



Caracterización anatómica y propiedades físicas de la madera de monte bajo de dos especies de *Quercus* del volcán Popocatépetl

Anatomical characterization and physical properties of coppiced wood of two *Quercus* species from the Popocatepetl volcano

José Octavio Ortega-Gutiérrez¹, Arturo A. Alvarado-Segura², Roberto Machuca-Velazco¹ y Amparo Borja-de-la-Rosa^{1*}

¹ Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, Estado de México, México.

² Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior del Sur del Estado de Yucatán. Oxkutzcab, Yucatán, México.

* Autora de correspondencia. mborjad@chapingo.mx

RESUMEN

México cuenta con al menos 179 especies del género *Quercus*, algunas de las cuales son importantes para la silvicultura de monte bajo. La silvicultura de monte bajo, los tratamientos diferenciados y el uso de la madera basado en sus características tecnológicas pueden contribuir a optimizar el aprovechamiento de los bienes y servicios proporcionados por las especies del género *Quercus*. En este trabajo se evaluaron las características anatómicas y algunas propiedades físicas de la madera de brotes de *Quercus laurina* y *Quercus obtusata*, usualmente utilizadas para la obtención de carbón vegetal y leña en las comunidades aledañas al volcán Popocatépetl, en Puebla, México. Las características anatómicas observadas coinciden con descripciones precedentes de la madera de árboles monostales, salvo por la presencia de engrosamientos helicoidales en fibras y porosidad anular observadas en *Quercus obtusata*. Respecto a las propiedades físicas, se registraron valores inferiores a los obtenidos por otros autores. Es conveniente evaluar a profundidad las características tecnológicas de la madera resultante de otras especies del género *Quercus* que provengan de tratamientos silvícolas con el método de monte bajo.

PALABRAS CLAVE: anatomía, brotes, propiedades físicas, *Quercus laurina*, *Quercus obtusata*, tecnología de la madera.

ABSTRACT

Mexico has at least 179 species of the genus *Quercus*, which include some of the most important species for coppice forestry. Coppice forestry, the differentiated treatments and the use of wood based on its technological characteristics, could contribute to optimize the use of the goods and services provided by *Quercus* species. In this work we evaluated the anatomical characteristics and some physical properties of coppiced wood from *Quercus laurina* and *Quercus obtusata*, species used to obtain charcoal and firewood in the communities surrounding the Popocatepetl volcano in Puebla, Mexico. The anatomical characteristics reported in this study coincide with previous descriptions of the wood from monostem trees, except for the presence of helical thickenings in fibers and annular porosity observed in *Quercus obtusata*. Regarding physical properties, values lower than those previously reported by other authors were recorded. It is suggested to carry out silvicultural trials of coppicing method on *Quercus* species and to evaluate the technological characteristics of the resulting wood.

KEYWORDS: anatomy, sprouts, physical properties, *Quercus laurina*, *Quercus obtusata*, wood technology.

INTRODUCCIÓN

En las comunidades rurales de México (menos de 2500 habitantes), caracterizadas por los mayores indicadores de pobreza, los recursos forestales representan una fuente de bienes o de ingresos a través del comercio de sus productos (Boltvinik y Damián, 2016; Comisión Nacional Forestal, 2001). Las especies del género *Quercus* son de los recursos forestales más destacados, de ellas se puede aprovechar prácticamente cada estructura de la planta, siendo su madera la más valorada (Luna-José et al., 2003).

México cuenta con al menos 179 especies de encinos, de las cuales, 90 pertenecen a la sección *Quercus* (encinos blancos), 85 a la sección *Lobatae* (encinos rojos) y cuatro a la sección *Protobalanus* (encinos intermedios) (Valencia y Flores-Franco, 2006). Cada sección posee características que deben ser consideradas para designar los tratamientos y el destino final de la madera (De la Paz Pérez y Dávalos-Sotelo, 2008; De la Paz Pérez et al., 2000). En 2018, la madera de encino aportó 14.5% a la producción forestal maderable (1201 740 m³r); de ese porcentaje, 375 449 m³ se destinaron a escuadría, 140 871 m³ a celulosa, 5223 m³ a postes, pilotes y morillos, 235 083 m³ a leña, 271 647 m³ a carbón y 182 467 m³ a durmientes (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021).

El género *Quercus* incluye algunas de las especies más apropiadas para ser aprovechadas bajo el método silvícola de monte bajo (MSMB), debido a las propiedades de su madera, su productividad y la flexibilidad de su manejo (Serrada-Hierro, 2002; Gutiérrez Galindo et al., 2003; Dickmann, 2006; Matula et al., 2012; Ríos-Saucedo et al., 2016). El MSMB aprovecha la capacidad de regeneración vegetativa de algunas especies para establecer una masa compuesta completa o mayoritariamente de brotes (Hawley y Smith, 1972). Dicho método de aprovechamiento forestal fue la principal fuente de madera combustible en países europeos en el siglo XX (Daniel et al., 1982; Peterken, 1981); no obstante, fue abandonado a medida que sus productos fueron reemplazados por combustibles fósiles y sus derivados (Rackham, 1967). Dado que actualmente se pretende aminorar la dependencia de combustibles fósiles

para reducir la emisión de gases de efecto invernadero, la cantidad de publicaciones enfocadas en el MSMB y su potencial como fuente de biomasa para la generación de energía se ha incrementado (Faasch y Patenaude, 2012; Hauk et al., 2014).

La utilización del MSMB, los tratamientos diferenciados y el uso de la madera con base en sus características tecnológicas pueden contribuir a optimizar el aprovechamiento de los bienes y servicios que proporcionan las especies del género *Quercus*. Lo anterior, con la finalidad de incrementar el valor de sus productos y disminuir la intensidad de su explotación, en beneficio de los actores involucrados en las cadenas productivas de este recurso. No obstante que las características anatómicas y propiedades físicas de la madera de encinos de relevancia comercial se han documentado, se carece de estudios enfocados en la madera proveniente de brotes de monte bajo; esta última ha sido históricamente catalogada como de menor calidad y se ha relegado a la producción de energía (Daniel et al., 1982; Sánchez-Humanes y Espelta, 2011). Sin embargo, estudios comparativos entre la madera de brotes y árboles monofustales han demostrado que no siempre la madera de brotes es inferior en todas sus características (Luostarinne et al., 2009; Sharma et al., 2005; Zbonak et al., 2007; Girardclos et al., 2017; Brunetti et al., 2021).

OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo fue evaluar las características anatómicas y las propiedades físicas de la madera de brotes de *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. y *Quercus obtusata* Humb. & Bonpl, con el fin de orientar sus usos potenciales y aportar argumentos para valorar la pertinencia de implementar el MSMB en especies del género *Quercus* en bosques de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Las muestras fueron colectadas al pie de la cara nororiental del volcán Popocatépetl en territorio del ejido Santiago



Xalitzintla, municipio San Nicolás de los Ranchos, Puebla, México, en un intervalo altitudinal de 2760 m a 3035 m s.n.m. (Fig. 1). La vegetación del sitio varía desde bosque de pino hasta vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2013). Su clima es semifrío, subhúmedo con verano fresco largo. La temperatura media anual de la zona oscila entre 5 °C y 12 °C con una precipitación media anual de 800 mm a 1200 mm (García, 1998), sobre suelos de tipo regosol eútrico de textura media con fase física lítica y litosol de textura gruesa (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, 2001).

Obtención de las muestras

Se aprovechó el derribo de encinos asociado a la actividad carbonera de la zona para extraer muestras de la madera de ocho brotes, cuatro de *Q. laurina* (tetzmolle) y cuatro de *Q. obtusata* (encino de hoja ancha), cada uno procedente de un tocón diferente. La edad promedio de los brotes al momento de ser derribados fue de 21.5 años a partir del último aprovechamiento, con un diámetro promedio de 22

cm, a una altura de 1.3 m sobre el tocón. De cada brote se obtuvieron tres trozas de 20 cm de longitud, la primera basal (T_1), la segunda a 1.3 m de la base (T_2) y la tercera, aproximadamente a los 3.15 m entre la segunda troza y el ápice del brote (T_3). Cada troza fue seccionada en tres rodajas de 5 cm de grosor, la primera (R_1) fue destinada a la obtención de probetas para estudio de densidad y poder calorífico, la segunda (R_2) para estudio de densidad, descripción anatómica y contracción volumétrica; y la tercera (R_3) para la evaluación de contracciones lineales (Fig. 2).

En el sitio de colecta, de la rodaja R_1 de cada troza se trajeron dos probetas cúbicas de 2 cm por lado, una cercana a la médula y una cercana a la corteza. Las probetas resultantes fueron denominadas conjunto de probetas cúbicas número uno (CPC₁) (Fig. 2). Las rodajas R_2 y R_3 , así como los restos de R_1 de cada una de las trozas, fueron envueltas en película elástica de polietileno de baja densidad para evitar pérdida de humedad durante su traslado al aserradero.

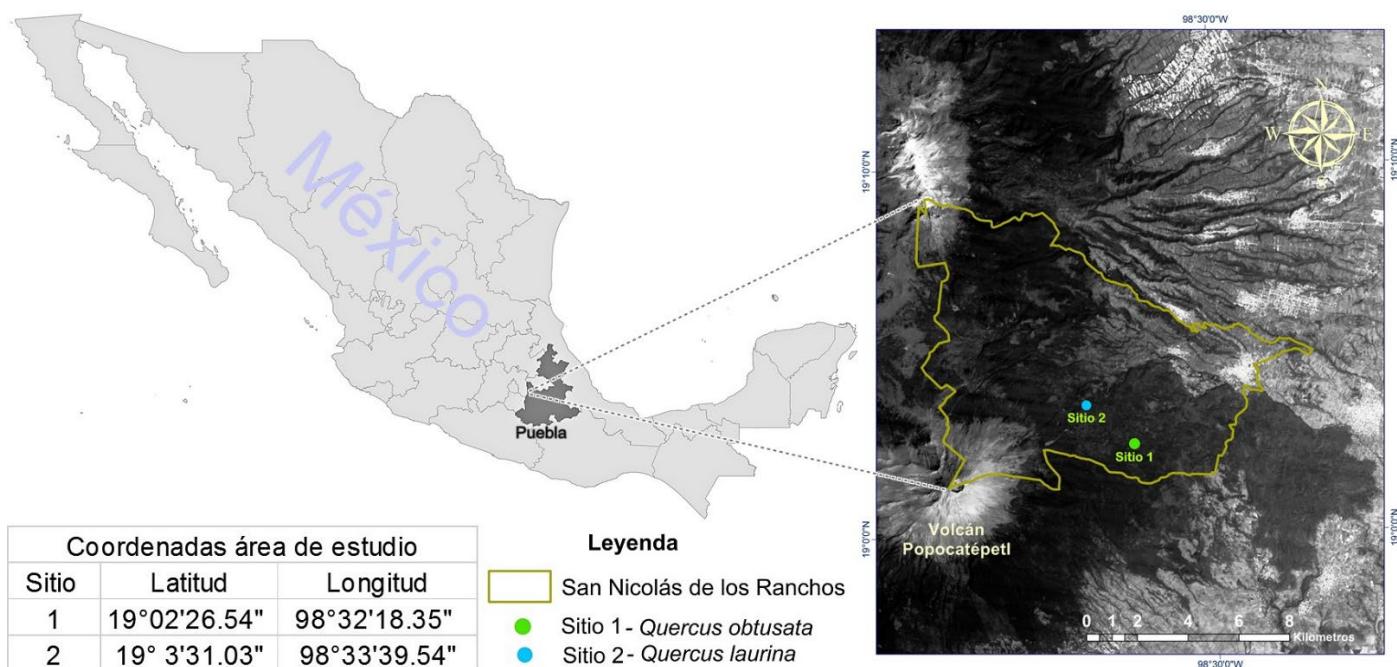


FIGURA 1. Sitios de colecta de la madera de rebrotos de *Quercus obtusata* y *Quercus laurina* en el estado de Puebla, México.

