

MODELOS DE REGRESIÓN SEGMENTADA PARA LAS CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE TRAQUEIDAS EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD BÁSICA DE *Pinus montezumae*

SEGMENTED REGRESSION MODELS FOR TRACHEID MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS AS A FUNCTION OF BASIC DENSITY IN *Pinus montezumae*



Xuxan Alyn Rosas-Ramos^{1,*}

<https://orcid.org/0000-0002-1015-5415>

Ma. Amparo Máxima Borja- de la Rosa¹

<https://orcid.org/0000-0002-6127-0501>

Roberto Machuca-Velasco¹

<https://orcid.org/0000-0001-9840-7439>

Alejandro Corona-Ambriz¹

<https://orcid.org/0000-0003-0005-7480>

Liliana Cuapio-Hernández¹

<https://orcid.org/0000-0003-0952-8525>

RESUMEN

El conocimiento de la variación anatómica y física de la madera es esencial para comprender su calidad y comportamiento tecnológico. En *Pinus montezumae*, especie de importancia ecológica y económica en México, la falta de información sobre la relación entre las características morfométricas de las traqueidas y la densidad básica limita la evaluación objetiva de su calidad. La predicción de variables anatómicas a partir de la densidad básica representa una alternativa eficiente que reduce tiempo y recursos. El objetivo del estudio fue evaluar la variación radial de las dimensiones de las traqueidas y la densidad básica de la madera de *P. montezumae* y generar modelos de predicción para las variables morfométricas. Se analizaron 42 árboles mediante muestras de barreno obtenidas a 1,30 m de altura. Se observaron patrones radiales con tendencia creciente de médula a corteza para la densidad básica, longitud total, diámetro total y espesor de pared celular de las traqueidas, mientras que el diámetro de lumen presentó un comportamiento irregular. Se obtuvieron correlaciones positivas entre la densidad básica y las variables morfométricas ($R^2= 0,90- 0,95$), siendo la densidad básica un buen predictor de la longitud, diámetro total y espesor de la pared celular de las traqueidas.

Palabras clave: Anatomía de la madera, biometría de traqueidas, diámetro de traqueidas, espesor de pared celular, longitud de traqueidas, *Pinus montezumae*.

¹Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Laboratorio de Anatomía y Tecnología de la Madera. Texcoco, México.

*Autor de correspondencia: mborjad@chapingo.mx

Recibido: 21.06.2024 Aceptado: 10.10.2025

ABSTRACT

Understanding the anatomical and physical variation of wood is essential to comprehend its quality and technological behavior. In *Pinus montezumae*, a species of ecological and economic importance in Mexico, the lack of information regarding the relationship between tracheid morphometric characteristics and basic density limits an objective assessment of wood quality. Predicting anatomical variables from basic density represents an efficient alternative that reduces both time and resources. The aim of this study was to evaluate the radial variation of tracheid dimensions and basic wood density in *P. montezumae*, and to develop predictive models for morphometric variables. Forty-two trees were analyzed using increment core samples collected at 1,30 m height. Radial patterns showed increasing trends from pith to bark for basic density, total length, total diameter, and cell wall thickness of tracheids, whereas lumen diameter exhibited an irregular pattern. Positive correlations were found between basic density and morphometric variables ($R^2 = 0,90-0,95$), indicating that basic density is a good predictor of tracheid length, total diameter, and cell wall thickness.

Keywords: Wood anatomy, tracheid biometry, tracheid diameter, cell wall thickness, tracheid length, *Pinus montezumae*.

INTRODUCCIÓN

México posee una gran diversidad de coníferas, de las seis familias reconocidas a nivel mundial, cuatro están presentes en el territorio nacional, distribuidas en distintos tipos de vegetación. Además, dentro de este grupo, el género *Pinus* destaca como uno de los más diversos (Gernandt y Pérez-de la Rosa 2014).

En la región centro del país, especies como el oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.), el ocote blanco (*Pinus hartwegii* Lindl.), el ocote chino (*Pinus leiophylla* Schltdl. & Cham.), el pino ocote (*Pinus montezumae* Lamb), el pino rudis (*Pinus rudis* Endl.) y el teocote (*Pinus teocote* Cham. & Schltdl.) son el componente principal de los bosques templados (CONABIO-SEDEMA 2021). Entre ellas, *P. montezumae* es una de las más representativas, tanto por su amplia distribución en el Eje Neovolcánico Transversal como por su participación en la producción forestal nacional, donde domina en cerca del 70 % de la superficie bajo manejo (Tamarit-Urías *et al.* 2021) y contribuye con el 5,45% al volumen total anual de madera de pino (Flores y Moctezuma-López 2021). Su madera es aprovechada en la fabricación de triplay, construcción, ebanistería y obtención de resina (Lira González 2020), además de presentar alta supervivencia en programas de reforestación (Flores *et al.* 2019).

La calidad de su madera depende de las características anatómicas y propiedades físicas, entre las que destacan la morfometría de las traqueidas y la densidad básica. Las traqueidas constituyen cerca del 90 % del volumen xilemático de las coníferas y determinan la conducción de agua, el soporte mecánico y las propiedades tecnológicas de la madera (García *et al.* 2003). Sus dimensiones, longitud, diámetro total, diámetro de lumen y espesor de pared celular varían radial y axialmente en función de la edad cambial, el crecimiento y las condiciones ambientales (Marja-Sisko 1995, Bouslimi *et al.* 2019). Por su parte, la densidad básica es un indicador clave de resistencia mecánica y eficiencia industrial (Kollmann 1959), además de ser una propiedad de fácil y rápida determinación (Núñez 2007).

Diversos estudios han demostrado relaciones estrechas entre la densidad básica y las dimensiones celulares, lo que permite estimar variables anatómicas mediante ecuaciones predictivas. En *Pinus sylvestris* L., se han desarrollado modelos para predecir la longitud y el diámetro de las traqueidas (Mäkinen y Hynynen 2012), mientras que Jankowski *et al.* (2021) evaluaron la variación axial del diámetro en poblaciones contrastantes de Europa. En América Latina, Winck *et al.* (2019, 2022) estudiaron el efecto de la poda y la variación radial de las traqueidas en *Pinus taeda* L. y un híbrido de rápido crecimiento. En México, se han documentado las características morfométricas en especies como: Arizona pine (*Pinus arizonica* Engelm.), pino de cooper (*Pinus cooperi* C.E. Blanco), pino durango (*Pinus durangensis* Martínez), pino herrera (*Pinus herrerae* Martínez), pino prieto (*Pinus leiophylla*) y pino teocote (*Pinus teocote*) (De la Paz-Pérez y Dávalos-Sotelo 2016). También se ha medido la longitud de traqueidas en pino blanco (*Pinus douglasiana* Martínez), pino de montaña (*Pinus devoniana* Lindl.), y pino ocote (*Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl.) (Escoto García *et al.* 2017). Así como el efecto del ángulo microfibrilar en pino apulcense (*Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* (Lindl.) Shaw) (Saucedo-Ibarra *et al.* 2022).

