



Caracterización morfo-anatómica foliar en progenies de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Leaf morpho-anatomical characterization in *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. progenies

Tomás Escobedo Luna¹, Sergio Hernández León^{1*}, Rodrigo Rodríguez
Laguna¹, Diana Gómez García¹, Oscar Arce Cervantes¹

Fecha de recepción/Reception date: 28 de agosto de 2025.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 13 de enero de 2026.

¹Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: sergio_hernandez@uaeh.edu.mx

*Corresponding author; e-mail: sergio_hernandez@uaeh.edu.mx

Resumen

Los ensayos de progenie son campos experimentales en los que se evalúa la genética de progenitores seleccionados. Reúnen familias de diferentes procedencias que varían por factores genéticos o ambientales. El objetivo de esta investigación fue describir y analizar la morfo-anatomía foliar de *Pinus patula* de dos ensayos de progenie establecidos en el rancho Tlatoxca en Hidalgo y el ejido Ojo de Agua en Veracruz, México. Se recolectaron diez fascículos de 64 árboles. Se realizaron cortes transversales y se tiñeron con safranina y azul-alcian. Mediante microscopio óptico binocular se analizaron y describieron las estructuras. El número de acículas por fascículo, el número de hileras estomáticas (cara abaxial y adaxial) y el número de canales de resina se sometieron a un análisis de varianza ($P \leq 0.05$). Se observó epidermis monoestratificada formada por células rectangulares altamente esclerificadas. La hipodermis es monoestratificada y biestratificada; 54 % de las acículas procedentes del rancho Tlatoxca exhibieron hipodermis mayormente biestratificada, y solo 33 % del ejido Ojo de Agua. Se verificaron diferencias estadísticas en el número de canales resiníferos ($P \leq 0.0001$); el material de Tlatoxca se ubicó en un intervalo de (2-)-3(-6) y promedio de 3.48; los valores para el ejido Ojo de Agua fueron de (0-)-3(-4), con promedio de 2.64. La posición de los canales de resina, fue media e interna, excepcionalmente externa y septal. Las condiciones ambientales de cada sitio de plantación influyeron sobre algunas características morfo-anatómicas de las acículas de *P. patula*, en dos plantaciones de dos años de edad.

Palabras clave: Acículas, anatomía foliar, canales de resina, endodermis, epidermis, hipodermis.

Abstract

Progeny trials are experimental fields where the genetics of selected parent trees are evaluated. They bring together families from different origins that vary due to genetic and/or environmental factors. The objective of this research was to describe and analyze the foliar morpho-anatomy of *Pinus patula* from two progeny trials established at the *Tlatoxca* ranch in the state of *Hidalgo* and the *Ojo de Agua ejido* in the state of *Veracruz*, Mexico. Ten fascicles were collected from 64 trees. Cross-sections were made and stained with safranin and alcian blue. The structures were analyzed and described using an optical binocular microscope. The number of needles per fascicle, the number of stomatal rows (abaxial and adaxial surfaces), and the number of resin canals were subjected to an analysis of variance ($P \leq 0.05$). A single-layered epidermis composed of highly clarified rectangular cells was observed. The hypodermis is single-layered and bi-layered; 54 % of the needles at the *Tlatoxca* ranch exhibited a mostly bi-layered hypodermis, while at the *Ojo de Agua ejido*, 33 % did. Significant differences were found in the number of resin canals ($P \leq 0.0001$); at the *Tlatoxca* ranch, the number ranged from (2-)3(-6) with an average of 3.48, while at the *Ojo de Agua ejido*, the range was (0-)3(-4), with an average of 2.64. The resin canals were frequently located medially and internally, and exceptionally externally and septally. The environmental conditions of each plantation site influenced some morpho-anatomical characteristics of the *P. patula* needles in two two-year-old plantations.

Keywords: Needles, leaf anatomy, resin canals, endoderm, epiderm, hypoderm.

Introducción

La presión ambiental puede afectar los rasgos morfológicos y el fenotipo de las plantas (Rodríguez-Laguna & Capo-Arteaga, 2005). Las condiciones ambientales están directamente relacionadas con el crecimiento, desarrollo (Fernández & Salvo, 2003) y tienen un papel importante en la variación morfológica y anatómica de cada órgano (Sotolongo-Sospedra et al., 2022). Dicha variación está influenciada por factores abióticos tales como los regímenes de temperatura, cantidad y disponibilidad de luz (Tiwari et al., 2013); propiedades del suelo (Ghimire et al., 2014; Gianoli, 2004), y la genética de la planta (Chávez-García et al., 2022; Zhang et al., 2017).

Las hojas secundarias (acículas) en los pinos (*Pinus* L.) son órganos expuestos al ambiente, presentan variación dentro y entre diferentes árboles de la misma especie (Azcárraga-Rosette et al., 2022). Son responsables de la fotosíntesis, la asimilación de carbono atmosférico y el intercambio gaseoso (Donnelly et al., 2016). Las acículas

ajustan o modifican su morfología y estructura anatómica para soportar condiciones desfavorables del hábitat (Geada-López et al., 2021; Nikolić et al., 2016).

Pinus patula Schiede ex Schltdl. & Cham. es un árbol perenne de porte alto que alcanza hasta 40 m de altura y 100 cm de diámetro del tronco (tallo). Usualmente, presenta fuste recto y cilíndrico. Fascículos de 3-4(-5) acículas delgadas, laxas y colgantes, de (11-)15-25(-30) cm de largo y 0.7-0.9 mm de ancho. Esta especie se distribuye de manera natural en México, en los estados de Chiapas, Estado de México, Hidalgo, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y la Ciudad de México sobre formaciones montañosas de la Sierra Madre Oriental (Dvorak et al., 2000; Farjon & Styles, 1997; Pérez-Luna et al., 2024); a una altitud de 1 500 a 3 100 m (Perry, 1991). *P. patula* ha sido evaluada mediante ensayos de progenie debido a su amplia distribución e importancia forestal (Salaya-Domínguez et al., 2012).