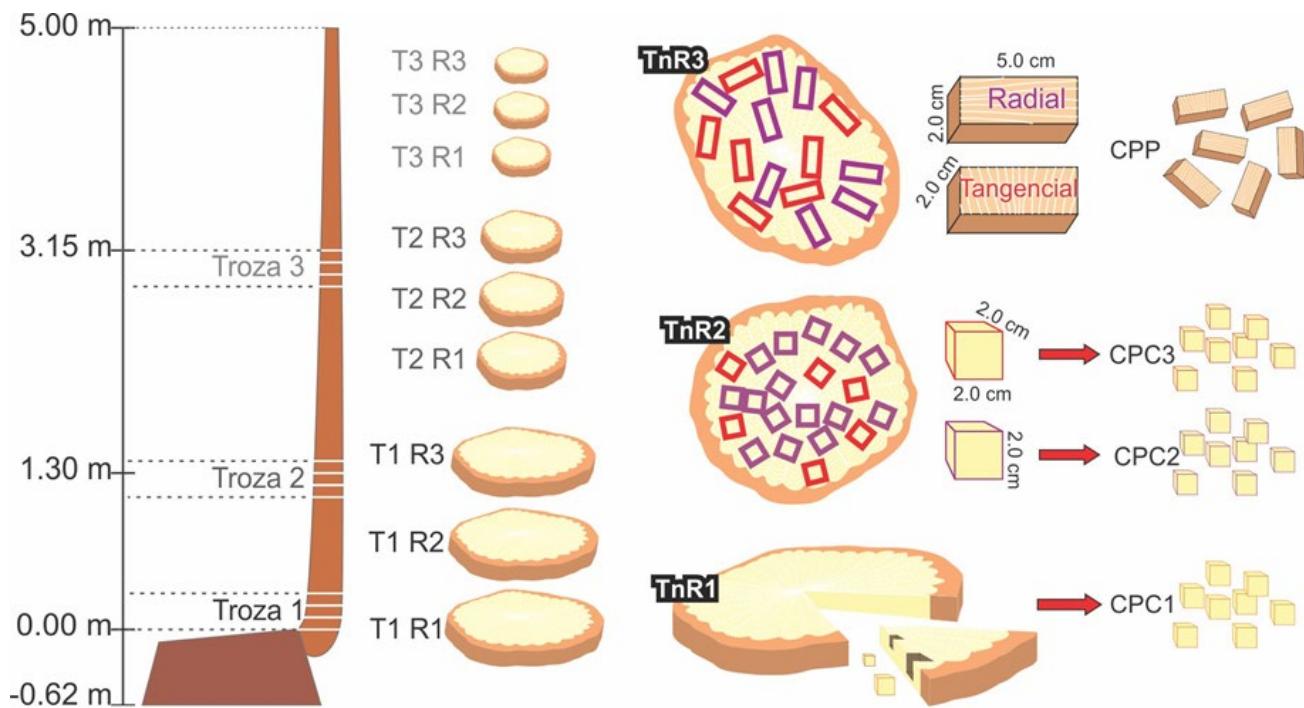


FIGURA 2. Representación esquemática de la obtención de muestras para la caracterización anatómica y determinación de características físicas de la madera de rebrotos de *Q. laurina* y *Q. obtusata* del volcán Popocatépetl.

En el aserradero, las rodajas R₂ fueron marcadas y cortadas para obtener el mayor número posible de probetas cúbicas de 2 cm por lado con los tres planos típicos. De las 779 probetas resultantes, fueron reservadas 712 para el estudio de densidad; este grupo fue denominado conjunto de probetas cúbicas número 2 (CPC₂) (Fig. 2). Las otras 67 probetas fueron seleccionadas por presentar los mejores cortes típicos y se designaron a la elaboración de preparaciones permanentes. Este conjunto se constituyó con una probeta próxima a la médula, una próxima a la corteza y cuando fue posible, una probeta intermedia de cada una de las rodajas R₂; este grupo fue denominado conjunto de probetas cúbicas número tres (CPC₃) (Fig. 2).

Las rodajas R₃ fueron marcadas en su plano transversal con el mayor número posible de rectángulos de 2 cm × 5 cm para obtener probetas prismáticas (2 cm × 2 cm × 5 cm) destinadas a ensayos de contracciones lineales. En total se obtuvieron 433 probetas que fueron denominadas conjunto de probetas prismáticas (CPP) (Fig. 2).

Descripción anatómica

Cada probeta del CPC₃ permaneció 48 horas en una estufa UN110 (Memmert) a 70 °C antes de ser cortada en el microtomo de deslizamiento SM2000R (Leica Microsystems). De cada probeta se obtuvieron tres láminas de 20 µm de grosor correspondientes a los planos transversal, tangencial y radial. De acuerdo con Navarro-Martínez et al. (2005), todas las láminas fueron sumergidas en colorante pardo de Bismarck (Merck) durante cuatro horas, lavadas con agua destilada, deshidratadas con alcohol etílico a 96% durante cinco minutos; posteriormente fueron deshidratadas con alcohol etílico absoluto durante cinco minutos y lubricadas durante 10 segundos con sustituto de xileno Neo-Clear (Merck) antes de ser fijada con el medio de montaje Entellan. Las características anatómicas de las preparaciones fijas fueron observadas a través del microscopio Leica DM3000 (Leica Microsystems) y se describieron conforme a las clasificaciones propuestas por Chattaway (1932), IAWA Committee (1937; 1939) y Wheeler et al. (1989).



Porcentaje de elementos constitutivos

Se empleó el módulo *Análisis* del paquete de cómputo Leica Application Suit 3.8 (Leica Microsystems) para medir el porcentaje de área ocupada por cada conjunto celular y el diámetro y número de elementos de vaso (EDV) por milímetro cuadrado de plano transversal en las preparaciones fijas. Usando una cámara Leica DFC295 (Leica Microsystems), en la lámina transversal de cada una de las preparaciones se tomaron tres campos de 7.09 mm^2 para medir el porcentaje de área ocupada por los EDV y tres campos diferentes de 0.11 mm^2 para medir el porcentaje de área ocupada por el parénquima axial. De igual forma, se tomaron tres campos de 0.44 mm^2 por cada lámina tangencial para medir el porcentaje de área ocupada por radios uniseriados y tres campos diferentes de 7.09 mm^2 para medir el porcentaje de área ocupada por radios multiseriados.

Disociados

Se eligió la probeta más cercana a la corteza de cada una de las rodajas R_2 para extraer astillas no mayores a $5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, de acuerdo con Navarro-Martínez et al. (2005). Las astillas de cada probeta se sumergieron en una solución a partes iguales de peróxido de hidrógeno 29%-32% (MEYER) y ácido acético glacial ACS (Fermont) en un frasco de vidrio. Los frascos permanecieron 36 horas en una estufa UN110 (Memmert) a temperatura constante de 60°C . El material disociado de cada frasco se lavó no menos de cinco veces con agua destilada y se tiñó con colorante pardo de Bismarck (Merck) durante cuatro horas. Posteriormente el exceso de colorante se lavó con agua. Con el disociado teñido se montaron preparaciones temporales y se observaron a través del microscopio Leica DM3000 (Leica Microsystems). Se usó el programa Leica Application Suit 3.8 (Leica Microsystems) para medir la longitud, diámetro del lumen y grosor de la pared de las fibras, así como la longitud de los vasos. El número de fibras y vasos a medir fue determinado con datos de una muestra previa ($n = 40$) de longitud de fibras, mediante la ecuación:

$$n = (t^2 * cv^2)/E^2$$

donde:

n = tamaño de muestra

t = valor crítico de t para $\alpha = 0.05$

cv = coeficiente de variación (desviación estándar/media)

E = error relativo a 5%

Densidad, contenido de humedad, contracción volumétrica y punto de saturación

De cada probeta del CPC₁ en campo, se obtuvo el peso verde (P_V) y el volumen verde (V_V) con una báscula electrónica portátil de 0.01 g de precisión modelo BABOL-100G (Rhino); en el laboratorio, las probetas se llevaron a una estufa UN110 (Memmert), a 103°C hasta alcanzar peso constante, para registrar peso anhidro (P_0) y volumen anhidro (V_0) utilizando una báscula electrónica de 0.01 g de precisión modelo TS4KD (OHAUS), de acuerdo con Navarro-Martínez et al. (2005). Del mismo modo, se obtuvieron los pesos y volúmenes para cada probeta del CPC₂ en condición saturada (P_V , V_V), en equilibrio con el ambiente (P_H , V_H) y anhidro (P_0 , V_0).