Sin embargo, para *Pinus montezumae* no existen estudios que describan cuantitativamente la variación radial de sus traqueidas ni su relación con la densidad básica. Esta ausencia de información limita la posibilidad de valorar industrialmente su madera en función de su calidad anatómica, de mejorar los planes de manejo de forestal y de optimizar la predicción de propiedades tecnológicas sin recurrir a mediciones destructivas o costosas.

Dada la importancia económica de *P. montezumae* y la escasez de estudios anatómicos detallados, se hace necesario desarrollar modelos predictivos que relacionen parámetros morfométricos con propiedades físicas fácilmente medibles, como la densidad básica. Los modelos de regresión segmentada representan una herramienta estadística adecuada para describir estas relaciones (Montgomery *et al.* 2021), permitiendo identificar puntos de cambio en la estructura de la madera a lo largo del radio.

En este contexto, el objetivo de este estudio es: 1) evaluar la variación radial de la densidad básica y las características morfométricas de traqueidas (longitud, diámetro total, diámetro del lumen, espesor de pared celular); y 2) analizar la relación entre estas variables dimensionales en función de densidad básica con el fin de desarrollar modelos predictivos para estimar parámetros anatómicos en ocote (*Pinus montezumae* Lamb.) de un bosque templado en Milpa Alta, Ciudad de México, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

La zona de estudio esta situada en el paraje “Temetatlitla” de los Bienes Comunales de Santa Ana Tlacotenco, Milpa Alta, Ciudad de México, México. Geográficamente se localiza entre las coordenadas 19°06’ 51,57” N y 98°59’ 06,59” O con una superficie total de 35,27 hectareas (Figura 1). La topografía del terreno es montañosa, la altitud oscila entre 3271 m a 3348 m, el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, temperatura media anual de 14,4 °C y precipitación anual de 878,9 mm. El tipo de vegetación dominante es bosque natural de *Pinus* y bosque mixto de *Pinus-Alnus* (Rodríguez y López 2006).

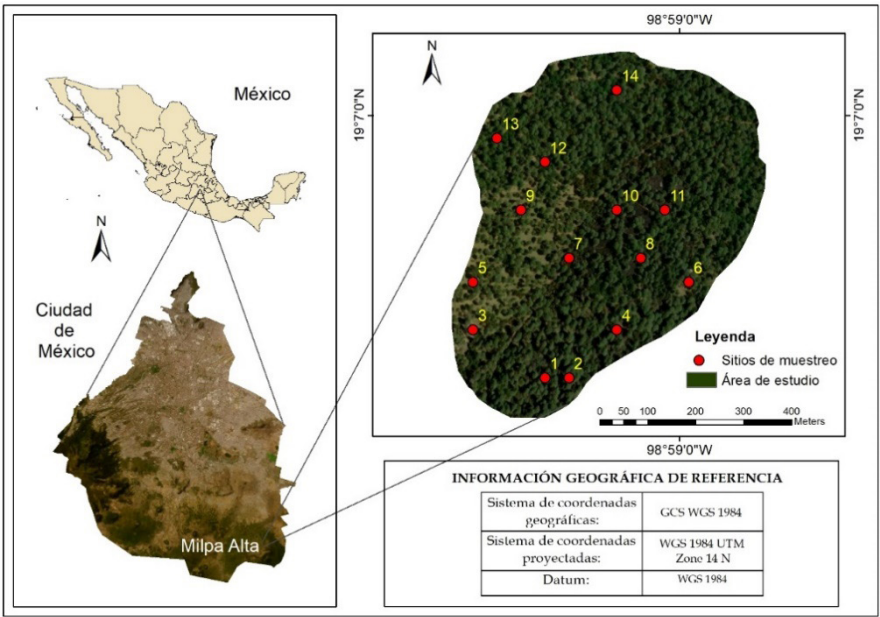


Figura 1: Localización del área de estudio en Milpa Alta, Ciudad de México.

Muestreo

Se establecieron al azar 14 sitios de muestreo con una superficie de 0,25 ha cada uno. Dentro de cada sitio se seleccionaron de forma aleatoria tres árboles sanos con características dasométricas de altura y diámetro representativas. Posteriormente, para cada árbol seleccionado se realizó la extracción de una muestra de barre-

no a una altura de 1,30 m con taladro de Pressler (Haglöf®) de 12 pulgadas de longitud y 12 mm de diámetro interno (Figura 2). Asimismo, se realizó la medición de las siguientes variables dasométricas: diámetro normal, altura total y altura de la primera rama. Se obtuvo un total de 42 muestras, con una edad promedio de 74 años, los cuales se almacenaron y transportaron en recipientes con agua destilada para su conservación.



Figura 2: Obtención de muestras de barreno en árboles de ocote (*Pinus montezumae* Lamb.)

En el Laboratorio de Anatomía y Tecnología de la Madera de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo, las muestras de barreno (N) fueron seccionadas transversalmente cada 5 anillos, desde la médula hacia la corteza. Esta división se realizó considerando que, en las proximidades a la corteza, los crecimientos anuales presentaron una mayor reducción en su espesor. Por lo tanto, la división se efectuó conforme al esquema presentado en la Figura 3. Posteriormente cada una de las secciones fue dividida horizontalmente en dos submuestras (A y B), tal como se indica en la misma figura. Las submuestras A se destinaron a la determinación de la densidad básica, mientras que las submuestras B fueron utilizadas para la medición de las características morfométricas de las traqueidas.

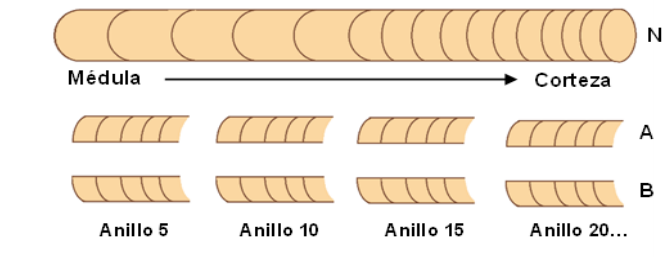


Figura 3: División de las muestras de barreno para la obtención de submuestras.

Estimación de la densidad básica

El volumen en estado verde de las submuestras (A) se calculó con el método de desplazamiento de agua (Principio de Arquímedes) (Valencia y Vargas 1997), después estas submuestras se llevaron al estado anhidro en estufa (Memmert®) modelo UN110 a temperatura de 103 °C ± 1 °C hasta alcanzar un peso constante para después pesarlas en una balanza digital con precisión 0,01 g. La densidad básica de la madera se obtuvo con la siguiente formula (Ecuación 1) (Valencia y Vargas 1997):

$$Db = \frac{P_0}{V_v} \quad (1)$$

Donde: Db: Densidad básica (kg/m³), P₀: Peso anhidro (kg) y V_v: Volumen verde (m³).

Determinación de la morfometría de traqueidas

Se obtuvieron astillas de las submuestras (B) de madera, se colocaron en frascos con una mezcla de peróxido de hidrogeno al 30 % y ácido acético glacial en partes iguales. Estos frascos se introdujeron en estufa a 60 °C durante 72 horas. Transcurrido ese tiempo, el material disociado se lavó con agua destilada cinco veces para retirar la mezcla. Después se tiñeron las traqueidas con colorante Pardo de Bismarck durante 30 minutos y se lavaron para retirar el colorante; a continuación, se colocaron en portaobjetos y fijaron con resina (Entellan®) dejando secar entre 24 y 36 horas.