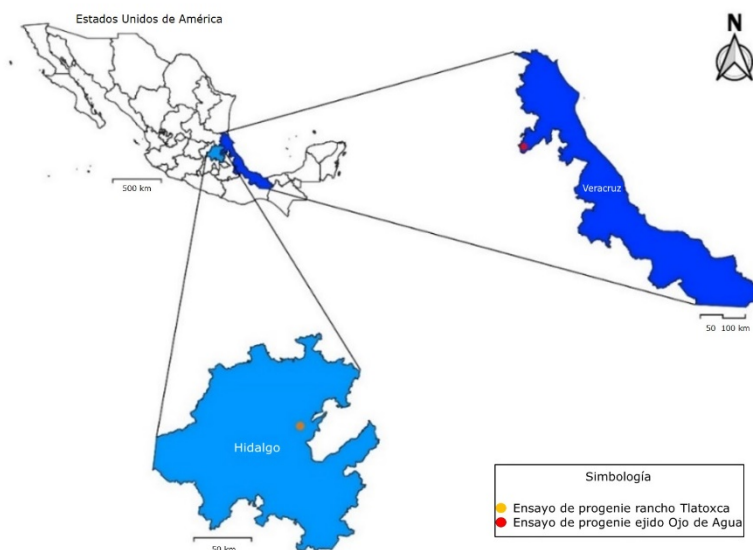
Los ensayos de progenie son plantaciones forestales que tienen la finalidad de evaluar individuos selectos de diversas poblaciones (Flores-Flores et al., 2014; Ipinza-Carmona, 1998), en las cuales es factible describir y analizar la variación natural, y aportan información para examinar la variabilidad (Androsiuk et al., 2011), ya que reúnen familias (progenies) de diferentes procedencias que pueden modificarse por efecto del ambiente o de su genética (Rodríguez-Vásquez et al., 2021; White et al., 2007).

Por lo anterior, la pregunta de investigación planteada fue: ¿Cuál es la respuesta morfo-anatómica de la hoja de *Pinus patula* en dos ensayos de progenie establecidos en sitios diferentes?; con el objetivo de caracterizar y comparar la anatomía de la acícula de árboles de *P. patula* en dos ensayos de progenie establecidos en sitios diferentes de la región centro de su distribución natural.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en dos ensayos conformados por 64 familias de árboles de *P. patula* establecidos en 2019 en el predio particular rancho Tlatoxca, en el municipio Zacualtipán de Ángeles, estado de Hidalgo (20°37'49" N, 98°38'10" O) (Figura 1), con altitud de 1 910 m; clima templado húmedo C(m), precipitación de 1 144 mm y temperatura media anual de 17.1 °C (Fick & Hijmans, 2017). El segundo ensayo se estableció en la propiedad ejidal Ojo de Agua, en el municipio Huayacocotla del estado de Veracruz (20°28'21" N, 98°29'56" O), a 2 310 m de altitud; clima templado subhúmedo C(w₂), precipitación de 1 004 mm y temperatura media anual de 14.7 °C (Fick & Hijmans, 2017) (Figura 1).



Los puntos indican las dos localidades, rancho Tlatoxca (círculo anaranjado), municipio Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo y Ojo de Agua (círculo rojo), municipio Huayacocotla, Veracruz.

Figura 1. Ubicación de dos ensayos de progenies de 64 familias de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. en la zona centro de su distribución.

Diseño de plantación

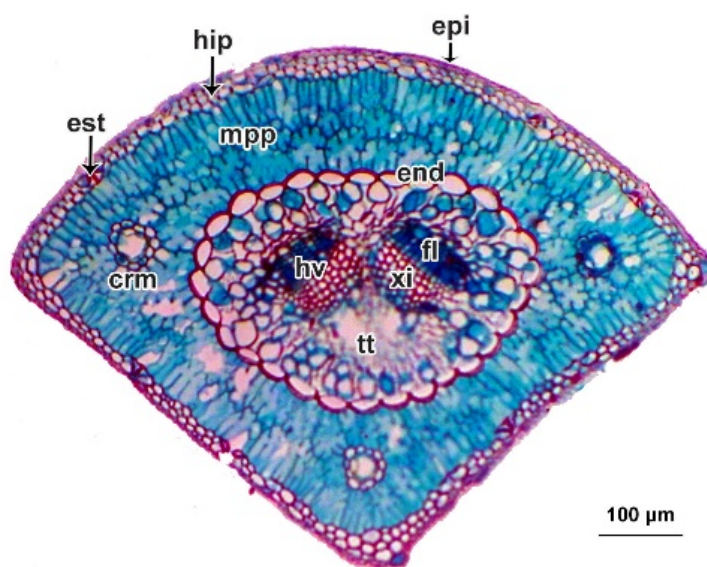
El ensayo de progenies del rancho Tlatoxca se estableció en un terreno utilizado anteriormente como potrero; mientras que, el del ejido Ojo de Agua en un terreno agrícola abandonado, por lo que fue necesario eliminar la vegetación arbustiva y herbácea en ambos sitios mediante el rastreo del suelo. El diseño de plantación fue en marco real; se plantó en cepa común con espaciamiento de 3×3 m entre plantas y en el perímetro se plantó una hilera de árboles como franja de protección.

Recolecta de material vegetal

Se recolectaron diez fascículos al azar de 40 árboles del ejido Ojo de Agua y 24 árboles de rancho Tlatoxca (debido al bajo porcentaje de sobrevivencia de las familias en este sitio). Los fascículos se tomaron de la parte intermedia de la copa, solamente en ramas de primer orden y sin daño aparente. Se depositaron en frascos de 20 mL con FAA (Formaldehído:Ácido acético glacial:Alcohol etílico 50 %, en proporción 5:5:90) para su fijación (por tiempo indefinido).