Se calcularon la densidad, el contenido de humedad, la contracción volumétrica y el punto de saturación de la fibra (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial [Secofi], 1981; Tamarit-Urias y Fuentes-Salinas, 2003) de las probetas de CPC₁ y CPC₂, mediante las siguientes ecuaciones:

$$D_b = \frac{P_0}{V_V}$$

$$CH = \left(\frac{P_i - P_0}{P_0} \right) 100$$

$$\beta V = \left(\frac{V_v - V_0}{V_v} \right) 100$$

$$PSF = \frac{\beta V_t}{(D_b * 0.9)}$$

$$D_v = \frac{P_v}{V_V}$$

$$D_h = \frac{P_h}{V_h}$$

$$D_o = \frac{P_0}{V_0}$$

donde:

D_b = densidad básica

D_v = densidad verde (g/cm^3)

D_b = densidad en equilibrio (g/cm^3)

D_o = densidad anhidra (g/cm^3)

P_0 = peso en condición anhidra (g)

V_v = volumen en condición saturada (cm^3)

V_o = volumen en condición anhidra (cm^3)

V_b = volumen en equilibrio (cm^3)

CH = contenido de humedad (%)

P_i = peso inicial (g)

P_v = peso en condición verde (g)

P_b = peso en equilibrio (g)

βV = contracción volumétrica (%)

PSF = punto de saturación de la fibra (%)

Contracciones lineales y relación de anisotropía

Se midió la longitud del eje mayor de cada probeta del CPP utilizando un calibrador digital pie de rey con resolución de 0.01 mm. La medición se realizó para las tres condiciones: saturada, en equilibrio a temperatura ambiente y anhidra. Las contracciones lineales y la relación de anisotropía se calcularon con las siguientes ecuaciones, de acuerdo con la norma mexicana NMX-EE-167-1983 (Secofi, 1983):

$$\beta T_t = \left(\frac{LT_v - LT_0}{LT_v} \right) 100$$

$$\beta R_t = \left(\frac{LR_v - LR_0}{LR_v} \right) 100$$

$$RA = \frac{\beta T_t}{\beta R_t}$$

donde:

βT_t = contracción tangencial total (%)

LT_v = longitud del eje mayor en probeta tangencial, condición saturada (mm)

LT_0 = longitud del eje mayor en probeta tangencial, condición anhidra (mm)

βR_t = contracción radial total (%)

LR_v = longitud del eje mayor en probeta radial, condición saturada (mm)

LR_0 = longitud del eje mayor en probeta radial, condición anhidra (mm)

RA = relación de anisotropía

Poder calorífico

Después de medir densidad y contenido de humedad del CPC₁, se extrajo un cubo de 1.2 g de cada probeta y se midió su poder calorífico superior en el calorímetro isoperibólico Parr 6200 (Parr Instrument Company, 2007). El poder calorífico inferior se estimó con la fórmula sugerida por el fabricante (Parr Instrument Company, 2007):

$$PC_I = PC_S - (91.23)(H)$$

donde:

PC_I = poder calorífico inferior (Btu/lb)

PC_S = Poder calorífico superior (Btu/lb)

H = porcentaje de la masa que representa el hidrógeno

Finalmente, los resultados fueron convertidos a unidades de energía y masa del Sistema Internacional (kJ/g).

RESULTADOS

Descripción anatómica

Las muestras de ambas especies presentaron características anatómicas similares, así que se presenta una descripción general y solo se señalan las diferencias específicas en los casos necesarios. En ambas especies, los límites de los anillos de crecimiento no están definidos formalmente; sin embargo, un patrón discreto, formado por bandas discontinuas de fibras aplastadas radialmente, cadenas tangenciales de células parenquimatosas axiales y el arreglo espacial y el tamaño de los vasos permitieron distinguir las zonas de crecimiento (Z), como se observa en las figuras 3A y 3C para *Q. laurina* y en las figuras 3B y 3D para *Q. obtusata*. En dichas figuras se resaltan regiones de madera temprana (MTE) y madera tardía (MTA), evidenciándose diferencias



en la amplitud de sus lúmenes (Fig. 3A y 3B); también se señalan células del parénquima axial paratraqueal (PP) (Fig. 3A y 3B) y del parénquima axial apotraqueal (PA) (Fig. 3C y 3D). La porosidad es semicircular (*Q. laurina* [Fig. 3C] y *Q. obtusata* [Fig. 3D]), no obstante, puede aparecer porosidad difusa debido a que: i) los límites de las zonas de crecimiento no son claras en algunos casos y ii) secciones

ahusadas de algunos elementos de vaso podrían coincidir transversalmente con secciones gruesas de otros vasos. Los vasos son ligeramente ovalados y solitarios, presentan mayoritariamente arreglos diagonales, seguidos de radiales y en menor medida ramificados, principalmente cerca de la madera temprana (Fig. 3C y 3D).

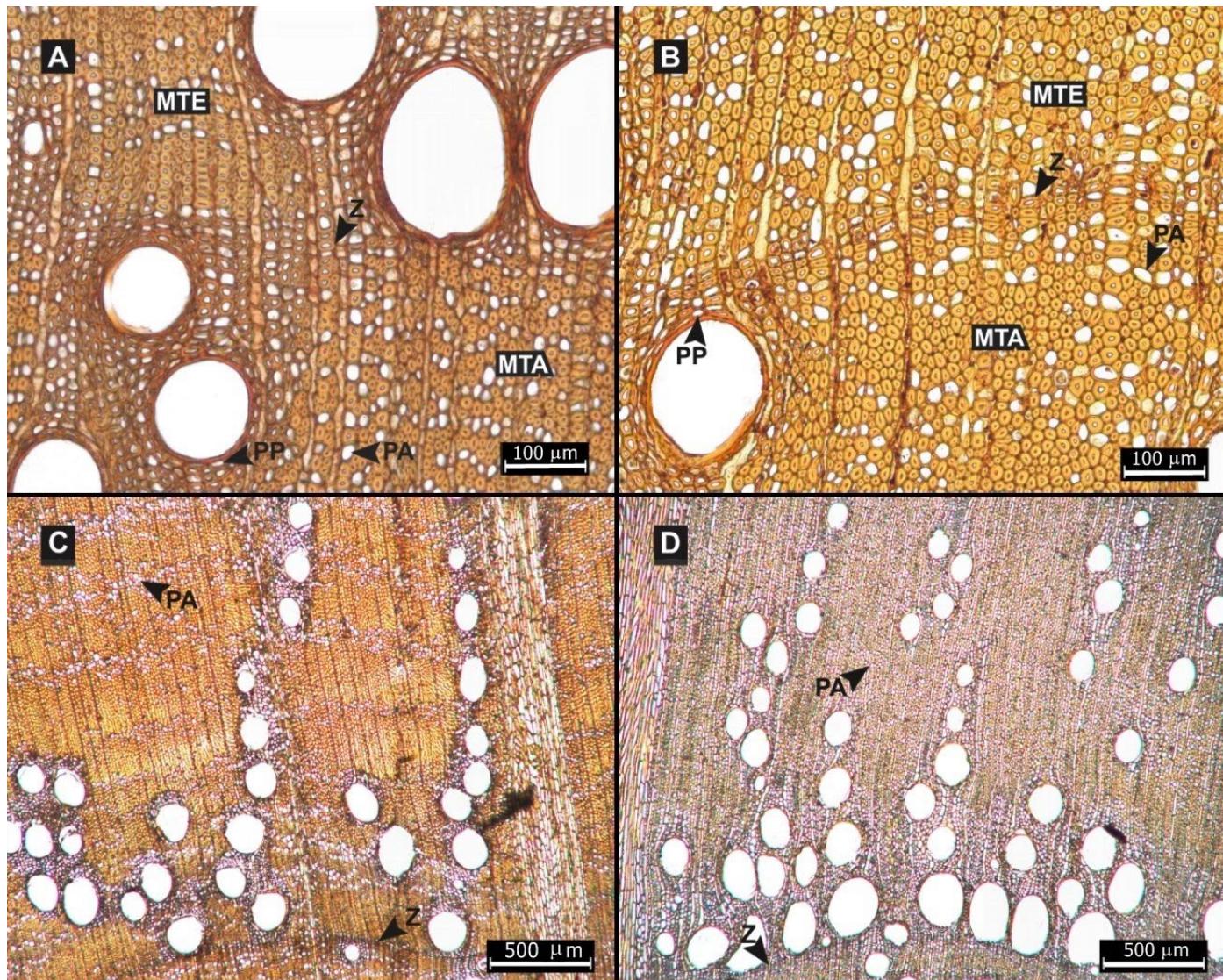


FIGURA 3. Zonas de crecimiento y porosidad de la madera de rebrotos de *Q. laurina* (A y C) y *Q. obtusata* (B y D).

MTE = madera temprana, MTA = madera tardía, PA = parénquima axial apotraqueal, PP = parénquima axial paratraqueal, Z = zonas de crecimiento.

Los EDV de ambas especies presentaron placa simple, puntuaciones intervasculares areoladas alternas y puntuaciones vasoradiadas verticales con borde simple (Fig. 4A y 4B). No se observaron engrosamientos helicoidales. La longitud y el diámetro de los EDV puedes ser consultados en la tabla 1. Los EDV poseen formas y tamaños múltiples que corresponden a su posición en la madera tardía (vasos esbeltos), madera temprana (vasos tipo barril y tambor) e intermedia (Fig. 4C y 4D). En el corte transversal se observaron en promedio 4.8 mm^{-2} y 5.1 mm^{-2} vasos para *Q. obtusata* y *Q. laurina*, respectivamente (Tabla 1). En promedio, el diámetro equivalente del lumen de los EDV fue de $124.9 \mu\text{m}$ para *Q. obtusata* y $108.8 \mu\text{m}$ para *Q. laurina*. La longitud promedio del elemento de vaso (descontando los ápices) fue de $358.82 \mu\text{m}$, mientras que la longitud promedio incluyendo los ápices fue de $511.12 \mu\text{m}$. No se observaron depósitos de gomas, aceites u otras inclusiones

en los lúmenes de los EDV, pero se observó presencia de tilides (Fig. 5A y 5B).

En su mayoría, los vasos están rodeados parcial o totalmente por traqueidas vasicéntricas intercaladas con algunas células del parénquima axial (Fig. 3; Fig. 5C). Las puntuaciones de las traqueidas son areoladas (Fig. 5E). No se observaron traqueidas vasculares. Las fibras de ambas especies poseen puntuaciones simples con canal infundibuliforme y carecen de septas (Fig. 6A y 6B). Se observaron engrosamientos helicoidales en todas las fibras de las muestras provenientes de dos de los cuatro brotes de *Q. obtusata* (50 de 100) mientras que solamente tres de cien fibras de *Q. laurina* presentaron engrosamientos muy sutiles (Fig. 6C). En ambas especies, algunas fibras poseen segmentos corrugados en uno de sus planos (Fig. 6D). Ambas especies presentaron conjuntos de fibras gelatinosas (madera de tensión) dispuestas en parches dispersos, sin un patrón o forma definidas (Fig. 6E).

