3 del paso de diente (Sandvik, 1964; Schrewe, 1983), o bien cercano a 10 veces el calibre de la sierra (Quezada, 1998). Al aserrar encino con sierras de 8", Martínez *et al.* (2006) obtuvieron los mejores resultados al usar una profundidad de garganta de 0.5"; Flores *et al.* (2001) refieren que con sierras de 5", la profundidad adecuada es de 7/16".

La forma en que actúa el filo de los dientes de la sierra depende de sus ángulos (de corte, de diente y de limpieza), en relación con la densidad de la madera por aserrar, la dirección del corte por realizar (longitudinal o transversal) y el tipo de sierra. El ángulo de corte (ángulo de ataque) para maderas duras que provee buenos resultados varía de 20 a 30° (Sandvik, 1964; Schrewe, 1983; Quezada, 1998); los más comunes son de 20 a 22° (Lunstrum, 1985). En Norteamérica se utiliza un ángulo de ataque de 30° con resultados satisfactorios en sierra cinta con dientes recalcados (Koch, 1964). En México, al evaluar sierras de 8" de ancho, se obtuvieron los mejores resultados con ángulo de ataque de 25° (Martínez *et al.*, 2006); mientras que, con sierras de 5" se lograron resultados aceptables al usar el ángulo de corte de 25 y 30° (Flores *et al.*, 2001).

Respecto al ángulo del diente, este no debe de ser muy pequeño para evitar que la punta del diente se debilite y se rompa bajo el efecto de la carga de corte, ni tan grande como para restringir la velocidad de alimentación y causar mayor consumo de

energía. Martínez *et al.* (2006) indican que para aserrar encino con sierras de 8" de ancho es ideal un ángulo de 45°; con sierras de 5" de ancho, el ángulo de diente puede ser de 44°, 50° o 55° (Flores *et al.*, 2001).

El ángulo de limpieza (Figura 2) define el corte libre y limpio de la sierra, ya que la separación entre la sierra y la madera debe empezar justamente en la punta del diente para evitar que el lomo del diente roce con la madera, lo cual causa fricción y sobrecalentamiento de los dientes. Para aserrar la madera de encino se recomienda un ángulo de limpieza de 8 a 12° (Lunstrum, 1985). En Norteamérica, con sierra banda ancha y dientes recalcados se usa, con buenos resultados, un ángulo de 16°. Para sierras de 8" de ancho, Martínez *et al.* (2006) determinaron que un ángulo de 20° da buenos resultados; con sierras de 5" los ángulos de limpieza de 10, 15 y 16° fueron los recomendados (Flores *et al.*, 2001).

En cada tipo de sierra existe un espacio libre lateral para obtener el ancho de corte adecuado, este varía en función de la geometría de los dientes, el contenido de humedad, el filo de corte, la alineación del equipo y el tipo de madera por cortar. Las maderas duras requieren que el espacio libre lateral sea 25 % mayor que el calibre de la sierra (Lunstrum, 1985). En México, se determinó que para aserrar madera de encino el espacio libre lateral corresponde a un intervalo de 0.8 a 0.9 mm (Flores *et al.*, 2001).

Dada la dificultad de aserrar la madera del género *Quercus*, es recomendable endurecer la punta de corte de los dientes, para lo cual puede aplicarse un recubrimiento con materiales como: estelite 12, carburo de tungsteno, platino de cromo, vanadio y endurecimiento con alta frecuencia; con ello, se aumenta la resistencia al desgaste del diente hasta en 100 % al aserrar maderas blandas, o 12 veces más en maderas duras. En la formación de la punta de corte del diente, se adiciona alguno de los materiales señalados, excepto cuando se utilice alta frecuencia, en cuyo caso se usa el propio acero de la sierra (Kirbach y Bonac, 1982; Kirbach, 1984). La sierra con dientes recubiertos con estelite 12 presenta mayor resistencia al desafilado, lo que permite aserrar un volumen de poco más del doble de madera de encino, comparativamente con la sierra de dientes recalcados (Flores *et al.*, 2001).

Secado

El proceso de eliminar el agua contenida en el interior de la madera hasta el punto en que la misma está en equilibrio higroscópico con el ambiente en el que se utilizará, se le conoce como secado. Es óptimo cuando la madera se seca en tiempos cortos, al menor costo y con la mejor calidad. Es un proceso necesario para la industria maderera que se realiza poco en México; en parte porque el consumidor se resiste a pagar el sobreprecio. Alrededor de 80 % de la producción de madera se comercializa recién aserrada o secada al aire libre, en este caso la madera solo alcanza valores de humedad en equilibrio con el ambiente (Fuentes *et al.*, 2008); para obtener contenidos de humedad menores, se debe recurrir al secado artificial mediante estufas de secado convencional (JUNAC, 1989).

Para el secado artificial o convencional de maderas latifoliadas como el encino, especies tropicales o de eucalipto, se tiene que considerar la heterogeneidad de sus características anatómicas y físicas.

Zavala (2000) refiere que las maderas duras tienen numerosos elementos de radio, grandes y amplios con uniones intercelulares más débiles, lo que favorece la aparición de rajaduras y deformaciones durante el secado al cambiar la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire a condiciones más secantes. Estas maderas duras presentan contracciones altas y desiguales que favorecen esfuerzos internos excesivos; y por tanto, la severidad en los defectos es mayor, contrario a lo que ocurre con el secado de las coníferas. Una forma de minimizar defectos como rajaduras, grietas, deformaciones, apanalamiento y colapso en la madera de encinos es mediante un secado lento y a veces con un presecado (Zavala, 2000).

