



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
AGRÍCOLA Y FORESTAL SUSTENTABLE**

TESIS DE MAESTRÍA

**EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFO-ANATÓMICAS DE
DOS ENSAYOS DE PROGENIE DE *Pinus patula* Schiede ex Schltdl et Cham.**

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

PRESENTA

Ing. Tomás Escobedo Luna

Director

Dr. Sergio Hernández León

Codirector

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Tulancingo de Bravo, Hgo., México., noviembre de 2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
AGRÍCOLA Y FORESTAL SUSTENTABLE**

TESIS DE MAESTRÍA

**EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFO-ANATÓMICAS DE
DOS ENSAYOS DE PROGENIE DE *Pinus patula* Schiede ex Schltdl et Cham.**

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

PRESENTA

Ing. Tomás Escobedo Luna

Director

Dr. Sergio Hernández León

Codirector

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Asesores

Dr. Ramón Razo Zárate

Dr. Abraham Palacios Romero

Tulancingo de Bravo, Hgo., México., noviembre de 2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Agropecuarias

School of Forestry and Environmental Studies

Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Master's in Sciences and Technology of Agriculture and Forestry

ICAP-MCTAFS/005/2023

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

PRESENTE

Por este conducto se le comunica que el Comité Revisor asignado al alumno **Tomás Escobedo Luna**, de la Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable, con número de cuenta **246615**, que presenta el manuscrito de tesis titulado "**EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFO-ANATÓMICAS DE DOS ENSAYOS DE PROGENIE DE *Pinus patula* Schiede ex Schldl et Cham.**", ha autorizado la impresión del mismo.

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

ATENTAMENTE

"Amor, Orden y Progreso"

Tulancingo de Bravo, Hgo. a 28 de noviembre de 2023

Dr. Sergio Hernández León
Coordinador de la Maestría en
Ciencias y Tecnología Agrícola y
Forestal Sustentable



Dr. Armando Peláez Acero
Director del ICAP



COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DEL ICAP

Actas de la reunión del Comité de Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Apertura:

La reunión ordinaria para evaluar los avances de la tesis intitulada: "EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFO-ANATÓMICAS DE DOS ENSAYOS DE PROGENIE DE *Pinus patula* Schiede ex Schldl et Cham.", que desarrolla el estudiante Ing. Tomás Escobedo Luna

Asistentes:

Dr. Sergio Hernández León

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Dr. Ramón Razo Zárate

Dr. Abraham Palacios Romero

A. Revisión de Trabajo de Tesis

Observaciones:

El comité revisó con antelación el trabajo de tesis en extenso propuesto por el estudiante, comunicando al estudiante Ing. Tomás Escobedo Luna, realizó oportunamente las correcciones, adiciones y/o modificaciones que debería considerar para mejorar su trabajo y poder continuar con el proceso de obtención de grado. El estudiante atendió de forma conveniente las sugerencias del comité.

B. Acuerdos

En esta fecha, se comunica atentamente que el comité conformado por los profesores firmantes, otorgamos nuestra autorización para que el estudiante imprima su trabajo final de tesis, y continúe con los trámites necesarios para la obtención del grado de maestría respectivo.

ATENTAMENTE
"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"
Tulancingo de Bravo, Hidalgo a 22 de noviembre del 2023

Dr. Sergio Hernández León

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Dr. Ramón Razo Zárate

Dr. Abraham Palacios Romero

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por abrir el espacio para realizar mis estudios de Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable; y académicos que fortalecieron mi formación para lograr obtener el grado.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por financiar mis estudios de posgrado y permitir finalizar mi maestría.

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 progenie de *Pinus patula* para la valoración genética de los progenitores; del cual se originó este proyecto de investigación.

Al Dr. Sergio Hernández León por asumir la dirección de este proyecto de investigación, el compromiso y tiempo destinado. Por la orientación y apoyo en todo momento, que me permitieron culminar en tiempo y forma este proyecto de maestría.

Al Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna por aceptar y asumir la codirección del presente proyecto. Por el esfuerzo, dedicación y apoyo. Así como las experiencias y contribuciones tan valiosas para la conclusión de este trabajo.

A los doctores Ramón Razo Zárate y Abraham Palacios Romero por formar parte del comité tutorial. Por sus comentarios y retroalimentación para el proyecto de investigación.

RESUMEN GENERAL

Las evaluaciones en especies del género *Pinus* a edades tempranas, a través de ensayos de progenie, tienen como propósito estimar el valor genético de individuos superiores de donde se recolecta semilla y comparar el desempeño de su descendencia en campo. Los objetivos de este estudio fueron describir y evaluar las características morfológicas y anatómicas foliares de árboles de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. de dos ensayos de progenie establecidos en la región centro de su distribución natural, así como determinar la progenie que cubre mayor superficie de suelo en la fecha de medición. Se realizaron dos estudios: 1) Análisis morfológicos (largo y ancho de acícula, largo y ancho de vaina, número de hileras estomáticas en la cara abaxial y adaxial) y anatómicos (número y posición de canales de resina) de las acículas de árboles de *P. patula* en dos ensayos de progenie. 2) Evaluación de características morfológicas (altura, diámetro y características de copa) de árboles de *P. patula* en un ensayo de progenie establecido en Huayacocotla, Veracruz. El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$) en todas las variables morfológicas foliares y de los árboles de los ensayos de progenie. En los análisis descriptivos, se observó epidermis uniestratificada con células altamente esclerificadas, en ambos ensayos. La hipodermis mostró diferencias entre sitios, en el número de capas de células que la conforman. El mayor número promedio de canales de resina (3.48) se presentó en rancho Tlatoxca mientras que en Ojo de Agua el menor (2.64). En las evaluaciones morfológicas, el resultado del análisis de varianza mostró diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$) entre familias en todas las variables y periodos de evaluación. En altura, los árboles del ensayo, incrementaron el 54.5% y en diámetro 112.7% del otoño 2021 al verano 2022. Se concluye que existe variación en características morfológicas y de acículas de los árboles de los ensayos de progenie, que pudieran estar relacionadas con las condiciones ambientales de los sitios donde fueron establecidos.