Conteo de acículas e hileras estomáticas

El número de acículas se contabilizó a partir de diez fascículos por cada árbol y el número de hileras estomáticas se obtuvo mediante impresiones de la cara abaxial (forma convexa) y adaxial (forma triangular) (Figura 2) de diez acículas por árbol seleccionados al azar de los ensayos de progenie.



Simbología: crm = Canal resinífero medio; end = Endodermis; epi = Epidermis; est = Estomas; fl = Floema; hip = Hipodermis; hv = Haz vascular; mpp = Mesófilo de parénquima plicado; tt = Tejido de transfusión; xi = Xilema. Aumento: 10X.

Figura 2. Sección anatómica transversal de la hoja de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Para obtener las impresiones estomáticas, se aplicó una capa de esmalte *Vogue*® en la parte media de las acículas (en las caras abaxial y adaxial). Después se mantuvieron a temperatura ambiente por 10 minutos para su secado. Finalmente, las impresiones se transfirieron con una cinta adhesiva transparente (*Scotch*®) a portaobjetos para su visualización en un microscopio óptico *Iroscope*® WB-3T.

Cortes anatómicos

De las acículas que se utilizaron para obtener las impresiones estomáticas, se seleccionaron cinco por árbol y en la parte media de cada una de ellas, se realizaron cortes transversales a mano alzada, con una navaja *Gillette*® de doble filo. Posteriormente, se montaron sobre portaobjetos y una mezcla de resina sintética *Hyce*® y tolueno ($C_6H_5CH_3$) *Sigma-Aldrich*® (USA) para ser observados a diferentes aumentos sobre un microscopio óptico *Iroscope*® WB-3T para la toma de fotomicrografías.

Descripción y análisis anatómicos

La descripción de los tejidos de la epidermis, hipodermis, endodermis, haces vasculares y análisis de canales de resina, se realizó a partir de fotomicrografías obtenidas con una cámara *Evolution*™ VF (*MediaCybernetics by QImaging*, Canadá) acoplada a un microscopio binocular *Olympus*® BX41-TF (*Olympus Corporation*®, Tokio, Japón). Las fotomicrografías se procesaron en el paquete informático *ImageJ*® versión 1.50i (Ferreira & Rasband, 2012) y *Photoshop*® versión 13.0.121 (Adobe, 2012).

Análisis estadísticos

Las variables cuantitativas: número de acículas por fascículo, número de hileras estomáticas (cara abaxial y adaxial) y número de canales de resina se sometieron a un análisis de varianza, con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$ (Geada-López et al., 2022; Rodríguez-Laguna & Capo-Arteaga, 2005; Zhang et al., 2017) con el siguiente modelo lineal:

$$Y_{ji} = \mu + A_j + e_{ji}$$

Donde:

Y_{ij} = Variable respuesta

μ = Media poblacional

A_j = Efecto aleatorio del j -ésimo árbol ($j=1,2$)

e_{ij} = Error aleatorio

Los análisis estadísticos se realizaron por separado para cada ensayo de progenies mediante el *software Statistical Analysis System* versión 9.00 (SAS Institute, 2022).

Resultados

Número de acículas por fascículo

El análisis de varianza para el número de acículas por fascículo presentó diferencias significativas ($P \leq 0.0001$) entre árboles dentro del ensayo de progenies (Cuadro 1). Los fascículos procedentes del rancho Tlatoxca tuvieron un menor número de acículas, de 3 a 5; mientras que los del ejido Ojo de Agua, entre 3 y 6 (Cuadro 2).

Cuadro 1. Análisis de varianza de las variables cuantitativas de progenies de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Variable	Sitio	CM	Valor de F	Pr>F
NAF	Rancho Tlatoxca	2.79	23.48	<0.0001
	Ejido Ojo de Agua	2.56	14.02	<0.0001
HAB	Rancho Tlatoxca	8.71	13.73	<0.0001
	Ejido Ojo de Agua	4.96	6.81	<0.0001
HAD	Rancho Tlatoxca	9.58	16.41	<0.0001
	Ejido Ojo de Agua	3.45	6.43	<0.0001

NAF = Número de acículas por fascículo; HAB = Hileras estomáticas en la cara abaxial;

HAD = Número de hileras estomáticas en la cara adaxial; CM = Cuadrado medio.

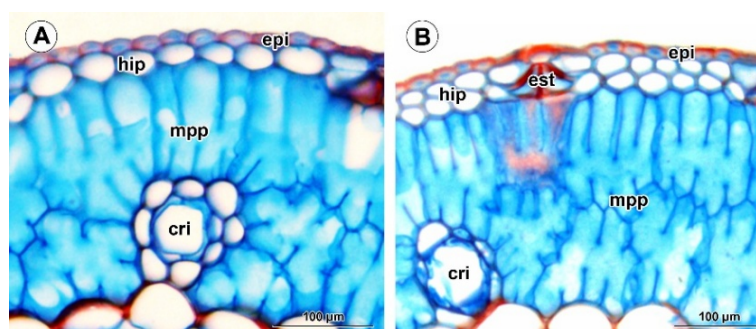
Cuadro 2. Estadística descriptiva de variables cuantitativas de progenies de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Variable	Rancho Tlatoxca			Ejido Ojo de Agua		
	NAF	HAB	HAD	NAF	HAB	HAD
Mínimo	3.00	4.00	3.00	3.00	3.00	2.00
Media	3.51	5.44	4.73	4.13	5.75	4.90
Máximo	5.00	7.00	7.00	6.00	11.00	7.00

NAF = Número de acículas por fascículo; HAB = Hileras estomáticas en la cara abaxial; HAD = Número de hileras estomáticas en la cara adaxial.