El tamaño de muestra para las mediciones morfométricas se obtuvo a partir de información de una muestra preliminar de la longitud de treinta traqueidas, con estos valores se aplicó la formula estipulada en la norma ASTM D 2915-17 (2017) (Ecuación 2).

$$n = \left(\frac{t * s}{E * \bar{x}} \right)^2 = \left(\frac{t * CV}{E} \right)^2 \quad (2)$$

Donde: n: Tamaño de muestra, s: Desviación estándar, x̄: Valor de la media, E: Error relativo=45, t: Valor de t-Student con un α=0,05 y CV: Coeficiente de variación.

A partir de la Ecuación 2 se obtuvo un tamaño de muestra de 32 traqueidas por cada sección de 5 anillos, sin establecer distinción entre madera temprana y madera tardía, debido a que la segmentación de los anillos no fue posible, dado el escaso incremento anual. En cada sección se midió la longitud total (LT), diámetro total (DT), diámetro de lumen (DL) y espesor de pared celular de las traqueidas (EPCT), a partir de microfotografías obtenidas con un microscopio óptico equipado con cámara digital (Leica® EZ4HD) y software Leica Application Suite versión 3.3.0. Las mediciones de longitud se realizaron con un objetivo de 10×, mientras que los diámetros de traqueida y de lumen se registraron con un objetivo de 40× (Figura 4). El espesor de la pared celular se obtuvo a partir de la diferencia entre los diámetros total y lumen.

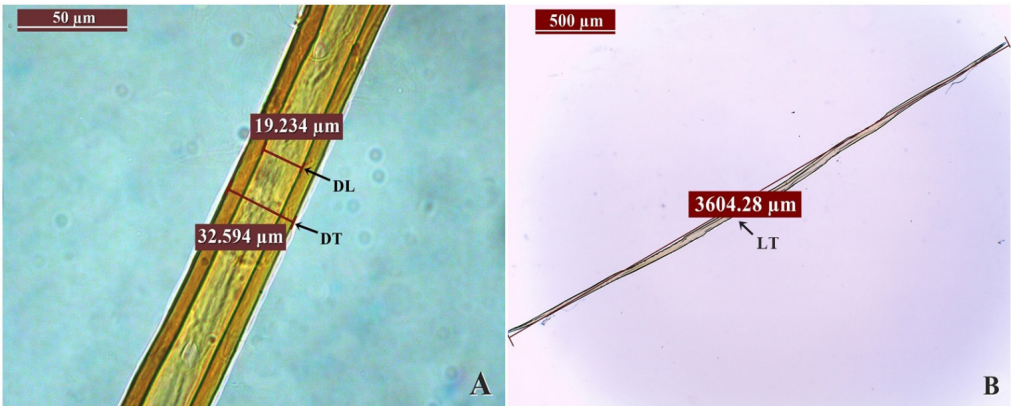


Figura 4: Medición de la morfometría de traqueidas, A. diámetro total (DT) y diámetro de lumen (DL) 40x, B. longitud total (LT) 10x.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con el software R (R Core Team 2025). Se obtuvieron las estadísticas descriptivas para las variables: altura total de árbol, altura de la primera rama, diámetro normal, densidad básica, longitud de traqueidas, diámetro de traqueidas, diámetro de lumen y espesor de la pared celular. Se ajustó un modelo de regresión segmentado con la función `segmented` para estimar de forma automática el punto de cambio (k) del comportamiento de las variables dimensionales de las traqueidas (Ecuación 3). La regresión segmentada es una técnica estadística usada cuando en la relación entre la variable explicativa y la variable respuesta existe un cambio en la tendencia, a partir de cierto valor k , conocido como punto de cambio; es decir, el modelo ajusta dos rectas con diferentes pendientes antes y después del punto de cambio estimado (k) (Montgomery *et al.* 2021). Se empleó la longitud de traqueidas (LT), diámetro (DT), diámetro de lumen (DL) y espesor de pared celular (EPCT) como variables respuesta y la densidad básica (Db) como variable explicativa.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 (x - k) + \varepsilon_i \tag{3}$$

Donde: k : Punto de cambio, x =Densidad básica (kg/m³).

Se estableció el punto de cambio (k) de 470 kg/m³ en la densidad básica para las correlaciones con las variables longitud de traqueidas (LT) y espesor de pared celular (EPCT) y 460 kg/m³ con el diámetro (DT) y diámetro de lumen (DL). Este valor estimado de k representó el valor de la densidad básica donde se presentó el cambio de madera temprana a madera tardía.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El arbolado de ocote (*Pinus montezumae* Lamb.) en el área de estudio presenta una altura promedio de 28,8 m y un diámetro normal promedio de 67,9 cm. En la Tabla 1 se muestran las estadísticas descriptivas de las variables: altura total (H), altura de la primera rama (HR), diámetro normal (D), densidad básica de la madera y morfometría de las traqueidas.

Tabla 1: Estadísticas descriptivas de los árboles y morfometría de traqueidas de ocote (*Pinus montezumae* Lamb.).

Parámetro	Árboles			Madera	Traqueidas			
	H (m)	HR (m)	D (cm)	Db (kg/m ³)	LT (μm)	DT (μm)	DL (μm)	EPCT (μm)
n	42	42	42	619	619	619	619	619
Mínimo	22,18	6,50	57,30	209,58	1743,49	41,74	20,87	10,17
Máximo	36,09	23,83	88,02	753,08	5956,67	63,45	45,45	23,54
μ	28,86	14,76	67,91	467,91	4265,92	51,43	33,22	18,20
σ	3,13	4,08	10,25	52,02	730,76	3,88	4,30	2,06
CV (%)	10,85	27,67	15,09	11,11	17,13	7,54	12,95	11,36

H: altura, HR: altura 1ra rama, D: diámetro normal, Db: densidad básica, LT: longitud total, DT: diámetro total, DL: diámetro de lumen, EPCT: espesor de la pared celular, μ: media, σ: desviación estándar, CV: coeficiente de variación

De acuerdo con la Tabla 1, la madera de ocote (*Pinus montezumae* Lamb.) presenta una densidad básica promedio de 467,91 kg/m³ (0,467 g/cm³). Silva-Arredondo y Návar-Cháidez (2012) reportan un valor similar de 0,47 g/cm³ para el género *Pinus*, y para pino de gregg (*Pinus greggii* Engelm. ex Parl.) López y Valencia (2001) indican una densidad relativa de 0,47 g/cm³. Otros estudios en ocote (*Pinus montezumae* Lamb.) señalan valores de densidad básica ligeramente inferiores; por ejemplo, Sotomayor *et al.* (2003) reportaron 420 kg/m³, Zamora Campos *et al.* (2007) 445 kg/m³, y Lima Rojas (2013) 450 kg/m³.

Los resultados obtenidos para la densidad básica de ocote (*Pinus montezumae* Lamb.) en la zona de estu-

dio sitúan a la madera en la categoría de madera ligera (Vignote Peña y Martínez 2006), con una densidad de tipo media (Sotomayor 2008).