Palabras clave

Acículas, anatomía foliar, canales de resina, histología vegetal, interacción, morfología, pinaceae, proyección de copa, variación fenotípica.

ABSTRACT

Pinus species evaluations at early ages, through progeny trials, have the purpose of estimating the genetic value of superior individuals from which seeds are collected to compare the performance of their offspring in the field. The objectives of this study were to describe and evaluate the leaf morphological and anatomical characteristics of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl et Cham. trees from two progeny trials established in the central region of its natural distributional range, as well as determining the progeny that covers the largest soil surface. Two studies were carried out: 1) Morphological analysis (length and width of needle, length and width of sheath, number of stomatal rows on the abaxial and adaxial side) and anatomical analysis (number and position of resin canals) of the needles of trees in two progeny trials. 2) Morphological characteristics evaluation (height, diameter and crown characteristics) of trees from a progeny trial established in Huayacocotla, Veracruz. The variance analysis showed significant statistical differences ($P \leq 0.0001$) in all leaf and tree morphological variables between progeny trials. In the descriptive analyses, unstratified epidermis with highly sclerified cells was observed in both trials. Hypodermis showed differences between sites in the number of cell layers. The highest average number of resin canals (3.48) occurred at rancho Tlatoxca while the lowest at Ojo de Agua (2.64). Morphological Analysis of variance resulted in significant statistical differences ($P \leq 0.0001$) between families in all variables and evaluation periods. Tree height increased 54.5% and 112.7% in diameter from autumn 2021 to summer 2022. Morphological and anatomical variation could be attributed to site environmental conditions where progeny trials were established.

Key words

Crown projection, environment, interaction, leaf anatomy, morphology, needles, phenotypic variation, pinaceae, plant histology, resin canals.

ÍNDICE

RESUMEN GENERAL.....	i
ABSTRACT.....	ii
Capítulo I.....	1
1.1 Introducción general.....	1
1.2 Marco teórico.....	4
1.2.1 Taxonomía de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltl et Cham.....	4
1.2.2 Variedades.....	4
1.2.3 Descripción botánica de la especie.....	4
1.2.4 Distribución natural.....	5
1.2.5 Ensayos de progenie.....	5
1.2.6 Variación fenotípica.....	5
1.2.7 Plasticidad fenotípica.....	6
1.2.8 Antecedentes de la morfología y anatomía de acículas.....	6
1.2.9 Antecedentes de morfología y cobertura de suelo.....	7
1.3 Objetivo general.....	8
1.4 Objetivos específicos.....	8
1.5 Hipótesis.....	8
1.6 Justificación.....	9
1.7 Literatura citada.....	10
Capítulo II.....	15
Variación morfo-anatómica de las acículas de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltl et Cham. en dos ensayos de progenie establecidos en la región centro de su distribución.....	15
Resumen.....	15
Abstract.....	16
2.1 Introducción.....	17
2.2 Marco teórico.....	18

2.2.2 Estructuras de la hoja secundaria de <i>Pinus patula</i>	18
2.2.3 Partes anatómicas de la hoja secundaria de <i>Pinus patula</i>	21
2.2.4 Histología vegetal.....	24
2.3 Objetivo general.....	25
2.4 Hipótesis.....	25
2.5 Materiales y métodos.....	26
2.6 Resultados y discusión.....	31
2.7 Conclusiones.....	43
2.8 Literatura citada.....	44
Capítulo III.....	48
Características morfológicas de la copa de árboles de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schldl et Cham. en un ensayo de progenie para protección al suelo.....	48
Resumen.....	48
Abstract.....	49
3.1 Introducción.....	50
3.2 Objetivo general.....	51
3.3 Hipótesis.....	51
3.4 Materiales y métodos.....	52
3.5 Resultados.....	56
3.6 Discusión.....	68
3.7 Conclusiones.....	70
3.8 Literatura citada.....	71

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ubicación geográfica y características del sitio de dos ensayos de progenie de <i>P. patula</i> en la región centro de su distribución.....	26
Cuadro 2. Características ambientales de dos ensayos de progenie de <i>P. patula</i> en la región centro de su distribución.....	26
Cuadro 3. Significancia de variables morfológicas de acículas de los árboles de dos ensayos de progenie de <i>P. patula</i> a los 2 años de edad.....	35
Cuadro 4. Estadística descriptiva en variables morfológicas de acículas de los árboles de <i>P. patula</i> de 2 años de edad del ensayo de progenie del predio particular rancho Tlatoxca.....	36
Cuadro 5. Estadística descriptiva en variables morfológicas de acículas de los árboles de <i>P. patula</i> de 2 años de edad del ensayo de progenie del ejido Ojo de Agua.....	36
Cuadro 6. Significancia de la variable número de canales de resina de los árboles de dos ensayos de progenie de <i>P. patula</i> a los 2 años de edad.....	39
Cuadro 7. Estadística descriptiva de los ensayos de progenie de árboles de <i>P. patula</i> del predio particular rancho Tlatoxca y ejido Ojo de Agua.....	39
Cuadro 8. Procedencia y número de árboles superiores de donde se recolectó germoplasma (progenies) para el establecimiento del ensayo de progenie.....	53
Cuadro 9. Significancia de altura total en familias de un ensayo de progenie de <i>P. patula</i> de 2-3 años en el ejido Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver.....	56
Cuadro 10. Significancia del diámetro normal en familias de un ensayo de progenie de <i>P. patula</i> de 2-3 años en el ejido Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver.....	59
Cuadro 11. Significancia en el área de proyección de copa sobre el suelo en familias del ensayo de progenie de <i>P. patula</i> de 2-3 años en el ejido Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver.....	62