Epidermis e hipodermis

Las secciones transversales de las acículas presentaron epidermis monoestratificada con células de forma rectangular y elíptica, de paredes gruesas, lignificadas y altamente esclerificadas (Figura 3). Respecto a la hipodermis, en 67 % (27 árboles) de las muestras del ejido Ojo de Agua fue monoestratificada (Figura 3A) y 33 % (13 árboles) biestratificada (Figura 3B). En contraste con las del rancho Tlatoxca, que 46 % (11 árboles) exhibieron hipodermis monoestratificada y 54 % (13 árboles) biestratificada.



A = Hipodermis mayormente monoestratificada; B = Hipodermis biestratificada.
Simbología: cri = Canal resinífero interno; epi = Epidermis; est = Estomas; hip = Hipodermis; mpp = Mesofilo de parénquima plicado. Aumento: 40X.

Figura 3. Sección anatómica transversal de la hoja de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Número de hileras estomáticas

El número de hileras estomáticas en la cara abaxial y adaxial registraron diferencias significativas ($P \leq 0.0001$). En las acículas de las muestras del rancho Tlatoxca, se observó un promedio de 5.44 (cara abaxial) y 4.73 (cara adaxial) (Cuadro 2); y en las del ejido Ojo de Agua el promedio fue mayor con 5.75 (cara abaxial) y 4.90 (cara adaxial) de hileras estomáticas.

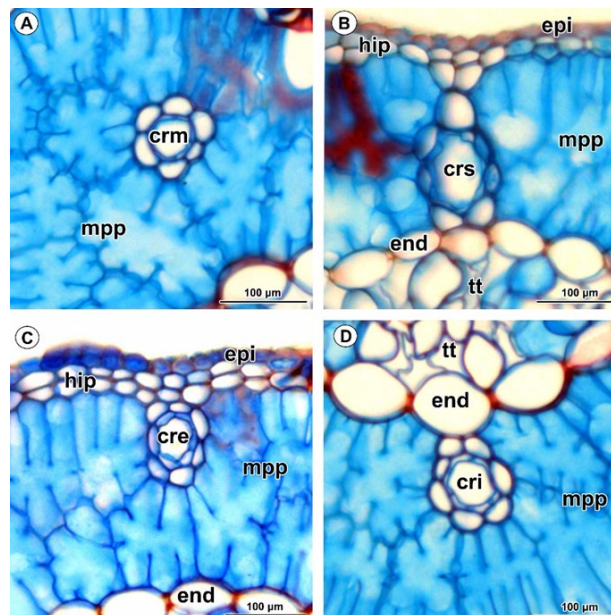
Número y posición de canales de resina

El número de canales de resina registró diferencias significativas ($P \leq 0.0001$) entre los árboles dentro de los ensayos de progenie (Cuadro 3). Las acículas de los árboles del rancho Tlatoxca evidenciaron canales de resina en posiciones media (100 %), interna (100 %), raramente septal (16.6 %) y externa (8.3 %) (Figura 4); con un número de (2-)3(-6) y promedio de 3.48. Las muestras del ensayo de progenies del ejido Ojo de Agua, exhibieron menor variación en cuanto a la posición, la cual fue únicamente media (100 %) e interna (100 %); con número de canales resiníferos (0-)3(-4), y promedio de 2.64 (Cuadro 4). En esta investigación se registran por primera vez canales de resina en posición externa y septal (sin ser frecuentes) en hojas de *P. patula*.

Cuadro 3. Resultado del análisis de varianza del número de canales de resina de progenies de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Sitio	CM	Valor de F	Pr>F
Rancho Tlatoxca	3.05 0.43	7.06	<0.0001
Ejido Ojo de Agua	1.85 0.48	3.85	<0.0001

CM = Cuadrado medio.



A = Canal resinífero medio; B = Canal resinífero septal; C = Canal resinífero externo; D = Canal resinífero interno. Simbología: cre = Canal resinífero externo; cri = Canal resinífero interno; crm = Canal resinífero medio; crs = Canal resinífero septal; end = Endodermis; epi = Epidermis; hip = Hipodermis; mpp = Mesofilo de parénquima plicado; tt = Tejido de transfusión. Aumento: 40X.

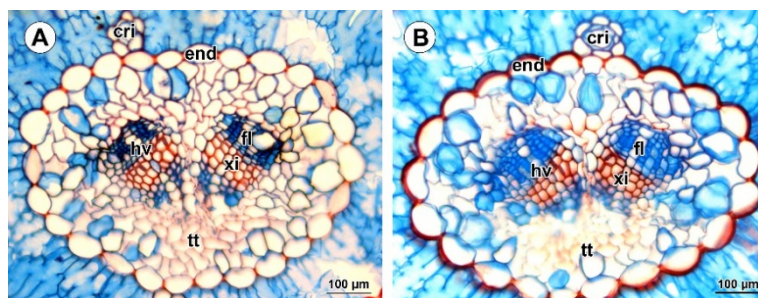
Figura 4. Sección transversal de los canales resiníferos de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Cuadro 4. Estadística descriptiva del número de canales de resina de progenies de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Variable/ Estadística	Número de canales de resina	
	Rancho Tlatoxca	Ejido Ojo de Agua
Mínimo	2.00	0.00
Media	3.48	2.64
Máximo	6.00	4.00

Endodermis

El engrosamiento de la endodermis estuvo ausente en algunas muestras (Figura 5A), pero se observaron en ambos ensayos de progenie (Figura 5B); en el ensayo del rancho Tlatoxca, 67 % de las acículas presentaron engrosamiento, mientras que en el ensayo de progenie del ejido Ojo de Agua fue de 55 %.