La longitud promedio de las traqueidas de ocote (*Pinus montezumae* Lamb.) fue de 4265,92 μm , lo que corresponde a la categoría de longitud media establecida por la Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera (IAWA 2004). Valores similares se han reportado para otras especies del género *Pinus*, como pino de cooper (*Pinus cooperi* C.E. Blanco) (4135 μm), pino herreraí (*Pinus herreraí* Martínez) (4372 μm) y pino prieto (*Pinus leiophylla* Schltdl. & Cham.) (4486 μm) (De la Paz-Pérez y Dávalos 2016). Estas variaciones en la longitud de acuerdo con Escoto García *et al.* (2017), dependen tanto de la especie y las tasas de crecimiento, como de las condiciones climatológicas y topográficas en las que se desarrollen los individuos.

El diámetro promedio de las traqueidas de ocote (*Pinus montezumae* Lamb.) fue de 51,43 μm , similar a la media de 53,25 μm reportada para pino hondureño (*Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barrett & Golfari). En cuanto al diámetro promedio de lumen, se obtuvo un valor de 33,22 μm que coincide con los valores reportados para pino hondureño (*Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barrett & Golfari) (34,86 μm) (Adenaiya y Ogunsanwo 2016) y para madera temprana de arizona pine (*Pinus arizonica* Engelm.) (33 μm), pino de cooper (*Pinus cooperi* C.E. Blanco) (32 μm), pino prieto (*Pinus leiophylla* Schltdl. & Cham.) (33 μm) y pino teocote (*Pinus teocote* Cham. & Schltdl) (33 μm) (De la Paz-Pérez y Dávalos-Sotelo 2016). Por último, el espesor de pared celular de las traqueidas de ocote (*Pinus montezumae* Lamb.) fue de 18,20 μm , valor superior al registrado en madera tardía de Arizona pine (*Pinus arizonica* Engelm.) (11 μm), pino prieto (*Pinus leiophylla* Schltdl. & Cham.) (11 μm), pino teocote (*Pinus teocote* Cham. & Schltdl) (12 μm) y pino herreraí (*Pinus herreraí* Martínez) (13 μm) (De la Paz-Pérez y Dávalos-Sotelo 2016).

Los amplios rangos encontrados entre los valores mínimos y máximos de las características morfométricas de las traqueidas se debieron principalmente a que no se diferenciaron en este estudio la madera temprana de la tardía ni la madera juvenil de la madura. Este mismo fenómeno también ha sido reportado en estudios previos para pino hondureño (*Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barrett & Golfari) (Márquez-Carrero *et al.* 2022) y pino contorto (*Pinus contorta* Douglas) (Refort *et al.* 2024).

Variación radial de las características morfométricas y densidad básica de *Pinus montezumae*

Variación radial de la densidad básica

De acuerdo con los valores medios obtenidos para la densidad básica en sentido radial de ocote (*Pinus montezumae* Lamb.) (Figura 5a), se encontró que la menor densidad básica (441,28 kg/m^3) se presentó en la submuestra más cercana a la médula (anillo 5), con tendencia creciente hasta alcanzar un valor máximo de 493,98 kg/m^3 en el anillo 70. A partir de este punto, se observó una disminución escasa y gradual desde el anillo 75 hasta el 90. Este comportamiento coincide con el reportado para scot pine (*Pinus sylvestris* L.), en el cual la gravedad específica básica aumentó rápidamente desde la médula hasta el anillo 20-30 para luego estabilizarse y posteriormente disminuir después del anillo 70 (Auty *et al.* 2014).

Análogamente, Fabisiak y Fabisiak (2021) encontraron en scot pine (*Pinus sylvestris* L.) el mismo patrón de disminución de la densidad en los anillos próximos a la corteza, indicando un efecto significativo de la edad cambial sobre la densidad de la madera.

Asimismo, otros factores que han demostrado influir en la variación radial de la densidad en los anillos próximos a la corteza son los componentes albura-duramen. Se han reportado valores altos de densidad en el duramen de pino teocote (*Pinus teocote* Cham. & Schltdl) (Silva-Arredondo y Nívar-Cháidez 2012). Además, la zona correspondiente a la albura en las coníferas se caracteriza por ser más porosa y blanda, y por presentar un menor contenido de extractivos (García *et al.* 2003).

En esta última relación, también se ha documentado que el duramen presenta un mayor contenido de extractivos, lo cual se traduce en un incremento de la densidad. Por el contrario, en la albura, la menor concentración de estos compuestos resulta en una disminución de esta propiedad física de la madera (De Angelis *et al.* 2018).

Cabe destacar que el patrón radial de la densidad básica de la madera para ocote (*Pinus montezumae* Lamb.) se mostró típico de algunas coníferas, pero no de la mayoría. Por ejemplo, en slash pine (*Pinus elliottii*

Engelm.) los patrones de variación radial son diferentes, presentando tendencias totalmente crecientes de médula a corteza (Palermo *et al.* 2013, Sackser *et al.* 2018).

Variación radial de la longitud de traqueidas

El valor más bajo para la longitud media de traqueidas se presentó en la submuestra más cercana a la médula (anillo 5), con un valor de 2879,37 μm , en contraste, el más alto se obtuvo para la submuestra más cercana a la corteza (anillo 90), con un valor de 5306,27 μm . Este comportamiento es similar al reportado para pino hondureño (*Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barrett & Golfari), especie que presenta el valor medio más bajo de longitud de traqueidas (3022 μm) en los anillos cercanos a la médula (1-5), mientras que los valores más altos (5590 μm) se observan en los anillos más cercanos a la corteza (21-26) (Oluwadare *et al.* 2019).

La figura 5b muestra el patrón de variación radial de la longitud de las traqueidas obtenido para ocote (*Pinus montezumae* Lamb.), donde se observó un incremento de médula a corteza, similar al comportamiento encontrado en otras coníferas como pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson) (Letourneau *et al.* 2014), pino patula (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. y Cham.), loblolly pine (*Pinus taeda* L.) (Winck *et al.* 2019) y pino contorto (*Pinus contorta* Douglas) (Refort *et al.* 2024).

Asimismo, se observó que esta tendencia de incremento en la longitud de las traqueidas fue mayor en la zona de la médula hasta el anillo 20, después de este punto ocote (*Pinus montezumae* Lamb.) reflejó incrementos menores en la longitud de traqueidas hacia la corteza. De acuerdo con estos resultados, a través del análisis gráfico se estimó una edad de transición entre madera juvenil y madura para esta especie de 20 años. Esta edad de transición es semejante a la reportada para scot pine (*Pinus sylvestris* L.), ubicada en 21,77 años (Mutz *et al.* 2004), y para slash pine (*Pinus elliotii* Engelm.), alrededor de 23 años (Palermo *et al.* 2013). En general, en coníferas la edad de transición entre leño juvenil y maduro ocurre a partir de los 20 años (Palermo *et al.* 2013, Letourneau *et al.* 2014, Zanuncio *et al.* 2022).