Las maderas con altos contenidos de tálides son difíciles de secar, ya que se obstruye el flujo hídrico al reducir el diámetro de vaso haciéndolas impermeables, por lo que necesitan mayor tiempo de secado. Las tálides son comunes en el duramen de muchas angiospermas y en los vasos de madera de especies de clima templado como los encinos (Kollmann y Coté, 1968); la alta densidad básica y CH altos inducen a un secado prolongado.

En el INIFAP se han desarrollado programas de secado en estufa convencional, con temperaturas menores a 100 °C para maderas de especies latifoliadas y de coníferas (Fuentes *et al.*, 1997). En su generación se consideraron las variables de secado, las características anatómicas (porosidad, distribución de los vasos, orientación del hilo, contenidos celulares, proporción de albura-duramen) y las propiedades físicas (contenido de humedad, densidad, contracciones, anisotropía y punto de saturación de la fibra) para obtener madera seca de calidad (Fuentes *et al.*, 1997; Zavala, 2000).

Los problemas de secado de las maderas tropicales en estufa convencional, también se atribuyen a la dificultad para tener volúmenes grandes de una misma especie y a los costos altos que implica la extracción de pequeños volúmenes. Al respecto, se determinó que la mejor forma de secarlas es formando grupos de especies con valores similares de densidad básica, de contenido de humedad inicial y de espesor de tablas (Zavala, 2000) (Cuadro 3), lo cual conduce a una baja intensidad de defectos después del secado.



Cuadro 3. Programas de secado para maderas de especies tropicales y de encinos.

Especie	Espesor (pulg)	Programa de secado	Db (g cm⁻³)
<i>Bombax ellipticum</i> Kunth.	4/4	Inglesa H	0.44
<i>Brosimum alicastrum</i> Sw.	4/4	T7 B3	0.73
<i>Bucida buceras</i> (L.)	4/4	Inglesa C	0.85
<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg.	4/4	Inglesa D	0.41
<i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess	4/4	T3 D4	0.55
<i>Cedrela odorata</i> (L.)	4/4	Inglesa F	0.36
<i>Cordia dodecandra</i> A. DC.	6/4	Inglesa C	0.89
<i>Cordia eleagnoides</i> (Ruiz & Pav.) Oken	6/4	Inglesa C	0.53
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.	4/4	T8 F4	0.35
<i>Lysiloma bahamensis</i> Benth.	4/4	T3 C2	0.63
<i>Lonchocarpus castilloi</i> Standl.	6/4	Inglesa G	0.74
<i>Manilkara zapota</i> (L.) P. Royen	4/4	Inglesa R	0.90
<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb.	4/4	InglesaC; T3 D3	0.89
<i>Piscidia comunis</i> (Blake) L. M. Jchnst.	4/4	Inglesa E	0.68
<i>Platimiscium yucatanum</i> Standl.	4/4	Inglesa C	0.67
<i>Schizolobium parahybum</i> (Vell.) Blake	4/4	T5 F4	0.30
<i>Simarouba glauca</i> DC.	4/4	InglesaD; T9 A3	0.46
<i>Swietenia macrophylla</i> King.	4/4	T8 D5	0.42
<i>Terminalia amazonia</i> (J.F. Gmel.) Exell	3/4	T2 C3	0.66
<i>Quercus</i> sp	4/4	T4 D2	0.72
<i>Q. laurina</i> Humb. & Bonpl.	4/4	Especial Modif I	0.73
<i>Q. crassifolia</i> Bonpl.	4/4	Especial Modif I	0.76
<i>Q. potosina</i> Trel. Mem.	4/4	Especial Modif I	0.76
<i>Q. affinis</i> Scheidw non M.Martens & Galeotti	4/4	Especial Modif I	0.74
<i>Q. falcata</i> Michaux	4/4	T4 D2	0.59

Pulg = Pulgadas; Db = Densidad básica.

Zavala (2000) desarrolló dos programas para secar una mezcla de 33 taxones tropicales agrupados por su densidad básica. El primer programa se definió para especies de densidad baja y media; el segundo para las de densidad alta. Los resultados finales en ambos programas no afectaron la calidad de la madera seca. El tiempo de secado para las maderas blandas osciló de 5 a 7 días y de 10 a 25 días para las de densidad alta. El autor concluyó que para un proceso óptimo, las maderas de densidad media a baja requieren subdividirse en otros dos grupos adicionales y las maderas de densidad alta en cuatro grupos. En el Cuadro 3 se incluyen algunos programas inéditos desarrollados en el INIFAP para diferentes especies, mismos que se sustentan en los parámetros y variables que se describen en JUNAC (1989) y en Simpson (1991).

El secado es un proceso que requiere conocimientos y atención; no obstante, en las empresas ejidales, generalmente, lo lleva a cabo personal poco capacitado en el tema. Para atender las dificultades detectadas en la mediana y pequeña industria, Quintanar *et al.* (2009a y 2009b) generaron una guía para operar una estufa de secado y un manual de secado en estufa para madera de encinos, cuyo objetivo es facilitar este proceso a los operadores de estufas en comunidades rurales. Quintanar *et al.* (2012) elaboraron un protocolo de mejora continua para incrementar la calidad del secado de la madera en estufa, el que está orientado a optimizar los recursos humanos y materiales utilizados durante el proceso; el protocolo se fundamenta en tres criterios básicos: el apilado de la madera, la operación de la estufa y la aplicación del programa de secado.

El método de secado solar de madera aserrada también ha sido investigado en el INIFAP. Este consiste en un proceso intermedio entre el secado en estufa convencional y al aire libre, en el que se utiliza como fuente de calor a la energía proveniente del sol (Fuentes *et al.*, 1997). Se ha determinado que el éxito de los secadores solares está restringido a las zonas con alta radiación solar, ello favorece el secado durante el verano y al inicio del otoño (JUNAC, 1989). La escasez y los costos altos del combustible estimulan el interés de la industria para buscar la energía solar como fuente alternativa para secar maderas duras, ya que estas consumen de 60 a 70 % de la energía total usada en el proceso (Chen, 1981).