Cuadro 12. Significancia en el área de intercepción lumínica de la copa en familias del ensayo de progenie de *P. patula* de 2-3 años en el ejido Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver..... 65

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** (a) Morfología de fascículo y acículas de *P. patula*, (b) estomas de la cara abaxial y (c) estomas de la cara adaxial. est= estoma..... 20
- Figura 2.** Corte transversal de una acícula de *P. patula*. crm= canal de resina medio, end= endodermis, epi= epidermis est= estoma, fl= floema hip= hipodermis, hv= haces vasculares, m= mesófilo, tt= tejido de transfusión, xi= xilema..... 23
- Figura 3.** Ubicación de dos ensayos de progenie de *P. patula* en el predio particular rancho Tlatoxca, Zacualtipán, Hidalgo. Ejido Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz. Los puntos en el mapa indican la ubicación de los ensayos de progenie..... 27
- Figura 4.** Valores promedio del número de acículas por fascículo en los árboles (a) del predio particular rancho Tlatoxca y (b) del ejido Ojo de Agua. Las líneas verticales sobre las barras representan el error estándar. Las barras con la misma letra son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$). Del total de árboles muestreados, se graficaron tres sobresalientes, cuatro intermedios y tres con el menor valor obtenido con Tukey ($P \leq 0.05$)..... 31
- Figura 5.** Valores promedio de longitud de acícula en los árboles (a) del predio particular rancho Tlatoxca y (b) del ejido Ojo de Agua. Las líneas verticales sobre las barras representan el error estándar. Las barras con la misma letra son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$). Del total de árboles muestreados, se graficaron tres sobresalientes, cuatro intermedias y tres con el menor valor obtenido con Tukey ($P \leq 0.05$)..... 32
- Figura 6.** Corte transversal de acícula de *P. patula* mostrando la epidermis uniestratificada. cri= canal de resina interno, end= endodermis, epi: epidermis, est= estoma, hip: hipodermis..... 37
- Figura 7.** Secciones anatómicas transversales (a) hipodermis uniestratificada y (b) hipodermis biestratificada. epi= epidermis, est= estoma, hip= hipodermis..... 38

Figura 8. Cortes transversales de acículas de *P. patula* donde se muestran (a) canal resinífero medio, (b) canal resinífero septal, (c) canal resinífero externo y (d) canal resinífero interno. cre= canal resinífero externo, cri= canal resinífero interno, crm= canal resinífero medio, crs= canal resinífero septal, end= endodermis, epi= epidermis, hip= hipodermis, mpp= mesófilo de parénquima plicado, tt= tejido de transfusión..... 40

Figura 9. Corte transversal de acículas de *P. patula* donde se visualiza (a) ligero engrosamiento y (b) engrosamiento en las paredes periclinales externas de la endodermis. cri= canal de resina interno, end= endodermis, fl= floema, tt= tejido de transfusión, xi= xilema..... 41

Figura 10. Cortes anatómicos transversales de acículas de *P. patula* donde se muestran los haces vasculares (a) separados, (b) próximos o fusionados por medio del xilema y (c) fusionados. fl= floema, hv= haces vasculares, tt= tejido de transfusión, xi= xilema..... 42

Figura 11. Localización del ensayo de progenie establecido en el ejido Ojo de Agua en Huayacocotla, Veracruz..... 52

Figura 12. Altura total de árboles de un ensayo de progenie de *P. patula* en el centro de su distribución natural. (a) inicio del otoño 2021 (1 año 11 meses de edad), (b) inicio del invierno 2021 (2 años 2 meses de edad), (c) inicio de primavera 2022 (2 años 5 meses de edad), (d) inicio del verano 2022 (2 años 8 meses de edad). De las 64 familias estudiadas, se graficaron tres familias sobresalientes, cuatro familias intermedias y tres familias con el menor valor. Las barras con la misma letra son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$)..... 58

Figura 13. Diámetro normal de árboles de un ensayo de progenie de *P. patula* en el centro de su distribución natural. (a) inicio del otoño 2021 (1 año 11 meses de edad), (b) inicio del invierno 2021 (2 años 2 meses de edad), (c) inicio de primavera 2022 (2 años 5 meses de edad), (d) inicio del verano 2022 (2 años 8 meses de edad). De las 64 familias estudiadas, se graficaron tres familias sobresalientes, cuatro familias intermedias y tres familias con el menor valor. Las barras con la misma letra son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$)..... 61

Figura 14. Área de proyección de copa sobre el suelo de árboles de un ensayo de progenie de *P. patula* en el centro de su distribución natural. (a) inicio del otoño 2021 (1 año 11 meses de edad), (b) inicio del invierno 2021 (2 años 2 meses de edad), (c) inicio de primavera 2022 (2 años 5 meses de edad), (d) inicio del verano 2022 (2 años 8 meses de edad). De las 64 familias estudiadas, se graficaron tres familias sobresalientes, cuatro familias intermedias y tres familias con el menor valor. Las barras con la misma letra son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$)..... 64

Figura 15. Área de intercepción lumínica de la copa (AILC) de árboles de un ensayo de progenie de *P. patula* en el centro de su distribución natural. (a) inicio del otoño 2021 (1 año 11 meses de edad), (b) inicio del invierno 2021 (2 años 2 meses de edad), (c) inicio de primavera 2022 (2 años 5 meses de edad), (d) inicio del verano 2022 (2 años 8 meses de edad). De las 64 familias estudiadas, se graficaron tres familias sobresalientes, cuatro familias intermedias y tres familias con el menor valor. Las barras con la misma letra son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$)..... 67