Variación radial del diámetro total y diámetro de lumen

El comportamiento radial del diámetro total presentó un patrón creciente desde la médula hacia la corteza (Figura 5c). El valor promedio más bajo (47,68 μm) se registró en la sección más cercana a la médula (anillo 5), mientras que el valor promedio más alto (55,73 μm) se observó en la sección más próxima a la corteza (anillo 90). Este patrón coincide con el incremento de médula a corteza reportado para scot pine (*Pinus sylvestris* L.) (Mäkinen y Hynynen 2012).

En contraste, la variable diámetro de lumen presentó un patrón irregular, sin una tendencia definida desde la médula hacia la corteza (Figura 5d). Un comportamiento similar fue reportado para pino hondureño (*Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barrett & Golfari), especie que no exhibió un patrón consistente de variación radial en esta característica morfométrica (Adenaiya y Ogunsanwo 2016).

Variación radial del espesor de pared celular

Las traqueidas de ocote (*Pinus montezumae* Lamb.) con las paredes celulares más delgadas se encontraron en la submuestra más cercana a la médula (anillo 5), con un valor de 15,36 μm ; en cambio, las paredes celulares más gruesas (20,07 μm) correspondieron a la submuestra más próxima a la corteza (anillo 90). En esta especie se observó una tendencia creciente en el espesor de la pared celular desde la médula hacia la corteza (Figura 5e), patrón similar al reportado para pino contorto (*Pinus contorta* Douglas) (Refort *et al.* 2024), loblolly pine (*Pinus taeda* L.) (Winck *et al.* 2019) y pino hondureño (*Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barrett & Golfari) (Álvarez Lazo *et al.* 2023).

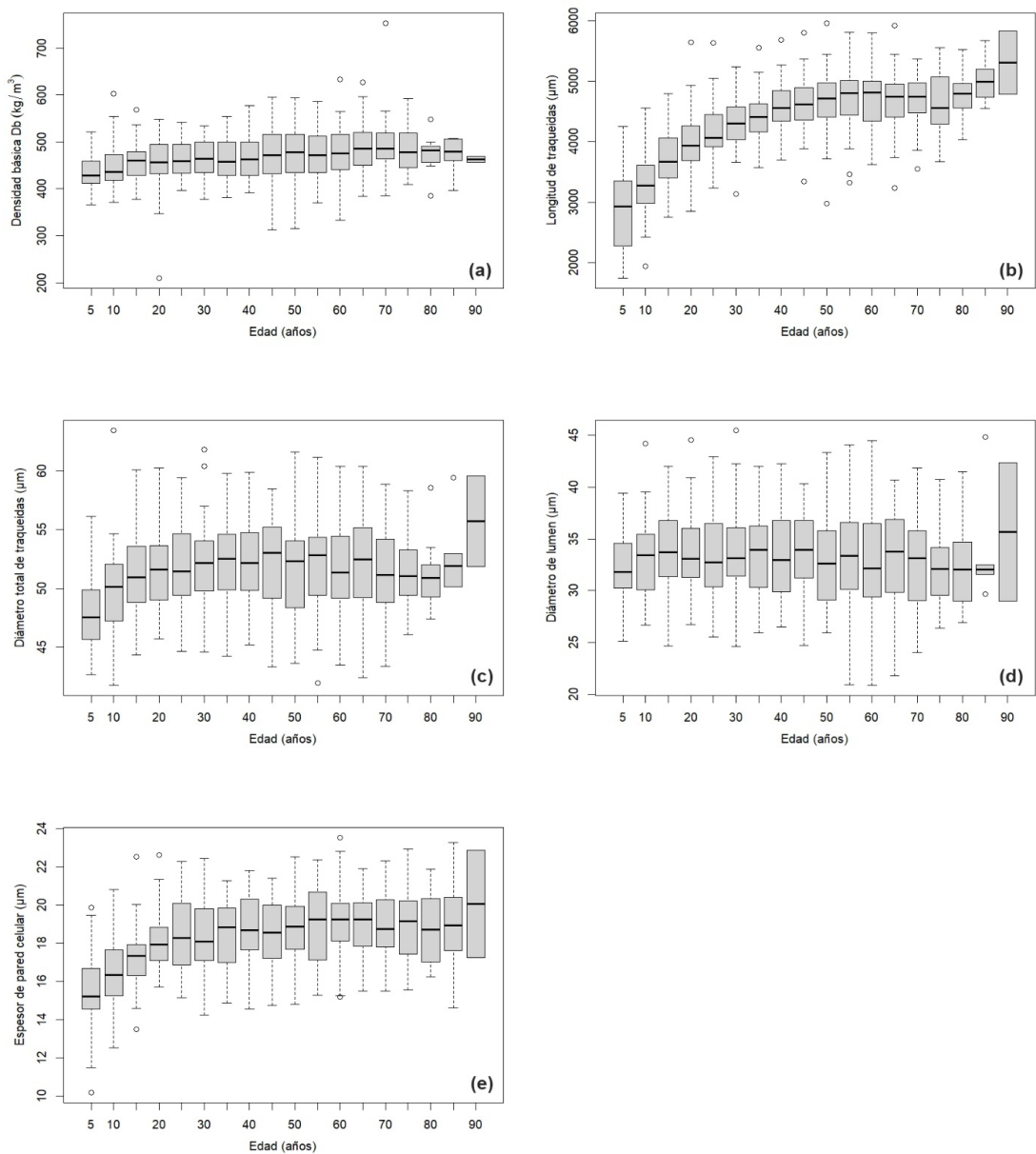


Figura 5: Variación radial de médula a corteza de la (a) densidad básica, (b) longitud de traqueidas, (c) diámetro total de traqueidas, (d) diámetro de lumen y (e) espesor de pared celular de ocote (*Pinus montezumae* Lamb.).

El análisis de la variación radial de la densidad y de las dimensiones de las traqueidas en ocote (*Pinus montezumae* Lamb.), en árboles en pie, mostró un patrón típico de las coníferas; en los anillos formados cerca de la médula, la madera presenta propiedades diferentes respecto a los anillos localizados hacia la corteza (Ruano y Hermoso 2021). Para esta especie, los resultados indican que la densidad básica es baja durante los primeros cinco años, se incrementa progresivamente hasta el año 75, y posteriormente tiende a disminuir entre los anillos 76 y 90. A su vez, las traqueidas son más cortas, angostas y con pared celular delgada en los primeros cinco años; a partir del anillo 20, la longitud se incrementa, mientras que el diámetro y el espesor de la pared celular aumentan de forma gradual y se mantienen relativamente constantes hasta el anillo 90, donde se observaron traqueidas más largas, anchas y con paredes más gruesas.

Estos resultados evidencian la variación en las propiedades anatómicas y físicas de la madera a lo largo del eje radial y refuerzan la importancia de considerar dicha variación en el aprovechamiento forestal. Como señala Auty *et al.* (2014), esta información es valiosa para incorporarse en modelos de simulación de crecimiento y rendimiento, ya que permite predecir las implicaciones prácticas de distintas intervenciones silvícolas sobre la calidad de la madera. Asimismo, puede contribuir a optimizar los planes de manejo silvícola de ocote (*Pinus montezumae* Lamb.) en México, promoviendo un uso más eficiente y sostenible del recurso forestal.