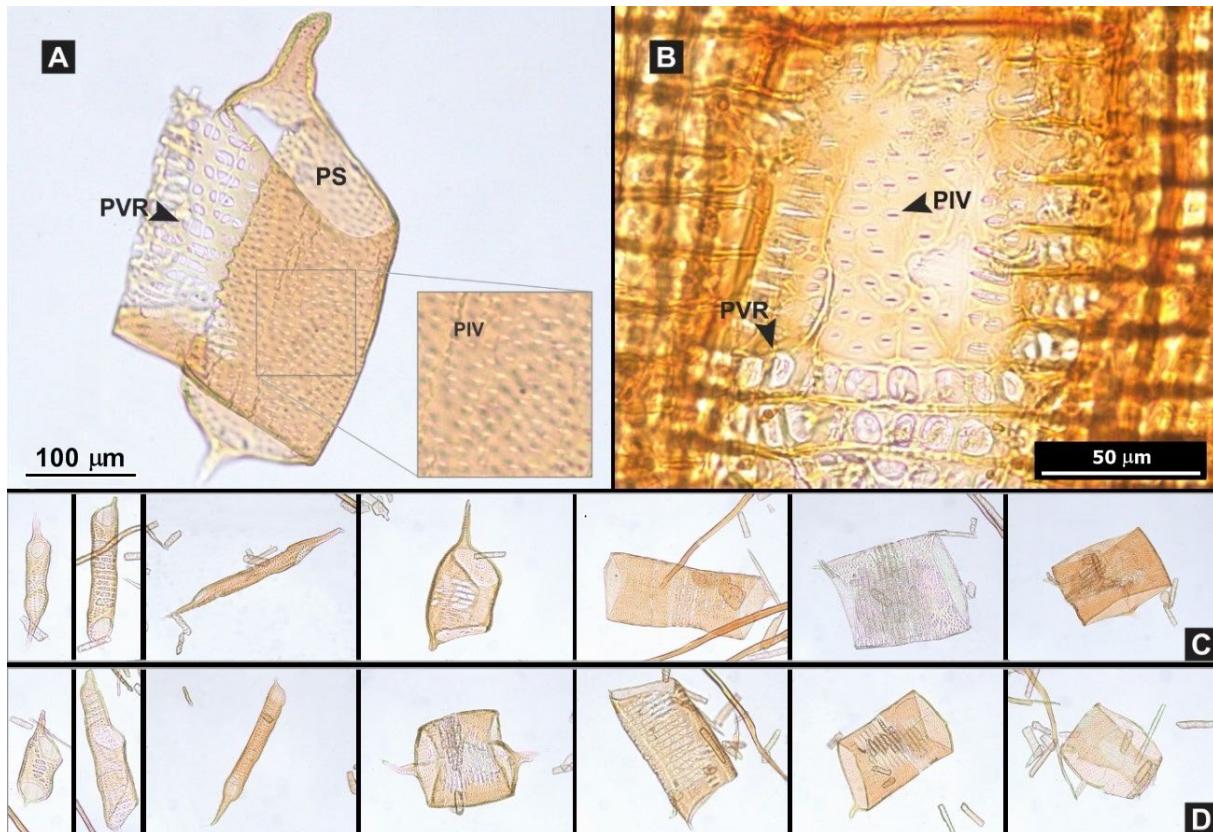
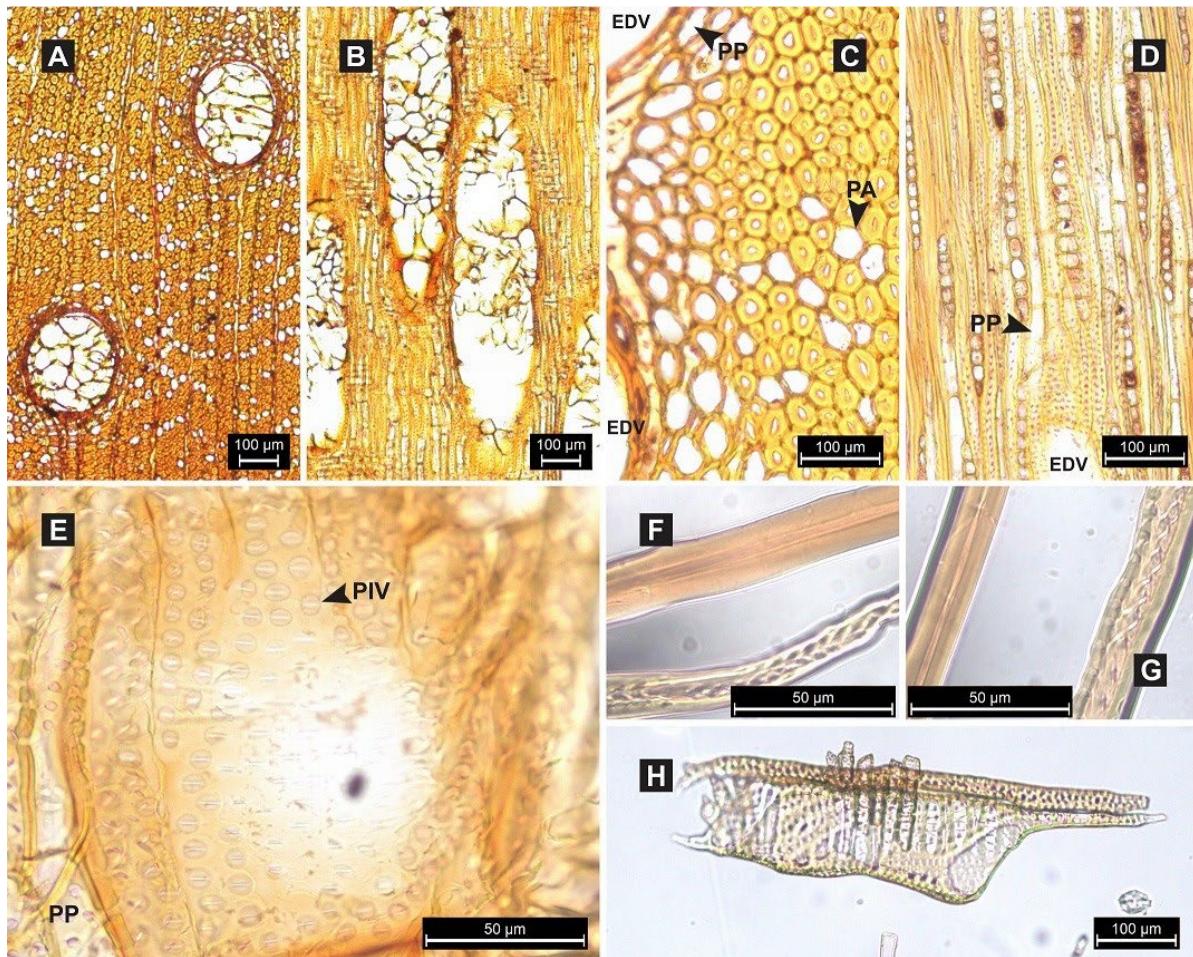


FIGURA 4. Placa simple (PS), puntuaciones vaso-radiales (PVR) y puntuaciones intervasculares areoladas (PIV) alternas de *Q. obtusata* (A) y *Q. laurina* (B). Ejemplos de formas de elementos de vaso de *Q. obtusata* (C) y *Q. laurina* (D).

TABLA 1. Dimensiones y conteo de los elementos de vaso de la madera de rebrotos de *Quercus laurina* y *Quercus obtusata* del volcán Popocatépetl.

Especie (n)	Estadístico	Longitud del cilindro (μm)	Longitud con ápices (μm)	Longitud clase	Diámetro (μm)	Número de poros por mm ²
<i>Q. laurina</i> (n=100)	Máximo	660.09	759.358	media	325.71	17.20
	Promedio	346.84	479.55	corta	108.80	5.14
	Mínimo	158.13	220.83	corta	43.73	1.97
	S	96.74	105.83		48.30	2.16
	CV	0.27	0.22		0.44	0.42
<i>Q. obtusata</i> (n=100)	Máximo	592.95	786.20	media	316.73	13.80
	Promedio	358.82	511.12	media	124.90	4.87
	Mínimo	203.182	272.74	corta	43.77	1.69
	S	82.84	101.70		51.50	2.06
	CV	0.23	0.19		0.41	0.42

n = tamaño de muestra, S = desviación estándar, CV = coeficiente de variación. Clasificación de la longitud propuesta en Ilvessalo-Pfäßli (1995). El número de poros por milímetro cuadrado fue medido en el plano transversal.

FIGURA 5. Tíldes en elementos de vaso (EDV) de *Q. obtusata* (A) y *Q. laurina* (B). Parénquima paratraqueal (PP) (C, D, E). Parénquima apotraqueal (PP) en (C). Puntuaciones areoladas (PIV) de *Q. laurina* (E). Fibras de *Q. laurina* (F, G) y EDV de *Q. obtusata* (H).