Capítulo I

1.1 Introducción general

Los bosques templados, albergan especies de suma importancia que aportan bienes y servicios ambientales (Flores *et al.*, 2019). Son componentes esenciales de los ciclos biogeoquímicos, fundamentales para el ciclo del agua y su almacenamiento temporal, son importantes para la captura de carbono atmosférico y como refugio natural para la fauna (Moctezuma y Flores, 2020). Cumplen un rol ecológico importante en el reciclaje de nutrientes, conservación de la biodiversidad, regulación climática (Oyarzún *et al.*, 2005) y protección de los suelos por la forma y tamaño de sus copas (Domínguez *et al.*, 2006).

Pinus patula Schiede ex Schltdl et Cham. es una especie de zonas templadas que se desarrolla en ambientes forestales nubosos (Flores y Moctezuma, 2021). Taxonómicamente pertenece a la familia *Pinaceae* y al género *Pinus* (Trópicos, 2022). Es un árbol de hasta 40 m de altura y 100 cm de diámetro, fuste recto y cilíndrico. Presenta corteza gruesa y escamosa en la parte basal y coloración café rojiza en el resto del fuste (Perry, 1991). Sus hojas secundarias en forma de acículas, se encuentran agrupadas en fascículos; son delgadas, laxas y colgantes; de 15 a 25 cm de largo (Farjon y Styles, 1997).

Se distribuye de manera natural en la Sierra Madre Oriental (Dvorak *et al.*, 2000), en los estados de Chiapas, Hidalgo, México, Morelos, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y en la Ciudad de México (Farjon y Styles, 1997) desde los 1500 a 3100 m sobre el nivel del mar; en climas templados con precipitaciones altas de 1000 a 1500 mm (Perry, 1991) y suelos profundos con buen drenaje (Fuentes, 2022). Esta especie exhibe alta plasticidad (Dvorak *et al.*, 2000) y variación fenotípica (Viveros-Viveros *et al.*, 2013), fenómenos presentes a escala ecológica (Gianoli, 2004) que dan origen a gran cantidad de rasgos observables en las plantas, producto de la interacción entre la genética de la planta y el medio donde se desarrolla (Finkeldey y Hattemer, 2007); por esta razón, tiene importancia en el crecimiento, desarrollo y funcionamiento de los individuos en el ambiente (Gardín, 2008).

Pinus patula, es una especie endémica de México y cultivada como especie exótica en más de 20 países. En el sur de África y América, es una importante especie

de plantación; se estiman plantaciones de más de un millón de hectáreas (Wormald, 1975; Dvorak *et al.*, 2000). En México, ha sido ampliamente aprovechada para fines maderables siendo uno de los taxones con mayor volumen cosechado en el país (Flores y Moctezuma, 2021). Es de interés para programas de mejoramiento genético (Salaya-Domínguez *et al.*, 2012) debido a su rápido crecimiento, calidad de la madera, fuste recto y capacidad de autopoda, que facilitan su manejo silvícola (Wormald, 1975).

Los ensayos de progenie son plantaciones establecidas con el propósito de estimar el valor genético de los individuos selectos de donde se recolecta semilla (progenitores) para comparar su desarrollo en campo (CONAFOR, 2014) permitiendo identificar y eliminar individuos con bajo potencial productivo, evitando hereden sus características a poblaciones subsecuentes y elevando de esta manera la calidad comercial y/o características de interés en los demás individuos (Ipinza, 1998).

El germoplasma empleado para realizar plantaciones con fines comerciales, de restauración o reforestaciones, proviene de rodales naturales y en muchos casos con pocos cuidados en la selección de individuos con características para el fin deseado por lo cual evaluar este tipo de plantaciones es de suma importancia (García *et al.*, 2005). Además, el deficiente suministro de semilla de buena calidad y el nulo conocimiento de la procedencia, ha obstaculizado la supervivencia de plántulas y por ende el establecimiento de plantaciones forestales (Granhof, 1991).

En los ensayos de progenie se prueba la adaptabilidad de familias [familia: conjunto de individuos provenientes de un árbol madre (Landa *et al.*, 2002)]. La variación entre las progenies surge cuando se establecen en sitios diferentes (White *et al.*, 2007; Rodríguez *et al.*, 2021), esta interacción genotipo-ambiente se expresa en caracteres morfológicos muy distintos y pueden variar en respuesta a ciertos factores del medio (Núñez *et al.*, 2003).

Las características morfológicas (fenotípicas) de árboles como *P. patula*, muestran variación por la interacción con el ambiente (Viveros-Viveros *et al.*, 2013), las hojas exhiben mayor variación al ser uno de los órganos más expuestos al medio (Azcárraga *et al.*, 2010); ya que participan en la aclimatación y adaptación de los árboles; además de ser responsables de procesos como la fotosíntesis y el intercambio de gases. Ajustan o modifican su morfología y estructura anatómica como estrategia o

respuesta para soportar cambios en el ambiente (Geada-López *et al.*, 2021). Algunos de los cambios que experimentan las hojas (secundarias) de árboles del género *Pinus* es la longitud, afectada en algunos casos por gradientes altitudinales, los estomas por condiciones del ambiente; o bien, anatómicamente se han observado modificaciones en las células epidérmicas, en árboles de la misma especie ubicados en sitios diferentes (Vilela y Castellanos, 2000). Por tal motivo, es necesario describir la variación en *P. patula*, especie con importancia ecológica y económica con la finalidad de entender su interacción genotipo-ambiente. Y aunque los ensayos de progenie se centran en evaluar calidad genética en características morfológicas, es posible generar estudios detallados a nivel anatómico foliar que sirvan de base para conocer la variación natural y entender su relación con las características morfológicas deseables, contribuyendo para la toma de decisiones durante su manejo.