Relación entre las variables morfométricas de traqueidas en función de densidad básica de la madera

Los resultados del análisis de regresión de la longitud total (LT), espesor de la pared celular (EPCT) y diámetro total de las traqueidas (DT) en función de la densidad básica (Db) indicaron relaciones significativas (p valor<0,05) (Tabla 2) y positivas entre estas variables (Figura 6a, Figura 6b y Figura 6d). De manera específica, se determinó que el 95 % de la variabilidad de la longitud total de las traqueidas y el espesor de la pared celular, así como el 90 % de la variabilidad del diámetro total, fue explicada por la densidad básica de la madera.

Estos resultados coinciden con las relaciones entre la longitud de traqueidas y la densidad de la madera reportadas para scot pine (*Pinus sylvestris* L.) en árboles dominantes (r=0,95), intermedios (r=0,97) y suprimidos (r=0,87) (Fabisiak y Fabisiak 2021). En pino de manchuria (*Pinus tabuliformis* Carr.), las relaciones entre la longitud de traqueidas y el espesor de la pared celular en función de la densidad básica también fueron positivas, con coeficientes de determinación de 0,22 para ambos modelos (Ouyang *et al.* 2017). Además, la relación positiva encontrada entre el espesor de la pared celular y la densidad básica reafirma lo expuesto por Panshin y De Zeeuw (1980), quienes indicaron que traqueidas con paredes gruesas conllevan a densidades altas, mientras que paredes delgadas reflejan densidades bajas en la madera.

Por otro lado, el modelo de regresión entre el diámetro de lumen y la densidad básica no resultó significativo (p valor>0,05) (Tabla 2), lo que sugiere que no existe una relación estadísticamente comprobable entre estas variables. En la Figura 6c se observa inicialmente un comportamiento creciente del diámetro de lumen, seguido por una tendencia negativa abrupta. Relaciones negativas entre el diámetro de lumen y la densidad básica de la madera también se han documentado para scot pine (*Pinus sylvestris* L.), con un coeficiente de correlación de Pearson de -0,253 (Pritzkow *et al.* 2014), así como en madera temprana y tardía en clones de pino de manchuria (*Pinus tabuliformis* Carr.), con coeficientes de -0,424 y -0,408, respectivamente (Ouyang *et al.* 2017).

Tabla 2: Modelos de regresión segmentada para las características morfométricas de traqueidas en función de la densidad básica de ocote (*Pinus montezumae* Lamb.).

x (μm)	y (kg/m³)	Modelo y ≤ k	Modelo y > k	p-valor	R²
LT	Db	LT= -26439,335+66,282Db	LT= 7625,795-6,197Db	3,60e-07	0,95
DT		DT= -63,97631+0,2702Db	DT= 60,1579-0,0174Db	0,00091	0,90
DL		DL= -12,19391+0,10088Db	DL= 49,36329-0,03294Db	0,652	0,53
EPCT		EPCT= -45,90254+0,13882Db	EPCT= 17,3165+0,00322Db	5,63e-07	0,95

LT, longitud de traqueidas, DT: diámetro de traqueidas, DL: diámetro de lumen, EPCT: espesor de pared celular de traqueidas, Db: densidad básica, K=punto de cambio (470 kg/m³ para LT, EPCT y 460 kg/m³ para DT, DL).

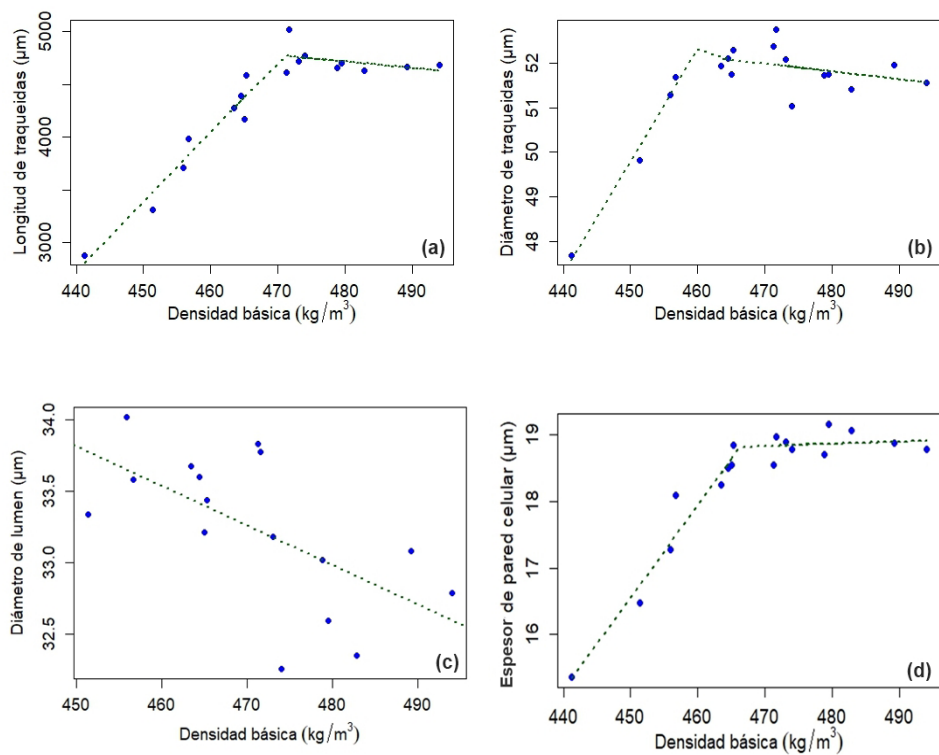


Figura 6: Relación entre las características morfométricas de traqueidas en función de la densidad básica de la madera de ocote (*Pinus montezumae* Lamb.): (a) longitud total, (b) diámetro total, (c) diámetro de lumen y (d) espesor de la pared celular.

Las regresiones segmentadas permitieron modelar y predecir el comportamiento de las características morfométricas de las traqueidas a partir de la densidad básica de la madera, empleando puntos de cambio (*k*) que representan transiciones entre madera juvenil y madera madura. Los modelos desarrollados específicamente para ocote (*Pinus montezumae* Lamb.) reconocen que las variaciones radiales en la morfometría de las traqueidas no son uniformes y están influenciadas por la posición dentro del fuste. Esto concuerda con diversos estudios que han documentado que la madera juvenil se caracteriza por presentar traqueidas más cortas, paredes celulares más delgadas y una mayor variabilidad, lo que se traduce en propiedades mecánicas y tecnológicas inferiores en comparación con la madera madura (Gryc *et al.* 2011, Winck *et al.* 2022). En particular, en la industria de la pulpa y papel, se ha documentado que el leño maduro contribuye a una mayor resistencia y rigidez del papel, mientras que el leño juvenil produce láminas con propiedades de resistencia reducidas (Sjöstrand *et al.* 2022). Por lo tanto, la incorporación de estos contrastes en los modelos resulta especialmente relevante, ya que permiten predecir con mayor precisión la calidad, resistencia y rendimiento en procesos industriales.