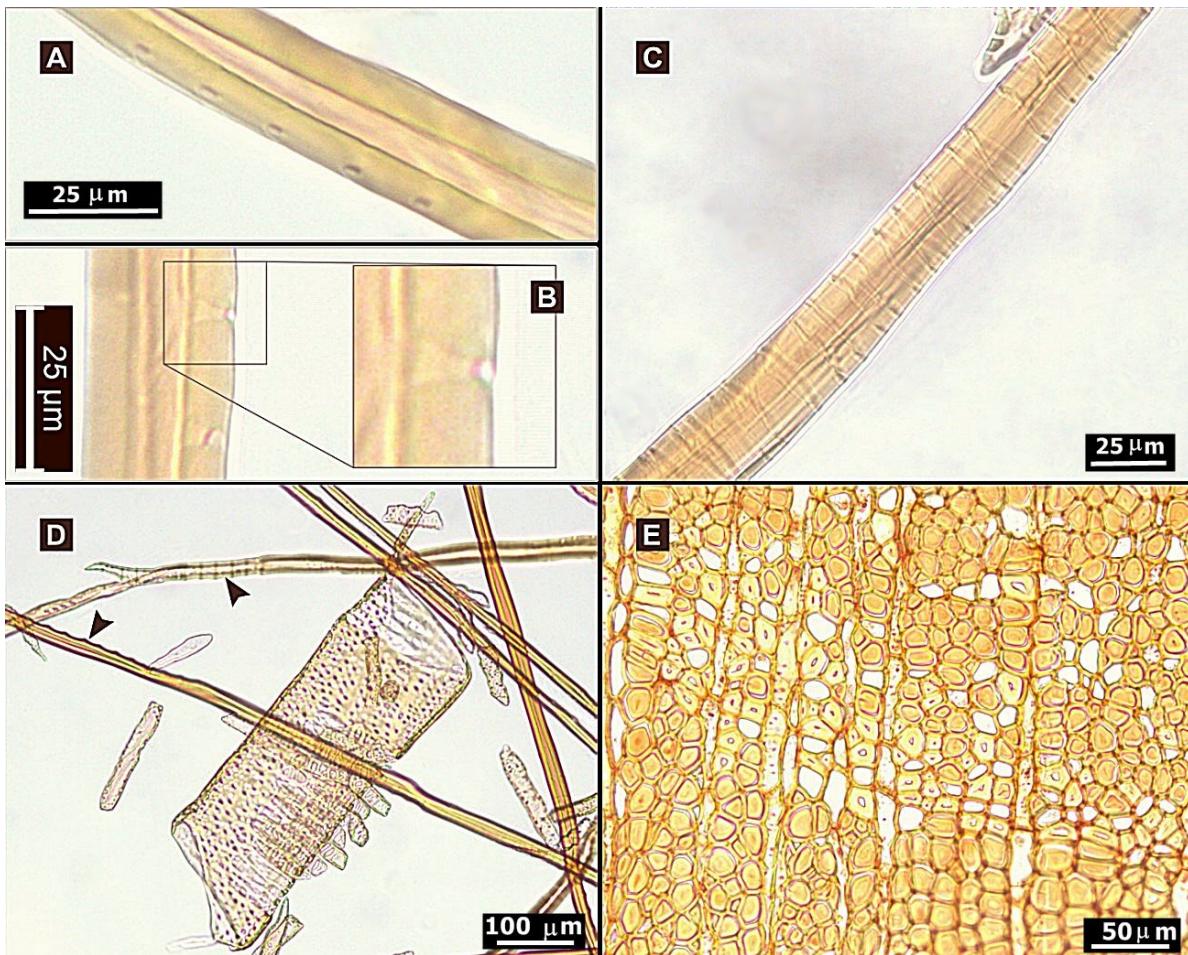


FIGURA 6. Puntuaciones simples en fibras de *Q. obtusata* (A). Canal infundibuliforme de puntuación simple en fibra de *Q. laurina* (B). Engrosamientos helicoidales en fibra de *Q. obtusata* (C). Engrosamiento de fibras de *Q. laurina* (D). Fibras gelatinosas de *Q. obtusata* (E).

Ambas especies poseen parénquima axial apotraqueal en arreglo difuso-agregado y parénquima paratraqueal escaso. El parénquima apotraqueal puede generar patrones similares a bandas concéntricas, mientras que las células del parénquima apotraqueal se encuentran intercaladas con traqueidas vasicéntricas, formando mosaicos que conectan traqueidas y parénquima, asociadas a otros elementos de vasos cercanos, acentuando la configuración espacial diagonal, radial y ramificada de los mismos (Fig. 7A). El parénquima radial está dispuesto en radios multiseriados, uniseriados y agregados, aunque se pueden hallar algunos radios biseriados y triseriados escasos (Fig. 7B; 7C). La composición de los radios es heterogénea, con la mayoría de sus células procumbentes y filas marginales e intermedias de células cuadradas y ocasionalmente erectas (Fig. 7E). El

número de radios por milímetro lineal es de nueve para uniseriados y hasta uno para multiseriados. Las células parenquimatosas de los radios pueden encontrarse saturadas de inclusiones de color ámbar de intensidades variables (Fig. 7C y 7D). También es posible observar esporádicamente cristales prismáticos y cuerpos silíceos tanto en células radiales como en parénquima axial (Fig. 7F-I).

Proporción y dimensión de elementos celulares constitutivos

El grupo celular que ocupó mayor área en el campo transversal en ambas especies son las fibras, seguidas del parénquima y elementos vasculares. Las proporciones de cada elemento constitutivo se presentan en la tabla 2.

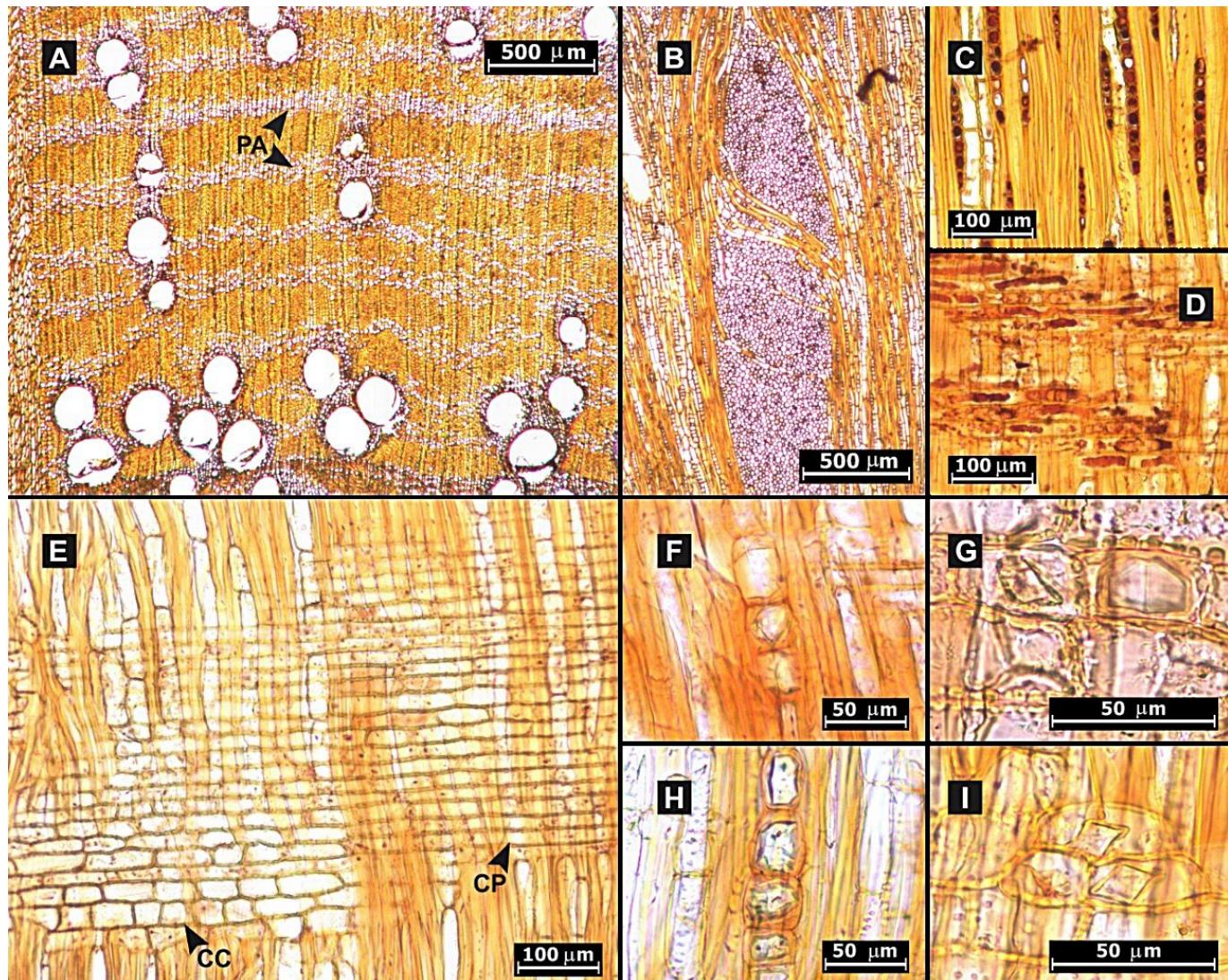


FIGURA 7. Parénquima axial apotraqueal (PA) de *Q. obtusata* (A). Radios agregados de *Q. laurina* (B). Radios uniseriados con inclusiones de *Q. obtusata* (C) y de *Q. laurina* (D). Células procumbentes (CP) y células cuadradas (CC) en rayo de *Q. laurina* (E). Cristales prismáticos en parénquima axial (F) y parénquima radial (G) de *Q. obtusata* y de *Q. laurina* (H e I).

TABLA 2. Proporción de elementos constitutivos de la madera de rebrotos de *Quercus laurina* y *Quercus obtusata* del volcán Popocatépetl.

Especie	Fibras	Radios multiseriados	Radios uniseriados	Parénquima axial	Vasos	Traqueidas vasicéntricas
<i>Q. laurina</i>	53.80	11.04	11.20	13.68	5.72	4.54
<i>Q. obtusata</i>	54.12	14.72	9.06	11.73	6.98	3.36

El tamaño de muestra para fibras y EDV fue de 25 unidades por cada brote, por lo que se midieron 100 vasos y 100 fibras de cada especie. Los estadísticos de sus dimensiones

están registrados en la tabla 1 y en la tabla 3, respectivamente. La relación de amplitud del lumen respecto al doble de la pared es de 0.2, en promedio, para *Q. obtusata* y

de 0.3 para *Q. laurina*, por lo que de acuerdo con Wheeler et al. (1989) la pared de ambas especies es de un espesor muy grueso con promedios de 9.37 μm y 8.96 μm , respectivamente. De acuerdo con la clasificación propuesta en Chataway (1932) y en IAWA Committee (1937, 1939) la longitud de fibra de ambas especies es mediana.

De acuerdo con la clasificación Il vessalo-Pfäffli (1995), Chataway (1932) e IAWA Committee (1937, 1939) la

longitud de los EDV de ambas especies varía de corta a media con diámetros medianos. La abundancia de poros por milímetro cuadrado es moderada para *Quercus laurina* y escasa para *Q. obtusata*.

Ambas especies presentan numerosos radios uniseriados por milímetro, mientras que la gran amplitud de los radios multiseriados permiten como máximo solo un radio por milímetro (Tabla 4).

TABLA 3. Dimensiones de las fibras de la madera de rebrotos de *Quercus laurina* y *Quercus obtusata* del volcán Popocatépetl.

<i>Especie (n)</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Longitud (μm)</i>	<i>Diámetro (μm)</i>	<i>Lumen (μm)</i>	<i>Pared (μm)</i>	<i>Lumen / (Pared*2)</i>
<i>Q. laurina</i> (n=100)	Máximo	1820.99	34.19	12.26	13.95	
	Promedio	1352.78	23.83	5.91	8.96	0.33
	Mínimo	946.32	13.62	1.03	6.25	
	<i>S</i>	184.64	4.21	2.69	1.49	
	<i>CV</i>	0.13	0.17	0.45	0.16	
<i>Q. obtusata</i> (n=100)	Máximo	1942.55	34.35	9.45	14.81	
	Promedio	1380.45	22.57	3.83	9.37	0.20
	Mínimo	975.06	16.06	1.04	6.94	
	<i>S</i>	224.85	4.10	2.34	1.60	
	<i>CV</i>	0.16	0.18	0.61	0.17	

n = tamaño de muestra, S = desviación estándar, CV = coeficiente de variación

TABLA 4. Amplitud y conteo de los radios de la madera de rebrotos de *Quercus laurina* y *Quercus obtusata* del volcán Popocatépetl.