A = Ligero engrosamiento en las paredes periclinales externas de la endodermis;

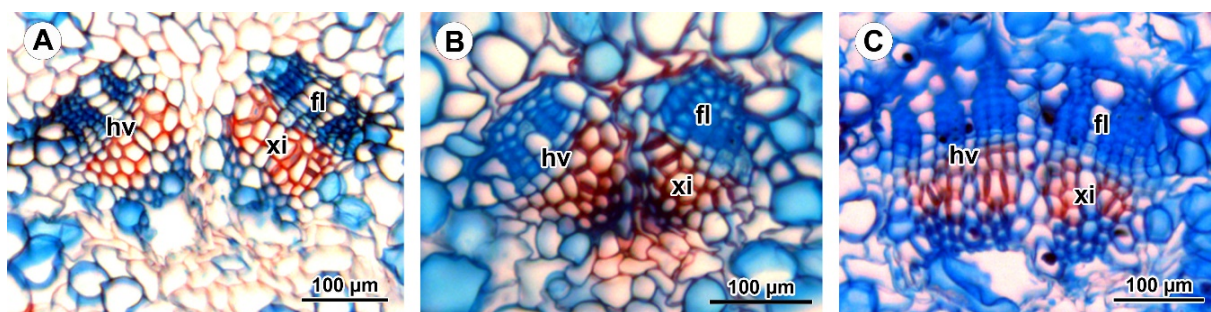
B = Engrosamiento en las paredes periclinales externas de la endodermis.

Simbología: cri = Canal resinífero interno; end = Endodermis; fl = Floema; hv = Haz vascular; tt = Tejido de transfusión; xi = Xilema. Aumento: 40X.

Figura 5. Sección anatómica transversal de la hoja de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Haces vasculares

Las acículas del ensayo en el rancho Tlatoxca mostraron haces vasculares separados (21 %; Figura 6A), próximos por medio del xilema (67 %; Figura 6B) y fusionados (12 %; Figura 6C); en el material del ejido Ojo de Agua solo se observaron haces vasculares próximos por medio del xilema (63 %) y separados (37 %).



A = Haces vasculares separados; B = Haces vasculares próximos o fusionados por medio del xilema; C = Haces vasculares fusionados. Simbología: fl = Floema; hv = Haz vascular; xi = Xilema. Aumento: 40X.

Figura 6. Sección transversal de las acículas de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., haces vasculares.

Discusión

Número de acículas por fascículo

Los fascículos de *P. patula* se constituyeron de 3-4 y 4-5 acículas en los ensayos de progenies, lo cual corresponde con los estudios realizados por Perry (1991) y Farjon y Styles (1997) quienes documentaron fascículos constituidos por 3-4(-5) acículas para la especie. De acuerdo con Iglesias-Andreu y Tivo-Fernández (2006) este carácter (número de acículas) presenta un control genético alto; sin embargo, es afectado por factores ambientales. Por otra parte, Rodríguez-Laguna y Capo-Arteaga (2005) obtuvieron una correlación positiva (0.785) entre la altitud y el número de acículas por fascículo, lo cual corresponde con lo registrado en este estudio, ya que los árboles del ensayo del rancho Tlatoxca con altitud de 1 910 msnm tuvieron 3-4, mientras que los del ejido Ojo de Agua, con altitud de 2 310 msnm presentaron mayor número de acículas por fascículo (4-5).

Epidermis

De acuerdo con Farjon y Styles (1997), la forma de las células de la epidermis varía entre especies, pueden ser de forma cuadrada, rectangular (trasversalmente oblongas) y elíptica. Para *P. patula*, la epidermis se conformó por células de forma rectangular y elíptica. Para Bozkurt et al. (2023), la epidermis es un carácter anatómico que varía respecto a la forma y dimensión de las células que la conforman debido a factores ambientales como temperatura y precipitación; y Hengxiao et al. (1999) indican que la altitud tiene efectos sobre el espesor de la epidermis.

Número de hileras estomáticas

De acuerdo con Toral et al. (2010), las estomas son sensibles al cambio de condiciones ambientales; Donnelly et al. (2016) señalan que su variación (intraespecífica) está influenciada por factores genéticos y para Pérez-Del Valle et al. (2019), en el género *Pinus*, por factores abióticos del sitio de procedencia de las plantas. Por otra parte, Tiwari et al. (2013) consignan que el número de hileras estomáticas tiene un papel importante en la adaptación de las plantas a la altitud, variable con la cual está correlacionada ($r=0.9815$). En cuanto al número de hileras estomáticas, las diferencias registradas en este estudio podrían deberse a las condiciones ambientales (altitud) y constitución genética del origen de las progenies (poblaciones naturales) que al interactuar en un sitio homogéneo, como el lugar de plantación, es posible que cada progenie se exprese de manera diferente.

Hipodermis

De acuerdo con Farjon y Styles (1997) y Martínez (1992), las hojas de *P. patula* presentan hipodermis monoestratificada, usualmente dos (biestratificada) o tres (triestratificada) hileras de células distribuidas de forma desigual. Dichos resultados fueron similares a los obtenidos en el presente estudio; sin embargo, el número de hileras de células fue diferente entre los ensayos de progenies, debido a que la mayoría de los árboles del rancho Tlatoxca exhibieron hipodermis biestratificada. Nikolić et al. (2016) y Grill et al. (2004) citan que la hipodermis varía entre individuos de la misma especie y aumenta en número e hileras de células cuando las plantas son afectadas por sequía, como se ha documentado en poblaciones naturales de *Pinus tropicalis* Morelet, cuyo número de estratos de células que conforman a la hipodermis aumentó en sitios más secos (Pérez-Del Valle et al., 2019; Geada-López et al., 2022).