Al comparar los métodos de secado solar, secado en estufa convencional y al aire libre Fuentes *et al.* (1997) señalan que secar madera de encino en secador solar tiene mayores ventajas, porque no requiere de fuertes gastos de inversión y operación, como cuando se emplean las estufas convencionales, ni de tiempos tan prolongados como al aire libre, donde además se demerita la calidad de la madera y coarta el movimiento de capital en su comercialización.

Los secadores solares son eficientes en el secado de maderas suaves y, particularmente, de las maderas duras con alta propensión a desarrollar defectos y que requieren un secado lento. Las maderas duras como el encino se aserran poco en forma de tablas y tablones; en cambio, la madera de pino está disponible en diferentes medidas comerciales en todos los aserraderos de la zona centro y norte de México (Fuentes *et al.*, 2008). Por ello, al hacer la evaluación económica de un secador solar tipo invernadero con madera de pino (Figura 3), Quintanar *et al.* (2011) y Quintanar (2017) obtuvieron resultados favorables con una rentabilidad de 240 %, respecto a la inversión inicial; demostraron que la recuperación del costo de inversión se obtiene en la cuarta carga de secado. Para conocer la eficiencia y el tamaño óptimo del secador solar, los autores describieron el método y cálculos de diseño, así como la evaluación por unidad de volumen secado.



Figura 3. Secador solar para madera de tipo invernadero.

En México, existen diferentes diseños de secadores solares, cada uno con sus particularidades y ventajas. El prototipo de secador generado en el INIFAP corresponde al tipo *Oxford* modificado, el cual se promueve como una tecnología de transferencia y ha sido adoptada por ejidos y comunidades cooperantes en diferentes estados de la república mexicana. Los resultados han sido satisfactorios para la pequeña y mediana industria (Quintanar, 2005; Bárcenas *et al.*, 2010).

El éxito de los secadores en las comunidades rurales se atribuye a que son equipos, relativamente, económicos de construir, simples de operar y generan buena calidad de secado. Esto se explica porque la temperatura dentro del secador alcanza su valor máximo alrededor de las 14:00 horas y el aire dentro de la cámara enfría durante la noche, lo que aumenta la humedad relativa; secar durante el día y tener incrementos de humedad por las noches permite liberar o reducir las tensiones de secado, lo que favorece la calidad de la madera seca (Fuentes *et al.*, 1997).

Maquinado

El maquinado (trabajabilidad) de la madera consiste en la ejecución de operaciones que se realizan en la industria de segunda transformación a piezas de madera con máquinas y herramientas de corte, con la finalidad de dar las dimensiones y perfiles con la estética y calidad deseados, para su posterior utilización en la elaboración de productos terminados; además de, preparar la superficie para la aplicación de acabados artificiales (Tamarit y López, 2007). En este proceso, se hace la separación de astillas, virutas o aserrín mediante la acción del filo de herramientas de corte o de la fricción con lijas.

A nivel industrial el maquinado es fundamental en las etapas subsecuentes de transformación de la madera; cuando se realiza de manera adecuada, se incrementa su calidad y se da mayor valor agregado al producto final (Flores *et al.*, 2002; Flores y Fuentes, 2002).

En México, la calidad de maquinado de la madera por taxón se determina con base en ensayos indicados en la norma ASTM D 1666-11 (ASTM, 2011) adaptada a las

características tecnológicas de la madera y a las máquinas utilizadas en la industria forestal nacional. Los ensayos son cepillado, torneado, moldurado, barrenado y lijado; la calidad se evalúa a partir de la presencia y severidad de defectos existentes en la superficie de las probetas maquinadas.

Las maderas duras de especies tropicales y del género *Quercus* presentan mayor dificultad para maquinas. Para lograr una calidad aceptable se requieren condiciones particulares de trabajo tanto de las máquinas y herramientas de corte, como de algunas características de la madera.

La densidad básica de la madera se relaciona con su dureza y por tanto, con la resistencia a la penetración y al corte. Maderas más pesadas tienen un acabado al maquinado más terso y uniforme que las livianas; este fenómeno se explica porque las primeras tienen una menor proporción de espacios vacíos por unidad de volumen y mayor contenido de lignina, lo cual favorece que el colapso de la pared celular, a nivel de fibra por la acción de la punta del elemento de corte, sea menor (Thibaut *et al.*, 2016); aunque también, exigen un mayor consumo de energía. Cuando la madera tiene alto CH presenta menor resistencia al corte, pero el defecto de grano apelmusado se presenta con más intensidad; con bajo CH se observa el grano astillado, asimismo la resistencia al corte y el desafilado son mayores (Tamarit y Flores, 2012).

La presencia de sílice y cristales hacen abrasiva la madera y desafila más rápido al elemento de corte. Los principales factores inherentes a las herramientas y elementos de corte que influyen en la calidad del maquinado son el tipo de acero, ángulos de corte, profundidad de corte, velocidad de corte, velocidad de alimentación y número de marcas de cuchilla por centímetro (Tamarit y Flores, 2012). Estas condiciones de trabajo se pueden modificar para mejorar la calidad de maquinado.