<i>Especie</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Ancho (μm)</i>		<i>Conteo</i>	
		<i>Multiseriados</i>	<i>Uniseriados</i>	<i>Multiseriados /mm</i>	<i>Uniseriados /mm</i>
<i>Q. laurina</i>	<i>n</i>	75	720	102	102
	Máximo	918.29	25.78	2.00	21.00
	Promedio	447.79	14.26	0.81	13.34
	Mínimo	272.86	8.72	0	8.00
	<i>S</i>	143.62	3.23	0.50	2.32
<i>Q. obtusata</i>	<i>CV</i>	0.32	0.23	0.62	0.17
	<i>n</i>	85	656	102	102
	Máximo	1037.76	24.62	2.00	20.00
	Promedio	526.65	13.50	0.71	11.73
	Mínimo	268.21	8.72	0	6.00
	<i>S</i>	210.02	2.76	0.48	2.71
	<i>CV</i>	0.40	0.20	0.68	0.23

n = tamaño de muestra, S = desviación estándar, CV = coeficiente de variación.



Las 48 probetas del CPC₁ cuyo peso y volumen fueron registrados en campo (Tabla 5) revelaron promedios de contenido de humedad y densidad menores que las 712 probetas saturadas y medidas en laboratorio (Tabla 6). En ambos casos la madera de *Q. obtusata* presentó mayor densidad. El poder calorífico superior de las astillas de ambas especies se promedió a partir de los datos obtenidos en el calorímetro, mientras que el poder calorífico inferior se calculó asumiendo un contenido de hidrógeno de 6.15% de la masa total, porcentaje promedio que representa el hidrógeno en la masa total de la madera de cultivos de rotación corta de acuerdo con el Anexo C de la norma CEN/TS 14961:2005 (Slovenski Inštitut za Standardizacijo, 2005; Francescato et al., 2008; Krajnc, 2015).

Se emplearon los valores promedio de la tabla 6 para estimar el PSF conforme a la propuesta de Fuentes-Salinas (2000), obteniendo 38.63% para *Q. laurina* y 33.39% para *Q. obtusata*.

Los promedios de hinchamiento, contracción y la relación de anisotropía presentados en la tabla 7 sugieren que ambas especies de encino son altamente deformables. Se incluye el contenido de humedad de las probetas medidas.

DISCUSIÓN

Las características anatómicas registradas en este trabajo coinciden con descripciones previas, sin embargo, existen algunas discrepancias que podrían estar relacionadas con el hecho de que las probetas del presente trabajo provienen de brotes de tocón o bien, atribuibles a factores ambientales (Schweingruber, 2007). En las tablas 8 y 9 pueden apreciarse algunas características anatómicas y morfométricas, así como propiedades físicas descritas por otros autores en comparación con los resultados aquí obtenidos.

TABLA 5. Propiedades del CPC1 de la madera de rebrotos de *Quercus laurina* y *Quercus obtusata* del volcán Popocatépetl

Especie (n)	Estadístico	Contenido de humedad verde (%)	Densidad verde (g/cm ³)	Densidad básica (pa/vw)	Poder calorífico (kJ/g) (CH = 11.94%)	
					Superior	Inferior
<i>Q. laurina</i> (24)	Máximo	102.82	1.10	0.64	18.57	18.55
	Promedio	77.72	0.98	0.55	17.80	17.79
	Mínimo	64.14	0.79	0.42	17.44	17.43
	S	8.24	0.06	0.04	0.30	-
	CV	0.10	0.06	0.08	0.01	-
<i>Q. obtusata</i> (24)	Máximo	76.24	1.24	0.77	18.24	18.23
	Promedio	67.63	1.07	0.64	17.77	17.75
	Mínimo	58.22	0.85	0.52	17.29	17.27
	S	4.89	0.08	0.05	0.23	-
	CV	0.07	0.07	0.08	0.01	-

n = tamaño de muestra, S = desviación estándar, CV = coeficiente de variación, CPC1 = conjunto de probetas cúbicas número uno tomadas de la rodaja RI para evaluar las características anatómicas de la madera. El poder calorífico corresponde a muestras con 11.94% de contenido de humedad promedio.

TABLA 6. Propiedades del CPC2 de la madera de rebrotos de *Quercus laurina* y *Quercus obtusata* del volcán Popocatépetl

Especie (n)	Estadístico	Contenido de Humedad (%)		Densidad (g/cm ³)		Densidad básica (pa/vv)	Contracción volumétrica (%)	
		Verde	Equilibrio	Verde	Equilibrio		Parcial	Total
<i>Q. laurina</i> (41)	Máximo	120.00	23.92	1.38	0.95	0.94	0.73	32.05
	Promedio	93.46	11.82	1.20	0.84	0.79	0.62	16.74
	Mínimo	72.59	10.58	1.16	0.71	0.67	0.54	1.26
	S	8.56	0.70	0.02	0.04	0.04	0.03	3.59
	CV	0.09	0.06	0.02	0.04	0.05	0.05	0.16
<i>Q. obtusata</i> (30)	Máximo	102.34	13.24	1.29	1.16	1.10	0.80	34.40
	Promedio	78.57	12.04	1.23	0.92	0.87	0.69	15.54
	Mínimo	47.83	10.92	0.90	0.75	0.71	0.49	9.19
	S	6.80	0.42	0.03	0.07	0.07	0.04	3.99
	CV	0.09	0.04	0.02	0.08	0.08	0.05	0.18

n = tamaño de muestra, S = desviación estándar, CV = coeficiente de variación, CPC2 = conjunto de probetas cúbicas número dos para evaluar la densidad de la madera, pa = peso anhidro, vv = volumen verde.

TABLA 7. Contracciones, hinchamientos y relación de anisotropía del CPP de la madera de rebrotos de *Quercus laurina* y *Quercus obtusata* del volcán Popocatépetl.

Especie (n)	Estadístico	Contenido de humedad (%)		Hinchamiento (%)				Contracción (%)				Relación de Aniso- tropía	
		Verde	Equilibrio	Tangencial		Radial		Tangencial		Radial			
				Parcial	Total	Parcial	Total	Parcial	Total	Parcial	Total		
<i>Q. laurina</i> (299)	Máximo	118.12	13.22	6.39	31.59	3.73	6.11	19.18	24.00	4.39	5.76		
	Promedio	92.26	12.42	4.59	19.10	1.89	4.11	12.14	15.99	2.14	3.94 <th data-kind="ghost"></th>		
	Mínimo	75.86	11.92	0.90	11.29	0.73	2.51	7.82	10.15	-0.33	2.45		
	S	6.36	0.23	0.84	2.98	0.37	0.85	1.99	2.06	0.64	0.78		
	CV	0.07	0.02	0.18	0.16	0.19	0.21	0.16	0.13	0.30	0.20 <th data-kind="ghost"></th>		
<i>Q. obtusata</i> (131)	Máximo	95.10	13.67	5.72	26.72	3.38	9.40	16.68	21.09	5.87	8.59		
	Promedio	80.46	12.92	4.82	15.97	2.40	5.39	9.57	13.73	2.83	5.11 <th data-kind="ghost"></th>		
	Mínimo	62.54	12.21	3.43	10.90	0.39	3.33	5.64	9.83	1.46	3.23		
	S	6.58	0.33	0.41	2.62	0.48	1.17	1.87	1.92	0.86	1.05		
	CV	0.08	0.03	0.09	0.16	0.20	0.22	0.20	0.14	0.30	0.21 <th data-kind="ghost"></th>		

n = tamaño de muestra, S = desviación estándar, CV = coeficiente de variación. CPP = conjunto de probetas prismáticas.

TABLA 8. Anatomía, morfometría y propiedades físicas comparadas de la madera de rebrotos de *Quercus laurina* del volcán Popocatépetl.

	Variable	0	1	2	3	4	5	6	7
	Porosidad	SA	A	A	D -> SA	SA	A, SA, D		D -> SA
Vasos	Longitud (μm)	479.55	446.7 426.4	442-623	579	475			552
	Diámetro (μm)	108.8	258.2 101.9 239.1 98.70		190	160			215
	Poros/ mm^2	5.14	4.8 5.2		5	5			5
<i>Q. laurina</i>	Longitud	1352.78	1800 1600	1186-1548	1801	1337			940
	Diámetro	23.83	26 23.1		19.2				
	Lumen	5.91	9.2 8.8	8	8	8			6
	Pared	8.96	8.4 7.1	5-8	5.5	9			11
RM (μm)	Ancho	447.79	341.5 368.4	280-457	328	390	345-457		
	Ancho (μm)	14.26	14 16						
	Cuenta	9.5			6	9			
	D_b (%)	0.62	0.69	0.65				0.60	
PF	βV (%)	21.56	19.65	18.48				17.46	
	RA	4.05		2.63				2.55	

O: Resultados del presente trabajo

1: Ruiz-Aquino et al. (2016)

2: De la Paz Pérez y Dávalos-Sotelo (2008)

3: Aguilar-Rodríguez y Castro-Plata (2006)

4: De la Paz Pérez et al. (2006)

5: De la Paz Pérez y Quintanar Isaías (2001)

6: Honorato Salazar y Fuentes López (2001)

7: Valencia y Barajas-Morales (1995)

SA: semianular, A: Anular, D: Difusa

RM: radios multiseriados

RU: radios uniseriados

PF: propiedades físicas

 D_b : densidad básica βV : contracción volumétrica

RA: relación de anisotropía

Además de las diferencias incluidas en las tablas anteriores, otros autores mencionan radios homogéneos de células procumbentes únicamente (Aguilar-Rodríguez y Castro-Plata, 2006; Chávez-Romero et al., 2010; De la Paz Pérez et al., 2006; Valencia-Ávalos y Barajas-Morales, 1995), mientras que en el presente trabajo también se observaron células cuadradas y erectas escasas.

No hay registro precedente sobre engrosamientos helicoidales en fibras. Carlquist (2001) señala que suelen ser escasos en fibras libriformes y que podrían estar relacionados con la presencia de madera de reacción, condición que se manifiesta en ambas especies descritas en este trabajo. Por otro lado, la presencia de fibras gelatinosas en *Q. obtusata* también es mencionada por Rivera Nava et

al. (1999). Respecto a la densidad básica registrada en el presente trabajo, resultó ser menor que la observada en trabajos precedentes. Esta situación es similar a la señalada por Aguilar et al. (2012), quienes obtuvieron densidad básica para la madera de rebrotos de *Quercus laeta* Liebm. (0.58), inferior a la encontrada en la literatura para madera obtenida de fustes originales (0.68 a 0.75). Por otro lado, Aguilar Romero (2010) obtuvo 0.64 de densidad básica para

madera de rebrotos de *Quercus castanea* Née. Una menor densidad básica y mayores contracciones volumétricas y relación de anisotropía que las mencionadas para árboles monofustales por De la Paz Pérez y Dávalos-Sotelo (2008) y Honorato-Salazar y Fuentes-López (2001) podrían significar que la madera de rebrotos de *Q. laurina* y *Q. obtusata* posea características tecnológicas relativamente inferiores.