1.2 Marco teórico

1.2.1 Taxonomía de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl et Cham.

En México, están representadas cuatro de las seis familias de coníferas que existen en el mundo (Cupressaceae, Pinaceae, Podocarpaceae y Taxaceae). La familia Pinaceae comprende cuatro géneros (*Abies*, *Picea*, *Pinus* y *Pseudotsuga*), siendo el género *Pinus* el más representativo de México con 49 de las 120 especies reportadas en el mundo (Gernandt y Pérez, 2014). En el estado de Hidalgo, el género *Pinus* cuenta con 12 especies, entre las cuales se encuentra *P. patula* (Espinoza-Pelcastre *et al.*, 2018; Farjon y Styles, 1997).

1.2.2 Variedades

Pinus patula incluye dos variedades cuyas diferencias radican en los estróbilos femeninos y su distribución geográfica. *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. var. *patula* (Trópicos, 2023), presenta estróbilos femeninos con pedúnculos muy cortos, sésiles, tenasmente persistentes, serótinios, de (5-) 7-10 (-12) cm de largo, ovoides cuando están cerrados y ampliamente ovoides cuando están abiertos. *Pinus patula* var. *longepedunculata* Look ex Martínez (Trópicos, 2023), exhibe estróbilos femeninos con pedúnculo de 5-15 mm, de 5 a 8 cm de largo, de forma ovoide atenuado cuando están abiertos y estrechamente ovoides cuando están cerrados. Esta última variedad ocurre principalmente en los estados de Oaxaca y Chiapas (Perry, 1991; Farjon y Styles, 1997).

1.2.3 Descripción botánica de la especie

Pinus patula es un árbol perenne que alcanza 40 m de altura y hasta 100 cm de diámetro. Usualmente presenta un fuste (tallo) recto y cilíndrico, ramas verticiladas más o menos horizontales. Los árboles jóvenes tienen corteza característica de color rojizo, al igual que en la parte superior del fuste de árboles maduros, además de ser escamosa y profundamente fisurada. Fascículos persistentes de 2 a 3 años, constituidos 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, de color verde oscuro o pálido. Conos solitarios o en verticilos, persistentes, estrechamente ovoides cuando están cerrados de 5-10(-12) cm

de largo y de (3-)4-6.5 cm de ancho cuando abren. Semillas de color oscuro de 4-6 mm de largo y de 5-8 mm de ancho (Wormald, 1975; Perry, 1991; Farjon y Styles, 1997).

1.2.4 Distribución natural

Pinus patula se distribuye de manera natural en la Sierra Madre Oriental en la República Mexicana (Dvorak *et al.*, 2000), en los estados de Chiapas, Estado de México, Hidalgo, Morelos, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y la Ciudad de México (Farjon y Styles, 1997). A elevaciones que van desde los 1500 a 3100 m.s.n.m. Prefiere sitios húmedos, con precipitaciones anuales de 1000 a 1500 mm (Perry, 1991).

1.2.5 Ensayos de progenie

Los ensayos de progenie, son plantaciones que se establecen con el propósito de evaluar individuos selectos y comparar su desempeño en campo (CONAFOR, 2014). Permiten eliminar individuos con bajo potencial productivo y/o genético; evitando que los genes se hereden a las poblaciones subsecuentes, elevando la calidad comercial de la progenie (Ipinza, 1998).

1.2.6 Variación fenotípica

La variación fenotípica son los rasgos observables en las plantas, producto de la interacción entre la genética de la planta y el ambiente en donde se desarrolla (Finkeldey y Hattemer, 2007). Está influenciada por factores ambientales como temperatura, disponibilidad de agua, nutrientes en el suelo, disponibilidad de luz, entre otros (Goldar, 2019). Origina rasgos de suma importancia tanto para la adaptación de las plantas como para fines comerciales cuando se buscan características económicas deseables (madera) (Finkeldey y Hattemer, 2007). Algunos de estos rasgos, se pueden observar en caracteres foliares en poblaciones naturales de *Pinus hartwegii* Lindl., como lo reportan Iglesias *et al.*, (2012). O bien, observar variación en el crecimiento y desarrollo de las plantas, como en el estudio realizado por Hernández y Martínez (2004), en árboles de la especie *Gmelina arborea* Linn., Roxb.

1.2.7 Plasticidad fenotípica

Origina la variación de la expresión fenotípica en los diferentes ambientes experimentados por poblaciones naturales, es un fenómeno a escala ecológica (Gianoli, 2004). Manifiesta rasgos concretos en respuesta a estímulos ambientales específicos y tiene suma importancia en el crecimiento, desarrollo, funcionamiento y evolución de los individuos en el ambiente (Gardín *et al.*, 2008).

1.2.8 Antecedentes de la morfología y anatomía de acículas

Pérez *et al.*, (2016) encontraron diferencias anatómicas en acículas de árboles de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en seis localidades de Pinar del Río, Cuba. La epidermis exhibió diferencia entre sitios y la hipodermis estuvo conformada de 1-3 hileras de células. En los canales de resina, el número entre localidades fue variable pero la variación respecto a su posición estuvo ausente.

Pérez *et al.*, (2019) observaron diferencias anatómicas en acículas de *Pinus tropicalis* Morelet y encontraron una correlación significativa ($P \leq 0.0001$) y positiva entre el grosor de la hipodermis, número de estomas y número de canales de resina; posiblemente relacionados con el ambiente en el que se desarrolla la especie.