El cepillado es el corte periférico realizado con las cuchillas de la máquina cepillo sobre la superficie de ambas caras de las tablas para obtener el espesor deseado, uniforme y una superficie tersa. Es la operación más importante de maquinado, ya que cualquier pieza antes de utilizarse en la elaboración de un producto final debe cepillarse, para darle valor agregado. Las maderas duras se cepillan mejor a favor del

hilo y con un ángulo de corte de cuchilla $\leq 20^\circ$. En maderas de muy alta densidad, se recomienda usar cuchillas con recubrimiento de carburo de tungsteno (Tamarit y López, 2007; Tamarit y Flores, 2012).

Los cepillos comerciales tienen un ángulo de corte de cuchilla de 30° , para reducirlo se debe hacer un bisel en las cuchillas. La acción de las cuchillas se distribuye sobre la pieza de madera, por lo que varía la velocidad de alimentación, o la velocidad de giro del cabezal porta cuchillas, lo cual origina un determinado número de marcas de cuchilla (NMC) por centímetro sobre la superficie cepillada (Flores *et al.*, 2002; Tamarit y Flores, 2012).

En maderas duras la calidad de cepillado se optimiza cuando se usa el menor ángulo de corte de cuchilla y el mayor NMC cm^{-1} (hasta 29); para aumentar el NMC se debe reducir la velocidad de alimentación a 7 m min^{-1} . La calidad se mejora cuando la profundidad de corte es de 1.5 mm para cepillos industriales y del doble en cepillos de menor capacidad (Tamarit y Flores, 2012).

El torneado provee la forma o un perfil específico a una pieza de madera, haciéndola girar en un torno contra una cuchilla o gurbia, cuyo filo corta en diferentes posiciones. Se realiza para elaborar productos decorativos de alta calidad y valor agregado. Para la mejor calidad de acabado, la velocidad óptima del torno depende del diámetro de la pieza de madera por tornear y de la velocidad de avance de la cuchilla hacia la madera; se recomienda tener al menos cuatro velocidades de giro (500, 1 000, 1 500 y 3 000 rpm) (Flores *et al.*, 2013). Para diámetros grandes, la velocidad de giro debe reducirse, e incrementarse cuando se torneen piezas de diámetro reducido (Tamarit y López, 2007).

Las maderas de alta Db y textura fina, con CH de 12 a 14 % presentan la mejor calidad de torneado; con menores CH, la intensidad de los defectos es mayor. El quemado de la superficie de la madera se evita al no usar una velocidad de giro alta y con una velocidad de alimentación lenta (Flores *et al.*, 2007b).

Con el moldurado se da un perfil y forma predeterminado a uno o más de los bordes de las piezas de madera; para ello, se utilizan fresas montadas en máquinas trompos; es

importante la tersura del corte y el detalle de la figura. Para moldurar maderas duras, la velocidad periférica debe ser de 40 a 60 m s⁻¹ en fresas con aspas de acero rápido, y de 50 a 80 m s⁻¹ con aspas de carburo de tungsteno; aplicar el mayor NMC cm⁻¹, con una velocidad de alimentación promedio de 3 m min⁻¹ para producir molduras curvas, y de 6 m min⁻¹ para molduras rectas. La velocidad de rotación del cabezal varía de 4 000 a 10 000 rpm (Flores *et al.*, 2002; Flores y Fuentes, 2002).

El taladrado (barrenado) consiste en hacer una o varias perforaciones de diámetros determinados a piezas de madera, con una o varias brocas colocadas vertical u horizontalmente en una máquina taladro, en la que se desplaza la madera hacia la broca o viceversa; es útil para realizar uniones o ensambles. Para lograr uniones fuertes, el corte debe ser limpio, liso, con desgarre de fibra mínimo y de tamaño correcto. La velocidad de corte tiene que ser baja, sin exceder 3 000 rpm; la calidad se reduce a medida que se usan brocas de grandes diámetros y longitudes, ya que la vibración de la broca aumenta produciendo perforaciones de diámetro mayor al previsto (Flores *et al.*, 2002; Flores y Fuentes, 2002).

Para maderas de alta densidad se usan brocas de acero de alta velocidad, de acero al níquel-cromo, o de carburo de tungsteno; la velocidad de penetración debe ser lenta al momento en que la broca hace contacto con la madera, después se aumenta a 75 cm min⁻¹, lo que evitará que se produzca una superficie quemada (Tamarit y López, 2007).

El lijado es la acción abrasiva de una lija sobre la madera para calibrar su espesor, obtener superficies planas y lisas, para remover marcas de astilla y otros defectos; también, para igualar las piezas que han sido unidas y así, preparar la superficie para la aplicación de un acabado artificial. El abrasivo común es la lija de papel con granos de cuarzo. En trabajos a escala industrial, se utilizan lijas de óxido de aluminio.

La velocidad de la lija se relaciona con la cantidad de madera por remover, una alta velocidad produce una superficie lisa y tersa, además requiere menos energía por volumen removido. El lijado se realiza en dirección paralela al grano, las tablas se lijan primero con lijas gruesas (No. 60 u 80) para remover defectos; enseguida, para dar el acabado final, se usan lijas finas (No. 100 o 120) (Flores *et al.*, 2002; Tamarit y López, 2007).

En diversas investigaciones llevadas a cabo por investigadores del INIFAP se presenta la calidad de maquinado para 37 especies de maderas duras ($Db \geq 0.55 \text{ g cm}^3$) (Flores y Fuentes, 1995; Zavala y Vázquez, 2001; Flores *et al.*, 2002; Flores y Fuentes, 2002; Flores *et al.*, 2007b; Tamarit y López, 2007; Flores *et al.*, 2013).