TABLA 9. Anatomía, morfometría y propiedades físicas comparadas de la madera de rebrotos de *Quercus obtusata* del volcán Popocatépetl.

	Variable	0	1	2	3	4	5
	Porosidad	SA	D	D	D		D
Vasos	Longitud (μm)	511.12	592.5	400-562	494		
	Diámetro (μm)	124.9	195		153		
	Poros/ mm^2	4.87			4		
<i>Q. obtusata</i>	Longitud	1380.45	1477	1479-1536	1515		
Fibras (μm)	Diámetro	22.57	21.8				
	Lumen	3.83	6.7	4-5	4		
	Pared	9.37	6.2	8-9	8		
RM	Ancho	526.65		846-971	840		
RU	Ancho (μm)	13.50					
	Cuenta	8.66			12		
	D_b (%)	0.69		0.75		0.72	
PF	βV (%)	20.74		20.13		16.21	
	RA	2.68		2.31		2.66	

O: Resultados del presente trabajo

1: Chávez-Romero et al. (2010)

2: De la Paz Pérez y Dávalos-Sotelo (2008)

3: De la Paz Pérez et al. (2006)

4: Honorato Salazar y Fuentes López (2001)

5: Bucio y Quintero (1994)

SA: semianular, D: difusa

RM: radios multiseriados

RU: radios uniseriados

PF: propiedades físicas

D_b : densidad básica

βV : contracción volumétrica

RA: relación de anisotropía

El poder calorífico promedio inferior registrado para rebrotos *Q. laurina* (17.79 kJ/g) y *Q. obtusata* (17.75 kJ/g) en este trabajo resultó menor al registrado en especies aprovechadas bajo método silvícola de rotación corta para

la obtención de madera combustible (Krajnc, 2015). Por otra parte, los valores registrados en el presente trabajo resultaron similares a los de poder calorífico inferior de especies maderables o aprovechadas como combustible,



como *Q. robur* (15.361 kJ/g) (Telmo y Lousada, 2011), *Q. serrata* (17.49 kJ/g) (Meetei et al., 2015) y *Q. palustris* (19.35 kJ/g) (Eberhard, 1987). En México se han observado valores de poder calorífico similares a los resultados del presente estudio; tal es el caso de *Q. resinosa* (16.5 kJ/g) y *Q. magnoliifolia* (16.03 kJ/g) en Jalisco, México (Rodríguez-Rivas, 2009) o *Q. laurina* (17.875 kJ/g), *Q. candicans* (17.625 kJ/g) y *Q. rugosa* (17.54 kJ/g) en Michoacán, México (Herrera-Fernández et al., 2017). Se puede señalar que, tanto los comprimidos de harina de especies de encino reportadas por Herrera-Fernández et al. (2017) como las especies descritas en este trabajo, presentan valores cercanos a los indicados para briquetas y comprimidos de madera empleados como biocombustible en países donde su uso está estandarizado (Brkic y Janic, 2009). La magnitud del poder calorífico de la madera puede ayudar a determinar los tratamientos que mejoren las propiedades combustibles de una especie, como tratamientos silvícolas, configuración de la plantación, contenido de humedad, densidad de la madera y los sistemas de combustión (Eberhard, 1987). En especies adecuadas para su manejo como monte bajo, la magnitud del poder calorífico y la producción de biomasa podrían verse favorecidas por la aplicación de tratamientos silvícolas (Fang et al., 2011; Liu et al., 2011).

Existen estudios sobre tecnología de la madera de especies de encino provenientes de bosques manejados como monte bajo entre los cuales se pueden mencionar uno de *Quercus petraea*, en el que se halló que no existen diferencias entre las características anatómicas en rodales provenientes de monte bajo con las de otras procedencias (Brunetti et al., 2021).

Los encinos, por sus características tecnológicas, se pueden utilizar para producción de carbón, corcho, taninos, colorantes, celulosa, combustibles, chapa, madera contrachapada, vigas, polines, morillos, durmientes, gualdras, piezas talladas, molduras, cabos y mangos para herramienta, marcos de puertas y ventanas, muebles, pisos en forma de duela, parquet y adoquín, techos, lambrines, zoclos y artesanías (De la Paz Pérez et al., 2000; Luna-José et al., 2003; Gorgonio-Ramírez et al., 2017). Estos usos son similares a los que se pueden obtener de la madera proveniente de

monte bajo como son leña, carbón, astillas, celulosa para papel, tablero y panel, postes, muebles de exterior y madera maciza para interior y muebles de alto valor, parquet, duela, adoquín, decks, madera contrachapada y artesanías (Unrau et al., 2018).

CONCLUSIONES

Las características anatómicas observadas en la madera proveniente de rebrotos (monte bajo) de *Quercus laurina* y *Q. obtusata* coinciden en general con las descripciones precedentes de la madera de árboles de monte alto, aunque sus propiedades tecnológicas son ligeramente inferiores. Sin embargo, la madera de rebrotos de las dos especies estudiadas se puede utilizar como biocombustibles o en la fabricación de pisos, molduras, tableros y muebles.

Para entender los determinantes de las características anatómicas y las propiedades físicas de la madera se debe evaluar la relación entre estas propiedades y factores como origen del árbol (monte alto, monte bajo), características del sitio, densidad poblacional, edad del árbol, edad del tocón y edad del brote. También es conveniente evaluar las características anatómicas y tecnológicas de la madera de otras especies del género *Quercus* que provengan de tratamientos silvícolas con el método de monte bajo.

REFERENCIAS

- Aguilar-Rodríguez, S., & Castro-Plata, B. J. (2006). Anatomía de la madera de doce especies del bosque mesófilo de montaña del Estado de México. *Madera y Bosques*, 12(1), 95–115. <http://doi.org/10.21829/myb.2006.1211252>
- Aguilar Romero, R. (2010). Propiedades físicas de la madera, alometría y crecimiento de tres especies (género *Quercus*) bajo manejo de la cuenca del lago Cuitzeo, Michoacán, México. [Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo].
- Aguilar, R., Ghilardi, A., Vega, E., Skutsch, M., & Oyama, K. (2012). Sprouting productivity and allometric relationships of two oak species managed for traditional charcoal making in central Mexico. *Biomass and Bioenergy*, 36, 192–207. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.10.029>
- Boltvinik, J., & Damián, A. (2016). Pobreza creciente y estructuras sociales cada vez más desiguales en México. Una visión integrada

- y crítica. *Acta Sociológica*, 70, 271–296. <http://doi.org/10.1016/j.acso.2017.01.012>
- Brkic, M., & Janic, T. (2009). Standards for pelleted and briquetted biofuels. *Savremena Poljoprivredna Tehnika*, 35(4), 260–267.
- Brunetti, M., Macchioni, N., Grifoni, F., Lazzari, S., Sozzi, L. & Cutini, A. (2021). Anatomical, physical and mechanical characterization of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) wood from central Italy aged coppices. *Annals of Silvicultural Research*, 46(1), 1–7. <http://dx.doi.org/10.12899/asr-1672>
- Bucio, S. Y. H., & Quintero, S. R. (1994). Características anatómicas de la madera de cuatro especies de encinos del municipio de Uruapan, Michoacán. *Ciencia Nicolaita*, 6, 105–120.
- Carlquist, S. (2001). Comparative wood anatomy: Systematic, ecological, and evolutionary aspects of dicotyledon wood. Springer Series in Wood Science (2a ed.). Springer-Verlag. <http://doi.org/10.1007/978-3-662-04578-7>
- Chattaway, M. (1932). Proposed standards for numerical values used in describing woods. *Tropical Woods*, 29, 20–28. https://www.iawa-website.org/uploads/soft/download/tropical_woods/Tropical%20Woods%201932_29-32.pdf
- Chávez-Romero, D. M., Aguilar-Rodríguez, S., & Terrazas, T. (2010). Variación anatómica en la madera de *Quercus obtusata* (Fagaceae). *Madera y Bosques*, 16(1), 69–87. <https://doi.org/10.21829/myb.2010.1621173>
- Comisión Nacional Forestal (2001). Programa Estratégico Forestal para México 2025. Comisión Nacional Forestal.
- Daniel, T. W., Helms, J. A., & Baker, F. S. (1982). Principios de silvicultura. McGraw-Hill.
- De la Paz Pérez O., C., & Dávalos-Sotelo, R. (2008). Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encinos) de México. *Madera y Bosques*, 14(3), 43–80. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1431206>
- De la Paz Pérez O., C., Dávalos Sotelo, R., & Guerrero Cuacuil, E. (2000). Aprovechamiento de la madera de encino en México. *Madera y Bosques*, 6(1), 3–13. <https://doi.org/10.21829/myb.2000.611338>
- De la Paz Pérez O., C., & Quintanar Isaías, A. (2001). Características anatómicas de la madera de *Quercus castanea* Née, *Q. crassifolia* Humb. Et Bonpl. y *Q. laurina* Humb. Et Bonpl. *Ciencia Forestal*, 24(85), 95–107. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/937>
- De la Paz Pérez O., C., Vélez Jiménez, S., & Ceja Romero, J. (2006). Anatomía de la madera de ocho especies de *Quercus* (Fagaceae) de Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 12(1), 63–94. <https://doi.org/10.21829/myb.2006.1211251>
- Dickmann, D. I. (2006). Silviculture and biology of short-rotation woody crops in temperate regions: then and now. *Biomass and Bioenergy*, 30(8–9), 696–705. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.02.008>
- Eberhard, A. A. (1987). *Calorific values and combustion characteristics of South African grown fuel woods*. University of Cape Town South Africa. Energy Research Institute. <http://hdl.handle.net/11427/23901>
- Faasch, R. J., & Patenaude, G. (2012). The economics of short rotation coppice in Germany. *Biomass and Bioenergy*, 45, 27–40. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.04.012>
- Fang, S., Liu, Z., Cao, Y., Liu, D., Yu, M., & Tang, L. (2011). Sprout development, biomass accumulation and fuelwood characteristics from coppiced plantations of *Quercus acutissima*. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 3104–3114. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.04.017>
- Francescato, V., Antonini, E., & Bergomi, L. Z. (2008). *Wood fuels handbook*. AIEL – Italian Agriforestry Energy Association Agripolis.
- Fuentes-Salinas, M. (2000). Estimación del punto de saturación de la fibra (PSF) de las maderas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 6(1), 79–81. <https://revistas.chapingo.mx/forestales/?section=articles&subsec=issues&numero=21&articulo=325>
- García, E. (1998). *Climas (clasificación de Koppen, modificado por García)*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Girardclos, O., Dufraisse, A., Dupouey, J.-L., Coubray, S., Ruelle, J., & Rathgeber, C. B. K. (2017) Improving identification of coppiced and seeded trees in past woodland management by comparing growth and wood anatomy of living sessile oaks (*Quercus petraea*). *Quaternary International*, 463, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.04.015>
- Gorgonio-Ramírez, M., Clark Tapia, R., Campos, J. E., A. Monsalvo Reyes, A, C. Alfonso Corrado, C. (2017). Diversidad y estructura genética de *Quercus crassifolia* en sitios de manejo forestal y uso local en Sierra Juárez, Oaxaca. *Madera y Bosques*, 23(2), 85–98. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2321122>
- Gutiérrez Galindo, E., Bravo, J. A., Sánchez, I., Serrada, R., & Allué Camacho, M. (2003). Evaluación del regenerado posterior a diferentes tratamientos de resalteo en un monte bajo de *Quercus faginea* Lamk. (Torreadrada, Segovia). *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 15, 141–146.