Posición de canales de resina

Los canales de resina son estructuras especialmente desarrolladas por coníferas y están relacionadas con la protección contra patógenos (Pérez-Olvera & Ceja-Romero, 2019). Se encuentran suspendidos en el mesofilo y pueden variar en cuanto a su posición (externa, interna, media y septal) (Kim et al., 2014). Por otra parte, Tiwari et al. (2013) refieren que la posición de los canales resiníferos es una característica anatómica foliar genéticamente controlada en especies de coníferas. Para *P. patula*, los canales de resina se localizan en posición frecuentemente media, e interna (Farjon y Styles, 1997). Lo anterior coincide con los resultados en Ojo de Agua, pero difieren de los registrados en el rancho Tlatoxca donde se hallaron canales de resina en posición media e interna y raramente externa y septal. Lo anterior sugiere que las posiciones predominantes o primarias de los canales resiníferos en la especie son medias e internas, lo cual concuerda con lo citado por Farjon y Styles (1997), quienes además refieren que la posición de los canales resiníferos es variable entre especies; por lo que, se usan como un carácter diagnóstico y de clasificación taxonómica en el género *Pinus*. Para esta condición, se infiere un mayor control genético más que ambiental.

Número de canales de resina

En las especies del género *Pinus*, los canales son estructuras especializadas en sintetizar, secretar y almacenar resina (Yi et al., 2021). Varían en número dentro del mesofilo (Pérez-Olvera & Ceja-Romero, 2019) y de acuerdo con Farjon y Styles (1997) para *P. patula* son de (1-)2-3(-4); lo cual está dentro del intervalo documentado en este estudio, aunque el intervalo de variación es mayor (0-6). Por otra parte, Geada-López et al. (2021) indican que factores ambientales como baja

disponibilidad de agua y temperaturas altas provocan aumento en el número de canales de resina dentro del mesofilo, y Donnelly et al. (2016) observaron en acículas de *Pinus sylvestris* L. que la densidad (número de canales de resina) se incrementa en sitios con menor humedad. Por lo anterior, se deduce que la mayor temperatura del sitio de la plantación del ensayo de progenies del rancho Tlatoxca (17.1 °C) y la pendiente del terreno (25 %) dificulta la retención de agua en el suelo. Esto genera una menor disponibilidad de agua en el suelo, lo cual pudo provocar un aumento en el número de canales de resina. En contraste, los árboles establecidos en Ojo de Agua, se encuentran en un sitio con temperatura media anual de 14.7 °C y una pendiente del terreno de 3 %, lo cual favorece la retención de agua en el suelo y en consecuencia un menor número de canales resiníferos.

Endodermis

De acuerdo con Roden et al. (2009), la posible función de la endodermis es actuar como una barrera para regular o contener el paso de agua (evitar la pérdida) hacia el mesofilo y evitar la deshidratación de las plantas en temporadas críticas (bajas temperaturas y sequías) además de prevenir la formación de hielo en la hoja. Por otra parte, García-Esteban et al. (2010) mencionan que la endodermis es afectada por la procedencia de las progenies, condiciones ambientales y de suelo de cada sitio de procedencia. En *P. patula* se observó que algunas progenies desarrollaron engrosamiento en las paredes periclinales externas, posiblemente porque proceden de poblaciones con clima (temperatura, precipitación y humedad), suelo y exposición diferente, a lo largo del corredor biológico de distribución de la especie.

Haces vasculares

En ambos ensayos de progenies de *P. patula*, las secciones transversales de las acículas mostraron dos haces vasculares (con floema y xilema) inmersos en el tejido de transfusión en las siguientes condiciones: separados, próximos por medio del xilema (conados) y fusionados. De acuerdo con Martínez (1992), los pinos duros (sección *diploxylon*) como *P. patula* presentan dos haces vasculares; Farjon y Styles (1997) citan que pueden ser conados (próximos por medio del xilema) y Espinoza-Pelcastre et al. (2018) señalan que en algunas ocasiones se observan separados. En este estudio se registró de manera consistente el esclerénquima ausente en la región del tejido de transfusión en todas las muestras analizadas, a diferencia de otras especies en las cuales es frecuente la existencia de hileras de células esclerenquimáticas que rodean de manera intermitente y usualmente dividen los haces vasculares (Farjon & Styles, 1997).

Conclusiones

Se considera que los rasgos característicos de la anatomía de *P. patula* en los ensayos de progenie estudiados son: epidermis monoestratificada conformada de células elípticas; hipodermis mayormente monoestratificada, pero comúnmente biestratificada; canales de resina en posición predominantemente media, seguida de interna y excepcionalmente externa y septal. Engrosamiento de las paredes externas de la endodermis tanto presente como ausente y haces vasculares frecuentemente próximos por medio del xilema, con ausencia de esclerénquima en el tejido de transfusión.

Las condiciones ambientales de cada sitio de plantación promovieron modificaciones en las acículas en cuanto al número de hileras estomáticas, número de estratos de células de la hipodermis, número y posición de canales resiníferos y haces vasculares. El sitio de plantación establecido en rancho Tlatoxca, registra mayor temperatura, pendiente del terreno del (25 %) y menor altitud, factores que resultan en un mayor intervalo de variación de los rasgos morfo-anatómicos foliares de *P. patula*.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación por la beca económica otorgada al primer autor (CVU: 1147341), la cual permitió realizar el trabajo de investigación. Al Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal Conacyt-Conafor por el financiamiento otorgado para la ejecución del proyecto con clave 291322: Establecimiento de huertos semilleros asexuales regionales y ensayos de progenies de *Pinus patula* para la valoración genética de los progenitores; del cual se originó este trabajo de investigación. Al Instituto de Ciencias Agropecuarias, Ciudad Universitaria Tulancingo de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) por brindar el espacio y equipo para la ejecución del trabajo de investigación.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Tomás Escobedo Luna y Sergio Hernández León: trabajo de investigación, preparaciones permanentes en laboratorio; Tomás Escobedo Luna, Diana Gómez García y Rodrigo Rodríguez Laguna: recolecta y clasificación del material vegetal (fascículos) de los ensayos de progenies; Oscar Arce Cervantes: análisis de datos. Todo el equipo revisó y corrigió el manuscrito.