Resalta la necesidad de estudiar el maquinado de la madera de otros taxones presentes en bosques naturales y en plantaciones comerciales; además de, nuevos materiales a base de madera natural o modificada química o termomecánicamente, productos bioingenieriles como tableros, laminados y otros elaborados a partir de residuos agrícolas. También, se debe evaluar el desempeño de nuevos materiales (aleaciones) en forma de inserciones o recubrimientos en los elementos de corte y su relación con la calidad de la superficie maquinada, el efecto en el consumo de energía y en el nivel de desperdicios generados. Otra área por explorar es el desempeño de procesos de maquinado automatizados mediante sensores y control numérico computarizado (Thibaut *et al.*, 2016; Nasir y Cool, 2018).

Perspectivas de investigación

Los estudios xilotecnológicos realizados a la fecha en el INIFAP y en otras instituciones pares representan solo una fracción, con respecto al total de especies arbóreas de México. Es importante incrementar el número de estudios básicos orientados a caracterizar tecnológicamente la madera de especies de bosques y selvas naturales, así como de plantaciones comerciales que por su abundancia tienen potencial para su aprovechamiento comercial maderable; además las características xilotecnológicas determinan su respuesta y aptitud a diferentes procesos de transformación.

Asimismo, es fundamental que se actualicen protocolos de mejores prácticas de aserrío, secado y maquinado en los que se consideren las características de la industria forestal mexicana y las propiedades xilotecnológicas y dimensiones de las especies maderables; esto contribuirá, en alguna medida, a la reducción de la obsolescencia de las prácticas en la industria forestal. En estos trabajos es

fundamental que se involucren las empresas de productos forestales, así como los productores de la materia prima mediante la aportación de recursos y de materia prima para la ejecución de investigaciones.

Aunque en el INIFAP se ha realizado investigación sobre el aprovechamiento óptimo de residuos lignocelulósicos y de otras fuentes de biomasa; aún están pendientes el diseño innovador de nuevos bioproductos ingenieriles mixtos a base de madera; el análisis de ciclos de vida de los bioprocesos y dendroproductos; la optimización de procesos para la generación de dendroenergía a partir de biomásas verdes; la exploración de tratamientos termoquímicos a las maderas; el aprovechamiento sostenible de productos forestales no maderables; así como la generación, adopción y adaptación de tecnologías nuevas e innovadoras. Estos temas, actualmente, son incipientes en las líneas de investigación del Instituto, por lo que representan un amplio campo de acción y una ventana de oportunidad; y al mismo tiempo constituyen un reto para ulteriores estudios.

Adicionalmente, deben priorizarse líneas de investigación estratégicas que coadyuven a la innovación, crecimiento, desarrollo, competitividad y sostenibilidad de la industria forestal; tales como: la modificación de la madera para hacerla un material más durable, estable y competitivo; reciclado de materiales que en la actualidad se consideran residuos; la cuantificación de subproductos procedentes de biorrefinerías de residuos lignocelulósicos y bioenergías; la nanotecnología en las industrias de productos forestales.

Todos los temas y líneas referidas, en forma enunciativa más no limitativa, pueden integrar una agenda de investigación actualizada en ciencia y tecnología de la madera, misma que está en concordancia con Teischinger (2010) e implican conceptos como biotecnologías, ecoeficiencia, bioeconomía, entre otros; los cuales están orientados a tener un balance entre el desarrollo tecnológico, la conservación ambiental y el desarrollo socioeconómico.

Respecto a la industria forestal mexicana, es fundamental que se inicie un proceso gradual de transición para que se incorpore y aproveche todo el potencial del paradigma de la industria 4.0 (cuarta revolución industrial), en la cual de acuerdo con

Legg *et al.* (2021), se adoptan, incorporan y combinan tanto tecnologías, como técnicas emergentes sofisticadas de vanguardia; así como aplicaciones industriales recientes y afines de índole diversa que posibilitan que las empresas madereras sean más eficaces y competitivas.

Conflicto de intereses

Lo autores declaran que no existe conflicto de interés.

Contribución por autor

Juan Carlos Tamarit-Urias, Martha Elena Fuentes-López: conceptualización y organización de la investigación, recopilación y síntesis de información documental; Patricia Aguilar-Sánchez y Rogelio Flores-Velázquez: aporte de material bibliográfico y revisión del documento. Todos los autores participaron en el análisis de información, así como en la elaboración y corrección del documento.

Referencias

Apolinar H., F., J. A. Honorato S. y G. Colotl H. 2017. Caracterización energética de la madera de *Acacia pennatula* Schltld. & Cham. y *Trema micrantha* (L.) Blume. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 8(39): 71-81.

Doi:<https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i39.44>.

American Society for Testing and Materials (ASTM). 1992. Standard methods of testing small clear specimens of timber. Book of ASTM Standards 143. Vol. 04.09. Wood American Society for Testing and Materials. Philadelphia, PA, USA. pp. 37-78.

American Society for Testing and Materials (ASTM). 2011. Annual book of ASTM standards. ASTM D-1666-11 Standard methods of conducting machining tests of wood and wood-based materials (reapproved 1994). Philadelphia, PA USA. pp. 226-245.

L'Association Française de Normalization NFB (AFN). 1985. Norme Française, bois essai de Choc ou flexion dynamique. NFB51-009. Paris, France.

<https://m.boutique.afnor.org/xml/910127/false> (15 de diciembre de 2020).

Bárcenas P., G. M., R. Ríos V., J. R. Aguirre R., B. I. Juárez F. y J. A. Honorato S. 2008. Composición química y densidad básica relativa de la madera de dos especies arbustivas de encino blanco de la Sierra de Álvarez, SLP, México. *Madera y Bosques* 14(3): 81-94. Doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1431207>.

Bárcenas P., G. M., J. L. Martínez C., R. Rodríguez A., y J. Quintanar O. 2010. Estufa solar de secado de madera. Paquete tecnológico. Comisión Nacional Forestal. Xalapa, Ver. México. 33 p. <http://www.conafor.gob.mx/BIBLIOTECA/secado-madera.pdf> (15 de diciembre 2020).