- Hauk, S., Knoke, T., & Wittkopf, S. (2014). Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 435–448. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.103>
- Hawley, R. C., & Smith, D. M. (1972). *Silvicultura Práctica*. Ediciones Omega.
- Herrera-Fernández, A. C., Carrillo-Parra, A., Pedraza-Bucio, F. E., Correa-Méndez, F., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2017). Densidad, composición, química y poder calorífico de la madera de tres especies de encino (*Quercus candicans*, *Q. laurina* y *Q. rugosa*). *Ciencia Nicolaita*, 72, 136–154. <https://doi.org/10.35830/cn.v0i72.345>
- Honorato-Salazar, J. A., & Fuentes-López, M. E. (2001). Propiedades físico- mecánicas de la madera de cinco especies de encinos del estado de Guanajuato. *Revista Ciencia Forestal en México*, 26(90), 5–28. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/911>.
- IAWA Committee (1937). Committee on the standardization of terms of cell size. Standard terms of length of vessel members and wood fiber. *Tropical Woods*, (51), 21–22. https://www.iawa-website.org/uploads/soft/download/tropical_woods/Tropical%20Woods%201937_49-52.pdf
- IAWA Committee (1939). Committee on the nomenclature. Standard terms of size for vessel diameter and ray width. *Tropical Woods*, (59), 51–52. https://www.iawa-website.org/uploads/soft/download/tropical_woods/Tropical%20Woods%201939_57-60.pdf
- Ilvessalo-Pfäffli, M. S. (1995). *Fiber Atlas, identification of papermaking fibers*. Springer-Verlag. <http://doi.org/10.1007/978-3-662-07212-7>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Escala 1: 250 000, Serie V (Capa Unión) (2^a ed.). Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (2001). *Edafología*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Krajnc, N. (2015). Wood fuels handbook. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) concerning. <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph240/timcheck1/docs/fao-krajnc-2015.pdf>
- Liu, Z., Fang, S., Liu, D., Yu, M., & Tang, L. (2011). Influence of thinning time and density on sprout development, biomass production and energy stocks of sawtooth oak stumps. *Forest Ecology and Management*, 262(2), 299–306. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.03.035>
- Luna-José, A. L., Montalvo-Espinosa, L., & Rendón-Aguilar, B. (2003). Los usos no leñosos de los encinos en México. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*, 72, 107–117. <https://doi.org/10.17129/botscl.1671>
- Luostarinen, K., Huotari, N., & Tillman-Sutela, E. (2009). Effect of regeneration method on growth, wood density and fibre properties of Downy birch (*Betula pubescens* Ehrh.). *Silva Fennica*, 43(3), 329–338. <https://doi.org/10.14214/sf.191>
- Matula, R., Svátek, M., Kůrová, J., Úradníček, L., Kadavý, J., & Kneifl, M. (2012). The sprouting ability of the main tree species in Central European coppices: Implications for coppice restoration. *European Journal of Forest Research*, 131(5), 1501–1511. <http://doi.org/10.1007/s10342-012-0618-5>
- Meetei, S. B., Singh, E. J., & Das, A. K. (2015). Fuel wood properties of some oak tree species of Manipur, India. *Journal of Environmental Biology*, 36(4), 1007–1010. http://www.jeb.co.in/journal_issues/201507_jul15/paper_20.pdf
- Navarro-Martínez, J., Borja de la Rosa, A., & Machuca-Velasco, R. (2005). Características tecnológicas de la madera de palo morado (*Peltogyne mexicana* Martínez) de Tierra Colorada, Guerrero, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 11(1), 73–82.
- Parr Instrument Company (2007). *Introduction to bomb calorimetry*. Parr Instrument Company. https://www.parrinst.com/wp-content/uploads/downloads/2013/07/483M_Parr_Intro-to-Bomb-Calorimetry.pdf
- Peterken, G. F. (1981). *Woodland conservation and management*. Springer-Science+Business Media. <http://doi.org/10.1007/978-1-4612-8573-3>
- Rackham, O. (1967). The history and effects of coppicing as a woodland practice. En E. Duffey (Ed.), *The biotic effects of public pressures on the environment* (pp. 82–93). The Nature Conservancy, Natural Environment Research Council. <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/7088/1/03.pdf>
- Ríos-Saucedo, J. C., Acuña-Carmona, E., Cancino-Cancino, J., Rubilar-Pons, R., Navar-Chaidez, J. de J., & Rosales-Serna, R. (2016). Allometric equations commonly used for estimating shoot biomass in short-rotation wood energy species: a review. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(2), 193–202. <http://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.05.022>
- Rivera Nava, L., Quintanar Isaías, A., & De la Paz Pérez O., C. (1999). Comparación histoquímica de albura y duramen de

- tres especies de *Quercus*. *Madera y Bosques*, 5(1), 27–41. <https://doi.org/10.21829/myb.1999.511352>
- Rodríguez-Rivas, A. (2009). Estudios de valoración energética de combustibles forestales para la prevención de incendios forestales en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México) mediante calorimetría de combustión y ensayos de inflamabilidad [Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela]. <http://hdl.handle.net/10347/2619>
- Ruiz-Aquino, F., González-Peña, M. M., Valdez-Hernández, J. I., & Romero-Manzanares, A. (2016). Estructura anatómica de la madera de dos encinos de Oaxaca. *Madera y Bosques*, 22(1), 177–189. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.221485>
- Sánchez-Humanes, B., & Espelta, J. M. (2011). Increased drought reduces acorn production in *Quercus ilex* coppices: thinning mitigates this effect but only in the short term. *Forestry*, 84 (1), 73–82. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpq045>
- Schweingruber, F. H. (2007). *Wood Structure and Environment*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-48548-3>
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial [Secofi] (1981). NMX-EE-117-1981. *Envase y embalaje-Determinación de peso específico aparente en maderas*. Dirección General de Normas.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial [Secofi] (1983). NMX-EE-167-1983. *Envase y embalaje madera-Contracción-Lineal método de prueba*. Dirección General de Normas.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2021). *Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2018*. Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos. Ciudad de México. <https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2021/2018.pdf>
- Serrada-Hierro, R. (2002). Selvicultura aplicada en España. *Eria*, 58, 220–229.
- Sharma, S. K., Rao, R. V., Shukla, S. R., Kumar, P., Sudheendra, R., Sujatha, M., & Dubey, Y. M. (2005). Wood quality of coppiced *Eucalyptus tereticornis* for value addition. *LAWA Journal*, 26(1), 137–147. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001608>
- Slovenski inštitut za standardizacijo (2005). CEN/TS 14961:2005 *Solid biofuels - Fuel specifications and classes*.
- Tamarit-Urias, J. C., & Fuentes-Salinas, M. (2003). Parámetros de humedad de 63 maderas latifoliadas mexicanas en función de su densidad básica. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(2), 155–164. <https://revistas.chapingo.mx/forestales/?section=articles&subsec=issues&numero=28&articulo=400>
- Telmo, C., & Lousada, J. (2011). Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2634–2639. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.043>
- Valencia-Ávalos, A. S., & Barajas-Morales, J. (1995). Comparación de la anatomía de la madera de *Quercus affinis* y *Quercus laurina* (Fagaceae). *Anales del Instituto de Biología Universidad Autónoma de México, Serie Botánica* 66(2), 113–131. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/28726>
- Valencia, A. S., & Flores-Franco, G. (2006). *Catálogo de autoridades taxonómicas de las fagáceas (Fagaceae: Magnoliopsida) de México*. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Base de datos Sistema Nacional de Informática de la Biodiversidad - Comisión Nacional para el uso y conocimiento de la Biodiversidad, proyecto CS008. México D.F., México.
- Wheeler, E. A., Baas, P., & Gasson, P. E. (Eds.) (1989). *Iawa list of microscopic features for hardwood identification*. IAWA Bulletin n.s, 10(3), 219–332. <https://www.iawa-website.org/uploads/soft/Abstracts/IAWA%20list%20of%20microscopic%20features%20for%20hardwood%20identification.pdf>
- Unrau, A., Becker, G., Spinelli, R., Lazdina, D., Magagnotti, N., Nicolescu, V. N., Buckley, P., Bartlett D., & Kofman, P. D. (Eds.). (2018). *Coppice forests in Europe*. University Freiburg.
- Zbonak, A., Bush, T., & Grzeskowiak, V. (2007). Comparison of tree growth, wood density and anatomical properties between coppiced trees and parent crop of six *Eucalyptus* genotypes. En *Proceedings of the IUFRO Conference “Eucalypts and Diversity: Balancing Productivity and Sustainability”* (pp 1-10). Durban (South Africa) 22-26 oct 2007. https://www.researchgate.net/publication/237360026_Comparison_of_tree_growth_wood_density_and_anatomical_properties_between_coppiced_trees_and_parent_crop_of_six_Eucalyptus_genotypes
- Manuscrito recibido el 20 de marzo de 2022**
- Aceptado el 27 de febrero de 2023**
- Publicado el 19 de agosto de 2022**
- Este documento se debe citar como:**
- Ortega-Gutiérrez, J. O., Alvarado-Segura, A. A., Machuca-Velazco, R., & Borja-de-la-Rosa, A. (2023). Caracterización anatómica y propiedades físicas de la madera de monte bajo de dos especies de *Quercus* del volcán Popocatépetl. *Madera y Bosques*, 29(1), e2911580. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2911580>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C.
se distribuye bajo una Licencia Creative
Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual
4.0 Internacional.