Referencias

- Adobe. (2012). *Adobe Photoshop (CS6)* (version 13.0.121) [Software]. Adobe Inc. <https://www.adobe.com/mx/products/photoshop.html>
- Androsiuk, P., Kaczmarek, Z., & Urbaniak, L. (2011). The morphological traits of needles as markers of geographical differentiation in European *Pinus sylvestris* populations. *Dendrobiology*, (65), 3-16. https://www.idpan.poznan.pl/images/stories/dendrobiology/vol65/65_03_16.pdf
- Azcárraga-Rosette, M. del R., Jácquez-Ríos, M. P., Bonfil-Campos, A., & Sandoval-Zapotitla, E. (2022). *Atlas de Anatomía Vegetal*. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. https://books.google.com.mx/books/about/Atlas_de_anatom%C3%ADa_vegetal.html?id=hRt_EAAQBAJ&redir_esc=y
- Bozkurt, A. E., Coşkunçelebi, K., & Terzioğlu, S. (2023). Variation in needle anatomy of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) populations according to habitat and altitudinal zones in Türkiye. *Šumarski list*, 147(5-6), 215-225. <https://doi.org/10.31298/sl.147.5-6.2>
- Chávez-García, A. S., Hernández-Ramos, J., Muñoz-Flores, H. J., García-Magaña, J. J., Gómez-Cárdenas, M., & Gutiérrez-Contreras, M. (2022). Plasticidad fenotípica de progenies de árboles de *Pinus pseudostrobus* Lindl. superiores en producción de resina en vivero. *Madera y Bosques*, 28(1), Artículo e2812381. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812381>

- Donnelly, K., Cavers, S., Cottrell, J. E., & Ennos, R. A. (2016). Genetic variation for needle traits in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Tree Genetics & Genomes*, 12, Article 40. <https://doi.org/10.1007/s11295-016-1000-4>
- Dvorak, W. S., Hodge, G. R., Kietzka, J. E., Malan, F., Osorio, L. F., Stanger, T. K., & Brawner, J. T. (2000). *Pinus patula*. In Central America and Mexico Coniferous Resources Cooperative (Ed.), *Conservation & testing of tropical & subtropical forest tree species* (pp. 148-173). Grow Graphics. <https://research.usc.edu.au/esploro/outputs/99450692102621>
- Espinoza-Pelcastre, C., Hernández-León, S., Gernandt, D. S., Arce-Cervantes, O., Rodríguez-Laguna, R., & González-Ávalos, J. (2018). Clave de identificación taxonómica con caracteres anatómicos foliares para especies de *Pinus* L. en Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 28-49. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.167>
- Farjon, A., & Styles, B. T. (1997). *Pinus* (Pinaceae) (Vol. 75, Flora Neotropica Monographs]. Organization for Flora Neotropica, New York Botanical Garden. https://books.google.com.mx/books/about/Pinus_Pinaceae.html?id=4_csAQAAMAAJ&redir_esc=y
- Fernández, A. M., & Salvo, L. (2003). Variación del área de pared celular en *Pinus radiata* D. Don. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 5(1), 80-87. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2003000100007>
- Ferreira, T., & Rasband, W. (2012). *ImageJ User Guide IJ 1.46r*. U. S. National Institutes of Health. <https://imagej.net/ij/docs/guide/user-guide.pdf>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Flores-Flores, C., López-Upton, J., & Valencia-Manzo, S. (2014). *Manual técnico para el establecimiento de ensayos de procedencias y progenies*. Comisión Nacional Forestal. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/19/0Manual%20Te%CC%81cnico%20para%20el%20Establecimiento%20de%20Ensayos.pdf>

- García-Esteban, L., Martín, J. A., de Palacios, P., García-Fernández, F., & López, R. (2010). Adaptive anatomy of *Pinus halepensis* trees from different Mediterranean environments in Spain. *Trees*, 24(1), 19-30. <https://doi.org/10.1007/s00468-009-0375-3>
- Geada-López, G., Sotolongo-Sospedra, R., & Pérez-Del Valle, L. (2022). Variación anatómica foliar en poblaciones naturales de *Pinus tropicalis* en Pinar del Río, Cuba. *Revista del Jardín Botánico Nacional*, 43, 155-170. <https://revistas.uh.cu/rjbn/article/view/211?articlesBySimilarityPage=1>
- Geada-López, G., Sotolongo-Sospedra, R., Pérez-Del Valle, L., & Ramírez-Hernández, R. (2021). Diferenciación anatómica foliar en poblaciones naturales de *Pinus caribaea* var. *caribaea* (Pinaceae) en Pinar del Río y Artemisa, Cuba. *Revista del Jardín Botánico Nacional*, 42, 175-188. <https://www.jstor.org/stable/48672484>
- Ghimire, B., Kim, M., Lee, J.-H., & Heo, K. (2014). Leaf anatomy of *Pinus thunbergii* Parl. (Pinaceae) collected from different regions of Korea. *Korean Journal of Plant Taxonomy*, 44(2), 91-99. <https://doi.org/10.11110/kjpt.2014.44.2.91>
- Gianoli, E. (2004). Plasticidad fenotípica adaptativa en plantas. En H. Marino-Cabrera (Ed.), *Fisiología ecológica en plantas. Mecanismos y respuestas a estrés en los ecosistemas* (pp. 13-25). Ediciones Universitarias de Valparaíso. <http://www2.udec.cl/~egianoli/04gianolifisioeco.pdf>
- Grill, D., Tausz, M., Pöllinger, U. T. E., Jiménez, M. S., & Morales, D. (2004). Effects of drought on needle anatomy of *Pinus canariensis*. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 199(2), 85-89. <https://doi.org/10.1078/0367-2530-00137>
- Hengxiao, G., McMillin, J. D., Wagner, M. R., Zhou, J., Zhou, Z., & Xu, X. (1999). Altitudinal variation in foliar chemistry and anatomy of yunnan pine, *Pinus yunnanensis*, and pine sawfly (Hym., Diprionidae) performance. *Journal of Applied Entomology*, 123(8), 465-471. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0418.1999.00395.x>
- Iglesias-Andreu, L. G., & Tivo-Fernández, Y. (2006). Caracterización morfométrica de la población de *Pinus hartwegii* Lindl. del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Ra Ximhai*, 2(2), 449-468. <https://www.redalyc.org/pdf/461/46120208.pdf>
- Ipinza-Carmona, R. H. (1998). *Mejoramiento Genético Forestal* [Serie técnica/Núm. 42]. Corporación Nacional de Investigación y Fomento. <https://www.researchgate.net/profile/Roberto->