Rodríguez y Valle, (2020) realizaron cortes transversales en acículas de *Pinus caribaea* var. *caribaea*; y encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre sitios. La cutícula fue menos ancha en lugares con mayor disponibilidad de agua. La epidermis y tejido de transfusión aumentó hacia lugares más secos.

Geda-López *et al.*, (2021) obtuvieron diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) en un estudio anatómico de acículas de árboles de *Pinus caribaea* var. *caribaea*. El grosor de la hipodermis y cutícula fueron las más variables entre regiones de cada población.

Geda-López *et al.*, (2022) evaluaron acículas de árboles de *Pinus tropicalis* en poblaciones naturales, donde encontraron diferencias estadísticas significativas ($P \leq$

0.05) entre poblaciones, causadas por las condiciones ambientales, suelo, altitud y pendiente de cada sitio. Los canales de resina y grosor de la cutícula presentaron la mayor variación.

Sospedra *et al.*, (2023) analizaron acículas de árboles de *Pinus caribaea* Morelet *var. caribaea* Barret y Golfari, respecto a la posición en la copa del árbol. Los resultados obtenidos mostraron mayor diferencia en la parte alta de la copa, expresada en el aumento en el grosor de tejidos de protección (número de células de la hipodermis), relacionado con la mayor exposición al sol y menor humedad relativa en la parte superior de la copa.

1.2.9 Antecedentes de morfología y cobertura de suelo

La cobertura por la copa de los árboles, es la superficie que brinda protección al suelo contra agentes erosivos donde se favorece la presencia de organismos benéficos, temperatura y microclima en el mismo (Puertas *et al.*, 2008). Dicha superficie se puede conocer al calcular el área de proyección de copa sobre el suelo (Jiménez *et al.*, 2002).

Rodríguez *et al.*, (2009) obtuvieron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) en un estudio de variación en la cobertura de suelo en un ensayo de procedencias de *Pinus greggii* en Galeana, NL. Algunos árboles de diferentes procedencias aportaron mayor área de proyección de copa sobre el suelo (cobertura de suelo).

1.3 Objetivo general

Evaluar las características morfológicas y describir la anatomía foliar de árboles de *P. patula* de dos ensayos de progenie establecidos en la región centro de su distribución natural para determinar la variación en caracteres morfológicos y anatómicos foliares en sitios diferentes.

1.4 Objetivos específicos

- Describir la variación morfo-anatómica de las acículas de *P. patula* en dos ensayos de progenie establecidos en la región centro de su distribución, para evaluar la interacción de la hoja con el ambiente.
- Evaluar las características morfológicas de los árboles en un ensayo de progenie para identificar las familias con características deseables de protección al suelo.

1.5 Hipótesis

Las acículas de árboles de *P. patula* de los ensayos de progenie carecen de variación en la morfología y anatomía en diferentes sitios de establecimiento. Las condiciones ambientales que prevalecen en cada sitio de plantación modifican la morfología y anatomía de las acículas de los árboles de *Pinus patula* en dos ensayos de progenie con edad de 2 años de plantados.

El crecimiento de las copas de los árboles de *Pinus patula* proporciona diferente cobertura al suelo entre familias en un ensayo de progenie después de 2.7 años de plantados.

1.6 Justificación

La evaluación de ensayos de progenie en especies de alto valor ecológico y económico como *P. patula* es de gran importancia para la identificación de individuos con características deseables para protección al suelo. Dentro de estos ensayos, se comprenden familias (conjunto de medios hermanos) de diferentes procedencias y se considera relevante saber con exactitud cuáles de ellas puede cubrir mayor superficie en menor tiempo. A futuro, es posible utilizar este tipo de estudios para la conversión de ensayos de progenie a huertos semilleros sexuales, conformados por las mejores familias, con la finalidad de obtener semilla de buena calidad (Salaya-Domínguez *et al.*, 2012) para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales, de restauración y reforestaciones en áreas deterioradas. Además de evaluar características deseables (morfológicas), es importante realizar evaluaciones y descripción en caracteres morfo-anatómicos de la hoja. En *P. patula* se han realizado estudios en poblaciones naturales dirigidos a la identificación taxonómica de la especie como el de Espinoza-Pelcastre *et al.*, (2018), sin embargo, son pocos los estudios detallados que permitan comprender las respuestas que presenta la acícula al ambiente. Al ser los órganos más expuestos al medio, pueden revelar caracteres de adaptación que deben ser estudiados; sobre todo en plantaciones establecidas con el propósito de evaluar individuos selectos en ambientes diferentes como los ensayos de progenie conformados por árboles de edad similar.

1.7 Literatura citada

- Azcárraga, R. M., Jacques-Ríos, M. A., Bonfil-Campos, A., y Sandoval-Zapotitla, E. (2010). Atlas de Anatomía Vegetal. *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2014). Manual técnico para el establecimiento de ensayos de procedencias y progenies. Primera edición, México. 140 pág.
<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/19/0Manual%20Te%CC%81cnico%20para%20el%20Establecimiento%20de%20Ensayos.pdf>
- Domínguez D. M., Bravo, F., & Del Río, M. (2006). Modelos del tamaño de copa de *Pinus sylvestris* L. en bosques del centro de España. *Interciencia*, 31(3), 168-175.
- Dvorak, W. S., Hodge, G. R., Kietzka, J. E., Malan, F., Osorio, L. F., y Stanger, T. K. (2000). *Pinus patula*. Conservation and testing of tropical and subtropical forest tree species by the CAMCORE Cooperative, 148-173.
- Espinoza-Pelcastre, C., Hernández-León, S., Gernandt, D. S., Arce-Cervantes, O., Rodríguez-Laguna, R., y 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. doi:<https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.167>
- Farjon, A., y Styles, B. T. (1997). Flora Neotrópica Monograph 75 *Pinus* (Pinaceae). *New York Botanical Garden*.
- Finkeldey, R., y Hattemer, H. H. (2007). Tropical forest genetics. Berlin: Springer. 315 pág.
- Flores, A., Pineda Ojeda, T., y Flores Ayala, E. (2019). Potencial de reforestación de seis especies de pino para la restauración de zonas degradadas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(55), 171-179.
- Flores, A., y Moctezuma L., G. (2021). Cosecha de madera de 20 coníferas en zonas de movimiento de germoplasma. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(66), 122-140.
- Fuentes Amaro, S. L. (2022). Establecimiento de dos ensayos de progenie de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl et Cham. en la zona centro de su distribución. Tesis