CONCLUSIONES

Los patrones de variación radial de la longitud total, diámetro total y espesor de pared celular de las traqueidas de ocote (*Pinus montezumae* Lamb.) mostraron tendencias crecientes de médula a corteza, mientras que el diámetro de lumen presentó un comportamiento radial irregular. A partir del perfil de variación radial de la longitud de traqueidas, se identificó una edad de transición de madera juvenil a madura de 20 años para ocote (*Pinus montezumae* Lamb.) en la zona de estudio.

La densidad básica de la madera no presentó un patrón completamente creciente en sentido radial, lo cual sugiere que esta variación podría estar influida por factores como la proporción albura-duramen u otras condiciones silvícolas, lo que plantea la necesidad de profundizar mediante estudios complementarios.

Los modelos de regresión segmentada desarrollados para predecir la longitud, el diámetro de traqueidas y el espesor de la pared celular de las traqueidas en función de la densidad básica, mostraron un alto nivel de ajuste y capacidad explicativa. Estos resultados consolidan dicha metodología como una herramienta robusta para la estimación indirecta de variables anatómicas a partir de la densidad básica de fácil medición. Esta base metodológica es replicable en otras especies de pino y posee un alto potencial de aplicación en la evaluación no destructiva de la madera, así como en la promoción de una gestión forestal más eficiente y sostenible.

Declaración de autorías

X. A. R-R.: Conceptualización, visualización, metodología, investigación, curación de datos, redacción de borrador original, redacción-revisión y edición. A. B-R.: Metodología, validación, redacción-revisión y edición, adquisición de financiación, supervisión, recursos, administración de proyectos. R. M-V.: Metodología, validación, supervisión, redacción-revisión y edición. A. C-A.: Metodología, software, análisis formal, validación; L. C-H: metodología, investigación, redacción-revisión y edición, supervisión.

Declaración de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con este manuscrito.

REFERENCIAS

Adenaiya, A.O.; Ogunsanwo, O.Y. 2016. Radial variation in selected physical and anatomical properties within and between trees of 31 year old *Pinus caribaea* (Morelet) grown in plantation in Nigeria. *South-east European Forestry* 7(1): 49-55. <http://dx.doi.org/10.15177/seefor.16-07>

Álvarez Lazo, D.; Quilhó, T.; Bessa, F.; Rodríguez, J.C.; Tavares, F. 2023. Variación de la biometría de las traqueidas y propiedades de la madera de *Pinus caribaea* Morelet var *caribaea* Barret y Golfari. *Revista Cubana de Ciencias Forestales* 11(2). e20. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2310-34692023000200006&script=sci_arttext

American Society for Testing and Materials. ASTM. 2017. Standard practice for sampling and data-analysis for structural wood and wood-based products. ASTM D 2915:2017. ASTM International: West Conshohocken, USA.

Auty, D.; Achim, A.; Macdonald, E.; Cameron, A.D.; Gardiner, B.A. 2014. Models for predicting wood density variation in Scots pine. *Forestry* 87(3): 449-458. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu005>

Bouslimi, B.; Koubaa, A.; Bergeron, Y. 2019. Intra-ring variations and interrelationships for selected wood anatomical and physical properties of *Thuja occidentalis* L. *Forests* 10(4). e339. <https://doi.org/10.3390/f10040339>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. CONABIO-SEDEMA. 2021. La biodiversidad en la Ciudad de México. CONABIO/SEDEMA. Ciudad de México. México https://www.biodiversidad.gob.mx/media/1/region/eeb/files/CDMX_resumen.pdf

De Angelis, M.; Romagnoli, M.; Vek, V.; Poljanšek, I.; Oven, P.; Thaler, N.; Lesar, B.; Kržišnik, D.; Humar, M. 2018. Chemical composition and resistance of Italian stone pine (*Pinus pinea* L.) wood against fungal decay and wetting. *Industrial Crops and Products* 117: 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.016>

De la Paz-Pérez, O.C.; Dávalos-Sotelo, R. 2016. Anatomía de la madera de seis especies de *Pinus* (Pinaceae) del estado de Durango, México. *Madera y Bosques* 22(3): 113-132. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231460>

Escoto García, T.; Beas Beas, N.; Contreras Quiñones, H.J.; Rodríguez Rivas, A.; Díaz Ramos, S.G.; Anzaldo Hernández, J.; Vega Elvira, R. 2017. Caracterización dasométrica y químico micrográfica de tres especies de pino y su viabilidad de aprovechamiento integral. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 8(41): 109-138. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i41.28>

Fabisiak, E.; Fabisiak, B. 2021. Relationship of tracheid length, annual ring width and wood density in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees from different social classes of tree position in the stand. *Bioresources* 16(4): 7492-7508. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.7492-7508>

Flores, A.; Moctezuma-López, G. 2021. Cosecha de madera de 20 coníferas en zonas de movimiento de gemoplasma. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(66). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.829>

Flores, A.; Pineda, T.; Flores, E. 2019. Potencial de reforestación de seis especies de pino para la restauración de zonas degradadas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 10(55): 1-9. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i55.604>

García, E.L.; Guindeo, C.A.; Peraza, O.C.; De Palacios, D.P. 2003. La madera y su anatomía. Anomalías y defectos, estructura microscópica de coníferas y frondosas, identificación de maderas, descripción de especies y pared celular. Fundación Conde del Valle Salazar, Ediciones Mundi-Prensa. ISBN 8484761533.

Gernandt, D.S.; Pérez-de la Rosa, J.A. 2014. Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85(S1): 126-133. <https://doi.org/10.7550/rmb.32195>

Gryc, V.; Vavřík, H.; Horn, K. 2011. Density of juvenile and mature wood of selected coniferous species. *Journal of Forest Science* 57(3): 123-130. <https://doi.org/10.17221/18/2010-jfs>

IAWA. 2004. List of microscopic features for softwood identification. *IAWA Journal* 25(1): 1-70. http://maderasenargentina.com.ar/archivos/IAWA_Committee2004.pdf

Jankowski, A.; Wyka, T.P.; Oleksyn, J. 2021. Axial variability of anatomical structure and the scaling relationships in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles of contrasting origins. *Flora* 274. e151747. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151747>

Kollmann, F. 1959. Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y el Servicio de la Madera. Madrid, España. <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/2510>

Letourneau, F.J.; Medina, A.A.; Andia, I.R.; Andenmatten, E.; De Agostini, N.; Mantilaro, N. 2014. Caracterización xilo-tecnológica de la madera de una plantación adulta de *Pinus ponderosa* de la Patagonia Argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 40(2): 196-201. <https://www.redalyc.org/pdf/864/86431785014.pdf>

Lima Rojas, L. 2013. Evaluación de la composición química y propiedades físicas de la madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía. (Tesis maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, México. <http://eprints.uanl.mx/3530/>

Lira González, D.E. 2020. Guía básica de pinos mexicanos. Una mirada a la gran diversidad forestal del género *Pinus*. Bozkia: Nuevo León, México. <https://www.coursehero.com/file/64130381/GUIA-BASICA-DE-PINOS-MEXICANOSpdf/>

López, L.M.; Valencia, M.S. 2001. Variación de la densidad relativa de la madera de *Pinus greggii* Engelm. del norte de México. *Madera y Bosques* 7(1): 37-46. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61770105>

Mäkinen, H.; Hynynen, J. 2012. Predicting wood and tracheid properties of Scots pine. *Forest Ecology and Management* 279: 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.024>

Marja-Sisko, I.P. 1995. *Fiber Atlas: Identification of Paper Making Fibers*. Springer Series in Wood Science. Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-07212-7>

Márquez-Carrero, G.; Valero, S.W.; León-Hernández, W.J.; Gutiérrez-Gotera, I.; Maldonado-Rangel, J.C. 2022. Variabilidad transversal de características dimensionales de traqueidas en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* de plantaciones de 25 años de edad. *Tecnología en Marcha* 35(3): 82-93. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/5868

Montgomery, D.C.; Peck, E.; Vining, G. 2021. *Introduction to Linear Regression Analysis*. John Wiley & Sons.