Ipinza/publication/256852551_Mejoramiento_Genetico_Forestal/links/57d6c3e608ae5f03b494d54a/Mejoramiento-Genetico-Forestal.pdf

Kim, M. Y., Lee, J. H., & Heo, K. (2014). Leaf anatomy of *Pinus thunbergii* Parl. (Pinaceae) collected from different regions of Korea. *Korean Journal of Plant Taxonomy*, 44(2), 91-99. <https://doi.org/10.11110/kjpt.2014.44.2.91>

Martínez, M. (1992). *Los pinos mexicanos* (3ra ed.). Ediciones Botas. https://books.google.com.mx/books/about/Los_pinos_mexicanos.html?id=c-osAQAAMAAJ&redir_esc=y

Nikolić, B., Bojović, S., & Marin, P. D. (2016). Morpho-anatomical traits of *Pinus peuce* needles from natural populations in Montenegro and Serbia. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 150(5), 1038-1045. <https://doi.org/10.1080/11263504.2014.1000999>

Pérez-Del Valle, L., Geada-López, G., & Sotolongo-Sospedra, R. (2019). Diferencias anatómicas en acículas de *Pinus tropicalis* Morelet en edátomos extremos de pizarras y arenas blancas en Pinar del Río. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 7(2), 225-239. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2310-34692019000200225

Pérez-Luna, A., López-Upton, J., Prieto-Ruiz, J. Á., Rodríguez-Laguna, R., & Barrera-Ramírez, R. (2024). Supervivencia, fenología vegetativa y floración de rametos de un huerto semillero asexual de *Pinus patula*. *Bosque*, 45(1), 151-161. <http://dx.doi.org/10.4067/s0717-92002024000100151>

Pérez-Olvera, C. de la P., & Ceja-Romero, J. (2019). Anatomía de la hoja de seis especies de *Pinus* del estado de Durango, México. *Madera y Bosques*, 25(1), Artículo e2511698. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511698>

Perry, J. P. (1991). *The pines of Mexico and Central America*. Timber Press, inc. https://books.google.com.mx/books/about/The_Pines_of_Mexico_and_Central_America.html?id=u8BgAAAAMAAJ

Roden, J. S., Canny, M. J., Huang, C. X., & Ball, M. C. (2009). Frost tolerance and ice formation in *Pinus radiata* needles: ice management by the endodermis and transfusion tissues. *Functional Plant Biology*, 36(2), 180-189. <https://doi.org/10.1071/FP08247>

- Rodríguez-Laguna, R., & Capo-Arteaga, M. A. (2005). Morfología de acículas y conos en poblaciones naturales de *Pinus arizonica* Engelm. *Ra Ximhai*, 1(1), 131-152. <https://www.redalyc.org/pdf/461/46110109.pdf>
- Rodríguez-Vásquez, M. E., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-Del Valle, J. R., Campos-Ángeles, G. V., Velasco-Velasco, V. A., & Hernández-Hernández, A. (2021). Ensayos de progenies y huertos semilleros de especies forestales en México. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 8(1), 79-88. <https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/article/view/273>
- Salaya-Domínguez, J. M., López-Upton, J., & Vargas-Hernández, J. J., (2012). Variación genética y ambiental en dos ensayos de progenies de *Pinus patula*. *Agrociencia*, 46(5), 519-534. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/973/973>
- SAS Institute. (2022). SAS (Version 9.00) [Software]. The SAS Institute Inc. https://www.sas.com/es_mx/learn/academic-programs/software.html
- Sotolongo-Sospedra, R., Geada-López, G., Pérez-Del Valle, L., & Armas-Crespo, N. M. (2022). Effect of the position of the needles in the crown of the tree on the foliar anatomy of *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barrett and Golfari. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 11(1), Artículo e787. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2310-34692023000100007&script=sci_arttext
- Tiwari, S. P., Kumar, P., Yadav, D., & Chauhan, D. K. (2013). Comparative morphological, epidermal, and anatomical studies of *Pinus roxburghii* needles at different altitudes in the North-West Indian Himalayas. *Turkish Journal of Botany*, 37(1), 65-73. <https://doi.org/10.3906/bot-1110-1>
- Toral, M., Manríquez, A., Navarro-Cerrillo, R., Tersí, D., & Naulin, P. (2010). Stomata characteristics, stomatal density and stomatic index in redwood (*Sequoia sempervirens*) and its variation in different plantations in Chile. *Bosque*, 31(2), 157-164. <https://revistabosque.org/index.php/bosque/article/view/803>
- White, T. L., Adams, W. T., & Neale, D. B. (Eds.). (2007). *Forest genetics*. Centre for Agriculture and Bioscience International. <https://doi.org/10.1079/9781845932855.0000>
- Yi, M., Jia, T., Dong, L., Zhang, L., Leng, C., Liu, S., & Lai, M. (2021). Resin yield in *Pinus elliottii* Engelm. is related to the resin flow rate, resin components and

resin duct characteristics at three locations in southern China. *Industrial Crops and Products*, 160, Article 113141.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092666902031058X>

Zhang, M., Meng, J.-X., Zhang, Z.-J., Zhu, S.-L., & Li, Y. (2017). Genetic analysis of needle morphological and anatomical traits among nature populations of *Pinus tabuliformis*. *Journal of Plant Studies*, 6(1), 62-75.

<https://www.ccsenet.org/journal/index.php/jps/article/view/64939>



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