- doctoral. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo, México. 107 pág.
- García, E. O. R., Rentería, A. A., Landa, J. A., y Contreras, F. H. Z. (2005). Establecimiento de un ensayo de progenie de *Pinus oaxacana* Mirov en los molinos, municipio de Perote, Veracruz. *Foresta Veracruzana*, 7(2), 33-36.
- Gardín, P. M., Arregui, R. Z., y Pérez, L. S. (2008). Plasticidad fenotípica de "*Pinus pinaster*" a la disponibilidad de nutrientes. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (24), 67-74.
- Geadá-López, G., Sotolongo-Sospedra, R., y Pérez-del Valle, L. (2022). Variación anatómica foliar en poblaciones naturales de *Pinus tropicalis* en Pinar del Río, Cuba. *Revista del Jardín Botánico Nacional*, 155-170.
- Geadá-López, G., Sotolongo-Sospedra, R., Valle, L. P. D., y 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.
- Gernandt, D. S., y Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 126-133.
- Gianoli, E. (2004). Plasticidad fenotípica adaptativa en plantas. *Fisiología Ecológica en Plantas: Mecanismos y Respuestas al Estrés en los Ecosistemas*; M. Cabrera.(ed). *Departamento de Botánica. Universidad de Concepción, Chile*. 13-25.
- Goldar, X. L. (2019). Geographic structure, plasticity, genetic variation and covariation of chemical defenses in maritime pine (Doctoral dissertation, Universidade de Vigo). https://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/bitstream/handle/11093/1169/Geographic_structure_plasticity.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hernández, J. V., y Martínez, H. B. (2004). Variación fenotípica y selección de árboles en una plantación de melina (*Gmelina arborea* Linn., Roxb.) de tres años de edad. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 10(1), 13-19
- Iglesias, L. G., Solís-Ramos, L. Y., y Viveros-Viveros, H. (2012). Variación morfométrica en dos poblaciones naturales de *Pinus hartwegii* Lindl. del estado de Veracruz. *Phyton (Buenos Aires)*, 81(2), 239-247.

- Ipinza, R. H. (1998). Mejoramiento Genético Forestal-Programa CONIF, Sobre la investigación en semillas de especies forestales nativas. *Santafé de Bogotá, Colombia*.
- Jiménez, J., Kramer, H., & Aguirre, O. (2002). Bestandesuntersuchungen in einem ungleichaltrigen Tannen-, Douglasien-, Kiefern-Naturbestand Nordostmexikos. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 173, 47-55.
- Landa, J. A., Hernández, L. D. C. M., Ramírez-García, E. O., y de la Paz Méndez-Guzmán, M. (2002). Establecimiento de tres ensayos de procedencia/progenie de *Pinus teocote* Schl. et Cham. en el estado de Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*, 4(2), 17-22.
- Moctezuma López, G., y Flores, A. (2020). Importancia económica del pino (*Pinus* spp.) como recurso natural en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(60), 161-185.
- Núñez Farfán, J., Careaga, S. A., Fornoni, J., Ruiz Montoya, L., y Valverde, P. L. (2003). La evolución de la plasticidad fenotípica. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 6(1), 16-24.
- Oyarzún, C., Nahuelhual, L., & Núñez, D. (2005). Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. *Ambiente y Desarrollo*, 20(3), 88-95.
- Pérez del Valle, L., Geada López, G., Armas Armas, I., y Piloto Casado, A. (2016). Variación anatómica de acículas de *Pinus caribaea* var. *caribaea* Barrett y Golfari en seis localidades de Pinar del Río. *Revista Forestal Baracoa*, 35(Número especial).
- Pérez del Valle, L., Geada López, G., y 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.
- Perry, J. P. (1991). *The pines of Mexico and Central America*. Portland, Oregon, USA. 231 pág.