Mutz, R.; Guilley, E.; Sauter, U.; Nepveu, G. 2004. Modelling juvenile-mature wood transition in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using nonlinear mixed-effects. *Annals of Forest Science* 61(8): 831-841. <https://doi.org/10.1051/forest:2004084>

Núñez, C.E. 2007. Relaciones de conversión entre densidad básica y densidad seca de madera. *Revista de Ciencia y Tecnología* 9(9): 44-50. <https://www.fceqyn.unam.edu.ar/recyt/index.php/recyt/article/view/594>

Oluwadare, A.O.; Oyelere, A.T.; Riki, J.T.B.; Majekobaje, A.R.; Adeyemo, S.M. 2019. Axial and radial variation in tracheid length of plantation grown *Pinus caribaea* Morelet grown in Afaka. *Journal of Sustainable Environmental Management* 11: 1-8. https://www.researchgate.net/publication/355158592_Axial_and_Radial_Variation_in_Tracheid_Length_of_Plantation_grown_Pinus_caribaea_Morelet_Grown_in_Afaka

Ouyang, F.; Ma, J.; An, S.; Wang, J.; Weng, Y. 2017. Genetic variation of wood tracheid traits and their relationships with growth and wood density in clones of *Pinus tabulaeformis*. *Journal of Forestry Research* 29: 1021-1030. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0483-7>

Palermo, G.P.M.; Latorraca, J.V.F.; Severo, E.T.D.; Nascimento, A.M.; Rezende, M.A. 2013. Delimitação entre os lenhos juvenil e adulto de *Pinus elliottii* Engelm (Delimitation the juvenile and mature wood of *Pinus elliottii* Engelm). *Revista Árvore* 37(1): 191-200. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000100020>

Panshin, A.J.; De Zeeuw, C. 1980. *Textbook of Wood Technology. Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Woods of the United States and Canada*. McGraw-Hill Book Company: New York, United States. <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/2512>

Pritzkow, C.; Heinrich, I.; Grudd, H.; Helle, G. 2014. Relationship between wood anatomy, tree-ring widths and wood density of *Pinus sylvestris* L. and climate at high latitudes in northern Sweden. *Dendrochronologia* 32(4): 295-302. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2014.07.003>

R Core Team. 2025. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org>

Refort, M.M.; Acuña-Rello, L.; Monteoliva, S.; Mateo, C.; Charlot, P.; Palazzini, D.; Pagano, C.;

Rodríguez, G.M.; López, B.J. 2006. Caracterización de unidades biofísicas a partir de indicadores ambientales en Milpa Alta, Centro de México. *Investigaciones Geográficas* 60: 46-61. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112006000200004

Ruano, A.; Hermoso, E. 2021. Juvenile-mature wood evaluation along the bole considering the influence of silvicultural treatments. *Maderas: Ciencia y Tecnología* 23(21): 1-10. <https://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100421>

Sackser, M.R.; Valdés, P.A.; Grance, L.; Bohren, A.V.; Aguilera, A.; Andrade, N.Y.; Grance, J. 2018. Densidad de la madera de *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm de 21 años de edad, a distintas alturas desde la médula a la corteza; estimación del límite madera juvenil-madura. *Revista Yyrrareta* 26: 29-37. <https://hdl.handle.net/20.500.12219/2588>

Saucedo-Ibarra, J.; Borja de la Rosa, A.; Tarcísio-Lima, J.; Corona-Ambriz, A.; Machuca-Velasco, R. 2022. Efecto del ángulo microfibrilar en las características tecnológicas de la madera de *Pinus*. *Maderas: Ciencia y Tecnología* 24: 1-18. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2022000100448>

Silva-Arredondo, F.M.; Návar-Cháidez, J.J. 2012. Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México. *Madera y Bosques* 18(1): 77-88. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=s1405-04712012000100006&script=sci_arttext

Sjöstrand, B.; Deshpande, R.; Thyrel, M.; Henriksson, G. 2022. Dewatering properties of pulps made from different parts of a Norway spruce (*Picea abies*). *Nordic Pulp and Paper Research Journal* 37(4): 702-711. <https://doi.org/10.1515/npprj-2022-0050>

Sotomayor, C.J.; Herrera, F.M.; Cruz, D.J. 2003. Clasificación mecánica de la madera de 100 especies mexicanas. In: XII Congreso Forestal Mundial. Quebec, Canadá. <https://www.fao.org/3/XII/1054-B4.htm>

Sotomayor, C.J. 2008. Tabla FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Michoacán, México.

Tamarit-Urias, J.C.; Quiñonez-Barraza, G.; García-Cuevas, X.; Hernández-Ramos, J.; Valencia, M.S.; Vargas, H.J. 1997. Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques* 3(1): 81-87. <https://doi.org/10.21829/myb.1997.311381>

Vignote Peña, S.; Martínez Rojas, I. 2006. *Tecnología de la madera*. Mundi-Prensa: Madrid, España. <https://tecno1di.files.wordpress.com/2016/03/madera.pdf>

Winck, R.A.; Area, M.C.; Belaber, E.C.; Aquino, D.R.; Fassola, H.E.; Gauchat, M.E. 2022. Tracheid morphological characteristics of fast growth hybrid pine. *Maderas: Ciencia y Tecnología* 24(24): 1-12. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2022000100443>

Winck, R.A.; Martínez, M.I.; Romberg, E.I.; Fassola, H.E.; Bohren, A.V.; Aquino, D.R. 2019. Morfometría de traqueidas de *Pinus taeda* L., provenientes de un ensayo de poda en NE de Argentina. *Revista Floresta* 49(3): 503-512. <https://catalogo.fhycs.unam.edu.ar/Record/ir-20.500.12219-4129>

Zamora Campos, E.M.; Vázquez Cuecuecha, O.G.; Pérez Ahuatzi, A.; Cano Flores, R.; Aparicio Rentería, A.; Fernández Pedraza, E. 2007. Variación natural de la densidad de la madera en *Pinus montezumae* Lamb. en tres altitudes del parque nacional La Malinche, Tlaxcala, México. *Foresta Veracruzana* 9(2): 33-37. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49790205>

Zanuncio, A.J.V.; Possato, E.L.; Carvalho, A.G.; Lopes, O.P.; De Castro, V.R. 2022. Basic density and scaling of juvenile and mature wood in *Pinus Caribaea* trees. *Cellulose Chemistry and Technology* 56(5): 473-479. <https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2022.56.40>