Bautista H., R. y J. A. Honorato S. 2005. Composición química de la madera de cuatro especies del género *Quercus*. *Ciencia Forestal en México* 30(98): 25-50. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/view/853> (1 de septiembre de 2020).

Bautista V., U., F. Ruíz A., W. Santiago G. y W. Santiago J. 2017. Evaluación de la calidad de carbón vegetal elaborado a partir de madera de encino en horno de ladrillo. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 4(2): 127-137. 2007-9559.

[https://www.resesrxhgate.net/profile/Faustino-Ruiz-](https://www.resesrxhgate.net/profile/Faustino-Ruiz-Aquino/publication/322964063_EVALUACION-DE-LA-CALIDAD-DEL-CARBON-VEGETAL-ELABORADO-A-PARTIR-DE-MADERA-DE-ENCINO-EN-HORNO-DE-LADRILLO/links/5a3b3188458515a77aa8e8c7/EVALUACION-DE-LA-CALIDAD-DEL-CARBON-VEGETAL-ELABORADO-A-PARTIR-DE-MADERA-DE-ENCINO-EN-HORNO-DE-LADRILLO.pdf)

[Aquino/publication/322964063_EVALUACION-DE-LA-CALIDAD-DEL-CARBON-VEGETAL-ELABORADO-A-PARTIR-DE-MADERA-DE-ENCINO-EN-HORNO-DE-LADRILLO/links/5a3b3188458515a77aa8e8c7/EVALUACION-DE-LA-CALIDAD-DEL-CARBON-VEGETAL-ELABORADO-A-PARTIR-DE-MADERA-DE-ENCINO-EN-HORNO-DE-LADRILLO.pdf](https://www.resesrxhgate.net/profile/Faustino-Ruiz-Aquino/publication/322964063_EVALUACION-DE-LA-CALIDAD-DEL-CARBON-VEGETAL-ELABORADO-A-PARTIR-DE-MADERA-DE-ENCINO-EN-HORNO-DE-LADRILLO/links/5a3b3188458515a77aa8e8c7/EVALUACION-DE-LA-CALIDAD-DEL-CARBON-VEGETAL-ELABORADO-A-PARTIR-DE-MADERA-DE-ENCINO-EN-HORNO-DE-LADRILLO.pdf) (4 de agosto de 2021).

Chen, H. 2014. Chemical composition and structure of natural lignocellulose. *In*: Chen, H. (comp.). *Biotechnology of lignocellulose: theory and practice*. Springer. Dordrecht, The Netherlands. pp. 25-71. Doi: https://doi.org/10.1007/978-94-007-6898-7_2.

Chen, P. Y. S. 1981. Design and test of a 500 BF solar kiln. *Forest Products Journal* 31(3): 33-38.

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2019. El sector forestal mexicano en cifras 2019. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/1/7749El%20Sector%20Forestal%20Mexicano%20en%20Cifras%202019.pdf> (10 de diciembre de 2020).

Dávalos S., R. y G. M. Bárcenas P. 1998. Clasificación de las propiedades mecánicas de las maderas mexicanas en condición "verde". *Madera y Bosques* 4(1):65-70. Doi: <https://doi.org/10.21829/myb.1998.411368>.

Dávalos S., R. y G. M. Bárcenas P. 1999. Clasificación de las propiedades mecánicas de las maderas en condición "seca". *Madera y Bosques* 5(1): 61-69. Doi: <https://doi.org/10.21829/myb.1999.511355>.

Darmawan, W., I. S. Rahayu, D. Nandika and R. Marchal. 2011. Wear characteristics of wood cutting tools caused by extractives and abrasive materials in some tropical woods. *Journal of Tropical Forest Science* 23(3):345-353. <http://www.frim.gov.my/.../345-353.pdf> (10 de junio de 2021).

De la Cruz M., C., J. Herrera G., I. A. Ortiz S., J. C. Ríos S., R. Rosales S. y A. Carrillo P. 2020. Caracterización energética del carbón vegetal producido en el Norte-Centro de México. *Madera y Bosques* 26(2), e2621971. Doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2621971>.

Flores V., R. y M. E. Fuentes L. 1995. Características de maquinado de *Quercus affinis*, *Q. crassifolia*, *Q. glabrescens* y *Q. mexicana*. INIFAP. CIRCE. Puebla, México. Folleto científico No. 1. 14 p.

Flores V., R., M. E. Fuentes L. y J. Quintanar O. 2001. Desafilado de sierras banda en el aserrío de encinos. *Ciencia Forestal en México* 26(90): 55-71.

<http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/view/913>
(13 de noviembre de 2020).

Flores V., R., M. E. Fuentes L. y J. Quintanar O. 2002. Maquinado de dos especies de encino (*Quercus affinis* y *Q. crassifolia*) del estado de Guanajuato. *Ciencia Forestal en México* 27(91): 55-65.

<https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/view/908/2162>
(5 de febrero de 2021)

Flores V., R. y M. E. Fuentes L. 2002. Maquinado de la madera. *In*: Quintanar O., J. (Ed.). Características, propiedades y procesos de transformación de la madera de los encinos de México. INIFAP. CIRCE. Puebla, México. Libro Técnico No. 2. pp. 178-195.

Flores V., R., M. E. Fuentes L., J. Quintanar O., L. Vázquez S., J. C. Tamarit U. y H. M. Rodríguez C. 2007a. Aserrío de madera de encinos de Oaxaca en un aserradero portátil. INIFAP. CIRGOC. Puebla, México. Folleto técnico No. 43. 39 p.

Flores V., R., J. V. Rangel P., J. Quintanar O., M. E. Fuentes L. y L. Vázquez S. 2007b. Calidad de maquinado de la madera de *Quercus affinis* y *Quercus laurina*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 13(1): 41-46.

<http://www.scielo.org.mx/pdf/rcscfa/v13n1/2007-4018-rcscfa-13-01-41.pdf> (4 de diciembre de 2020). ISSN 2007-4018.



- Flores V., R., M. E. Fuentes L., J. Quintanar O. y J. C. Tamarit U. 2013. Maquinado de cuatro especies maderables de encino de la sierra de Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4(16): 22-33.
Doi:<https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i16.438>
- Fuentes L., M. E. y R. Flores V. 1995. Propiedades físico-mecánicas de la madera de cinco especies de encino del estado de Puebla. INIFAP. CIRCE. Puebla, México. Folleto científico No. 2. 14 p.
- Fuentes L., M. E., M. Fuentes S. y F. J. Zamudio S. 1997. Análisis comparativo de tres sistemas de secado con madera de cuatro especies de encino (*Quercus* spp.). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 4(1): 155-160.
https://www.academia.edu/16250082/1997_analisis_comparativo_de_tres_sistemas_de_secado_con_madera_de_cuatro_especies_de_encino_quercus_spp_ (4 de noviembre de 2020).
- Fuentes L., M. E., J. A. García S., F. J. Zamudio S. y J. A. Matus G. 2008. Políticas que afectan la competitividad de la producción de madera aserrada en México. *Madera y Bosques* 14(2): 29-39. Doi:<https://doi.org/10.21829/myb.2008.1421210>.
- Honorato S., J. A. 2002. Química de la madera de encinos. *In*: Quintanar O, J. (Ed.). Características, propiedades y procesos de transformación de la madera de los encinos de México. INIFAP. CIRCE. Puebla, México. Libro Técnico No. 2. pp. 86-106.
- Honorato S., J. A., F. Apolinar H. y G. Colotl H. 2016. Composición lignocelulósica de *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schlttdl., *P. leiophylla* Schlecht. & Cham. y *P. herrerae* Martínez. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(33): 47-56.
Doi:<https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i34.82>.
- Honorato, S., J. A. y J. Hernández P. 1998. Determinación de componentes químicos de la madera de cinco especies de encino del estado de Puebla. *Madera y Bosques* 4(2): 79-93. Doi: <https://doi.org/10.21829/myb.1998.421361>.

Honorato, S., J. A., G. Colotl H., F. Apolinar H. y J. Aburto 2015. Principales componentes químicos de la madera de *Ceiba pentandra*, *Hevea brasiliensis* y *Ochroma pyramidale*. *Madera y Bosques* 21(2): 131-146.

Doi:<https://doi.org/10.21829/myb.2015.212450>.

Honorato S., J. A. y M. E. Fuentes L. 2001. Propiedades físico-mecánicas de la madera de cinco especies de encino del estado de Guanajuato. *Revista Ciencia Forestal en México* 26(90): 5-28.

<http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/>
(15 de diciembre de 2020).

Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC). 1989. Manual del Grupo Andino para el secado de maderas. Junta del Acuerdo de Cartagena. Lima, Perú. 418 p.

<https://books.google.com.mx/books?id=osBJAAAACAAJ> (10 de noviembre de 2020).

Kirbach, E. D. 1984. New methods for reducing saw tooth wear and maintenance. *Modern Sawmill & Panel Techniques* 1. Vol. 1 Proceeding of North American Sawmill & Panel Clinic. OR, USA. pp. 40-49.

Kirbach, E. D. and T. Bonac. 1982. Dulling of sawteeth tipped with a stellite and two cobalt-cemented tungsten carbides. *Forest Product Journal* 32(9): 42-45.

Koch, P. 1964. *Wood machining processes*. Donald Press Company. New York, NY, USA. 530 p.

Kollmann, F. 1959. *Tecnología de la madera y sus aplicaciones (Tomo I)* Instituto Forestal de Investigación y Experiencias y Servicio de la Madera. Madrid, España. 675 p.
http://libros.inia.es/libros/product_info.php?products_id=658 (15 de octubre de 2020).

Kollmann F. and W. A. Coté. 1968. *Principles of wood science and technology*. Vol 1: Solid Wood. New York, NY, USA. 592 p.

- Legg, B., B. Dorfner, S. Leavengood and E. Hansen. 2021. Industry 4.0 implementation in US primary wood products industry. *Drvna Industrija* 72(2): 143-153. Doi: <https://doi.org/10.5552/drvind.2021.2017>.
- Lunstrum, S. J. 1985. Balanced saw performance. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Utilization. 12. Madison, WI, USA. Technical Report No. 17 p.
- Martínez S., M., J. Quintanar O., R. Flores V., P. Juárez T., H. E. Alanís M. y M. Alarcón B. 2006. Manual técnico para el asierre y secado de madera de encino en el estado de Chihuahua. INIFAP. CIRNOC. Chihuahua, Chih., México. Folleto técnico No. 36. 41 p.
- Nasir, V. and J. Cool. 2018. A review on wood machining: characterization, optimization, and monitoring of the sawing process. *Wood Material Science and Engineering* 1-16. Doi: <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1465465>.
- Pérez-Olvera, C. P. y R. Dávalos-Sotelo. 2008. Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encinos) de México. *Madera y Bosques* 14(3):43-80. Doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1431206>.
- Pérez-Olvera, C., R. Dávalos-Sotelo, R. Limón G. y P. A. Quintanar I. 2015. Características tecnológicas de la madera de dos especies de *Quercus* de Durango, México. *Madera y Bosques* 21(3):19-46.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712015000300002&lng=es&nrm=iso>. ISSN 2448-7597 (15 de julio de 2021).
- Panshin, A. J. y C. de Zeeuw. 1980. Textbook of Wood Technology. Structure, identification, properties, and uses of the United States and Canada. McGraw-Hill, New York, NY, USA. 722 p.
- Petterson R., C. 1984. The Chemical Composition of Wood. *In*: Rowell, R. (ed). The Chemistry of Solid Wood. American Chemical Society. Washington, DC, USA. pp. 57-126. Doi: <https://doi.org/10.1021/ba-1984-0207.ch002>.

Quezada F., A. 1998. Acondicionamiento y manutención de sierras huinchas. Manual No. 22. Instituto Forestal Chile. Santiago, Chile. 106 p.

Quintanar O., J. 2005. Construcción y operación de un secador solar para madera. INIFAP. CIRCE. Puebla, México. Folleto Técnico No. 2. 46 p.

Quintanar O., J., M. E. Fuentes L. y R. Flores V. R. 2009a. Manual para el secado en estufa de madera de encinos de Oaxaca.. INIFAP. CIRGOC. Puebla, México. Folleto Técnico No. 50. 70 p.

Quintanar O., J., M. E. Fuentes L. y R. Flores V. 2009b. Planeación e instalación de estufas para secado de madera. INIFAP. CIRGOC. Puebla, México. Folleto Técnico No. 48. 48 p.

Quintanar O., J., M. E. Fuentes L. y J. C. Tamarit U. 2011. Evaluación económica de un secador solar para madera. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(7): 97-104. Doi: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i7.561>.

Quintanar O., J., M. E. Fuentes L. y R. Flores V. 2012. Protocolo de mejora continua para incrementar la calidad en el estufado de la madera. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(13): 87-93. Doi: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i13.491>.

Quintanar O., J. 2017. Secado solar: metodología para el diseño y evaluación de un secador solar tipo invernadero utilizado en el secado de madera. *Revista de Aplicación Científica y Técnica* 3(9): 18-23.

https://ecorfan.org/spain/researchjournals/Aplicacion_Cientifica_y_Tecnica/vol3num9/Revista_de_Aplicacion_Cientifica_y_Tecnica_V3_N9_3.pdf (15 de octubre de 2020).

Rosales C., M., J. A. Honorato S., A. B. Santos G., M. E. Pérez L., G. Colotl H. y V. Sánchez M. 2016. Composición química de las hojas y ramas de *Cedrela odorata* L. de dos plantaciones forestales como fuente de materia prima lignocelulósica. *Madera y Bosques* 22(2): 131-146.

Doi:<https://doi.org/10.21829/myb.2016.2221330>.

- Sandvik. 1964. Manual sobre hojas de sierra cinta ancha para madera. Sandvik Steel. Sandviken, Suecia. 63 p.
- Santacruz G., N. y A. Espejel R. 2004. Los encinos (*Quercus*) de Tlaxcala, México. Ed. Universidad Autónoma de Tlaxcala. Tlaxcala, Tlax., México. 41 p.
- Schrewe, H. 1983. Manual de acondicionamiento y mantenimiento de la sierra cinta. FAO. Lima, Perú. 92 p.
- Simpson, W. T. 1991. Dry Kiln Operator's Manual. United States Department of Agriculture Forest Service. Forest Products Laboratory. Agriculture handbook No. 188. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture Forest Service. 274 p.
<https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/usda/ah188/ah188.htm> (26 de julio de 2021).
- Sotomayor C., J. R. 2005. Características mecánicas y clasificación de la madera de 150 especies mexicanas. Investigación e Ingeniería de la Madera. Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de la Madera. Morelia, Michoacán. México. 24 p.
https://www.researchgate.net/publication/260752809_Caracteristicas_mecanicas_y_clasificacion_de_150_especies_de_maderas_Mexicanas (4 de agosto de 2021)
- Tamarit U., J. C. y J. L. López T. 2007. Xilotecología de los principales árboles tropicales de México. Libro Técnico No.3. INIFAP.CIRGOC. Puebla, Pue., México. 264 p.
- Tamarit U., J. C. y R. Flores V. 2012. El proceso de cepillado de maderas duras. INIFAP. CIRGOC. Puebla, México. Folleto técnico No. 75. 21 p.
- Teischinger, A. 2010. The development of wood technology and technology developments in the wood industries from history to future. European Journal of Wood and Wood Products 68(3): 281-287. Doi:<https://doi.org/10.1007/s00107-010-0458-2>.

Thibaut, B., L. Denaud, R. Collet, R. Marchal, J. Beauchêne, F. Mothe, P. Méausoone, P. Martin, P. Larricq and F. Eyma. 2016. Wood machining with a focus on French research in the last 50 years. *Annals of Forest Science* 73(1): 163-184. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0460-2>.

Vignote P., S. e I. Martínez R. 2006. *Tecnología de la madera*. 3ª. Ed. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa. Artes Gráficas Cuesta. Madrid, España. 678 p.

Zavala Z., D. 2000. Secado de maderas tropicales en estufas convencionales. *Madera y Bosques* 6(1): 41-54. Doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2000.611341>

Zavala Z., D. y M. Vázquez R. 2001. Determinación de las características de maquinado de la madera de 34 especies tropicales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 7(2): 169-183.

<https://revistas.chapingo.mx/forestales/revista/articulos/viewer.html?file=rchscfaVII361.pdf> (11 de enero de 2021).

Zavala Z., D. 2003. Efecto del sistema de aserrío tradicional en las características de la madera de encinos. *Madera y bosques* 9(2): 29-39

Doi:<https://doi.org/10.21829/myb.2003.921284>.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.