- Puertas, F., Arévalo, E., Zúñiga, L., Alegre, J., Loli, O., Soplin, H., y Baligar, V. (2008). Establecimiento de cultivos de cobertura y extracción total de nutrientes en un suelo de trópico húmedo en la amazonia Peruana. *Ecología Aplicada*, 7(1-2), 23-28.
- Rodríguez, M. R. R., y Valle, L. P. D. (2020). Anatomía de acículas de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en cuatro biotopos de Pinar del Río. *Ciencias Forestales y Ambientales*, 5(1), 43-50.
- Rodríguez L. R., Meza R. J., Vargas H. J., y Jiménez P. J. (2009). Variación en la cobertura de suelo en un ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en el cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León. *Madera y Bosques*, 15(1), 47-59.
- Rodríguez V. M. E., Rodríguez O. G., Enríquez V. J. R., Campos A. G. V., Velasca V. V. A., Hernández H. A. (2021). Ensayos de progenies y huertos semilleros de especies forestales en México. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 8(1), 79-88.
- Salaya-Domínguez, J. M., López-Upton, J., y Vargas-Hernández, J. J. (2012). Variación genética y ambiental en dos ensayos de progenies de *Pinus patula*. *Agrociencia*, 46(5), 519-534.
- Sospedra, R. S., Geada-López, G., Pérez-del Valle, L., y Crespo, N. M. A. (2023). Efecto de la posición de las acículas en la copa del árbol sobre la anatomía foliar de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 11(1), 787.
- Trópicos, (2022). *Tropicos.org. Missouri Botanical Garden*. Recuperado el 18 de Octubre de 2022, de <https://tropicos.org/name/24900369>
- Trópicos, (2023). *Tropicos.org. Missouri Botanical Garden*. Recuperado el 18 de Abril de 2023 <<https://tropicos.org/name/24900842>>
- Vilela, E., y Castellanos, S. A. (2000). *Pinus chiapensis*: Un enfoque ecológico de su anatomía foliar. *Polibotánica*, (11), 111-120.
- Viveros-Viveros, H., Camarillo-Luna, A. R., Sáenz-Romero, C., y Aparicio-Rentería, A. (2013). Variación altitudinal en caracteres morfológicos de *Pinus patula* en el estado de Oaxaca (México) y su uso en la zonificación. *Bosque (Valdivia)*, 34(2), 173-179.

White, T. L., Adams, W. T., y Neale, D. B. (Eds.). (2007). *Forest genetics*. Cabi.

Wormald, T. (1975). *Pinus patula*. *Tropical Forestry Paper no. 7*. Department of forestry.
University of Oxford.

Capítulo II

Variación morfo-anatómica de las acículas de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl et Cham. en dos ensayos de progenie establecidos en la región centro de su distribución

Resumen

Los ensayos de progenie son plantaciones que comprenden familias de diferentes procedencias; en México son poco comunes y están dirigidos a evaluar la calidad genética de progenitores seleccionados en campo. Es importante conocer las características fenotípicas foliares que pueden reflejar la interacción de la hoja con el ambiente. El objetivo de este estudio fue describir las características morfológicas y anatómicas de las acículas de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl et Cham. en dos ensayos de progenie ubicados en Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo y Huayacocotla, Veracruz. De las pruebas de progenie, se colectaron diez acículas maduras de 64 árboles al azar de dos años de establecidas en campo. Se llevaron a laboratorio y se realizaron preparaciones permanentes de cortes transversales. El análisis y descripción se realizó con un microscopio IRISCOPE® y se realizaron análisis estadísticos de las variables morfo-anatómicas. El resultado de los análisis de varianza mostró diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$) en las variables morfológicas de la hoja y número de canales de resina. En los resultados del análisis descriptivo, se observó epidermis uniestratificada con células altamente esclerificadas de forma rectangular, en ambos ensayos. La hipodermis presentó diferencias entre sitios en el número de capas de células que la conforman, en el rancho Tlatoxca el mayor porcentaje de las acículas (67%) exhibieron hipodermis biestratificada mientras que en Ojo de Agua solo el 55%. El número de canales de resina fue diferente; en las muestras del rancho Tlatoxca se encontraron de (2-)3(-6) y promedio de 3.48, en cuanto a la posición fueron frecuentemente medios e internos y excepcionalmente externos y septales, mientras que en Ojo de Agua se encontraron (0-)3(-4) y el promedio fue 2.64, frecuentemente de posición media y ocasionalmente interna. Se concluye que el tipo de ambiente provoca respuestas diferentes en la anatomía de la hoja de *P. patula* dentro y entre los ensayos de progenie como medida de adaptación a las condiciones particulares de cada sitio de establecimiento.

Palabras clave:

Acícula, canales de resina, endodermis, epidermis, estomas, fascículo, floema, xilema.

Abstract

Progeny trials are plantations that include families from different origins; In Mexico they are rare and are aimed at evaluating the genetic quality of parents selected from the field. It is important to know the foliar phenotypic characteristics that can reflect the interaction of the leaf with the environment. The objective of this study was to describe the morphological and anatomical needle characteristics from *Pinus patula* Schiede ex Schltdl et Cham. in two progeny trials located at Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo and Huayacocotla, Veracruz. From the progeny tests, ten mature needles were collected from 64 random trees two years old established in the field. They were taken to the laboratory and cross sectional permanent preparations were made. The analysis and description was carried out with an IRISCOPE® microscope and morpho-anatomical variables were statistically analyzed showed significant statistical differences ($P \leq 0.0001$) in the morphological variables of the leaf and number of resin canals. Unistratified epidermis with highly sclerified rectangular cells was observed in both trials as a result of the descriptive analysis. Hypodermis differed between sites in the number of layers of cells; at rancho Tlatoxca, a greater percentage of the needles (67%) exhibited bistratified hypodermis, while at Ojo de Agua only 55%. The number of resin canals was different; in the samples from the rancho Tlatoxca, (2-)3(-6) and an average of 3.48 were found, in terms of position they were frequently middle and internal and exceptionally external and septal, while in Ojo de Agua (0-)3(-4) were found and the average was 2.64, they were frequently at medial position and occasionally internal. It was concluded that the environment causes different responses in *P. patula* leaf anatomy within and between progeny trials as a measure of adaptation to the particular conditions of each site of establishment.

Keywords:

Endodermis, epidermis, fascicle, floem, needle, resin canals, stoma, xylem.

2.1 Introducción

Pinus patula Schiede ex Schltdl et Cham. taxonómicamente pertenece a la familia *Pinaceae* y al género *Pinus* (Trópicos, 2022). Es un árbol de porte alto, hasta 40 m de altura y 100 cm de diámetro, fuste recto y cilíndrico. Presenta corteza gruesa y escamosa en la parte basal y coloración café rojiza en el resto del fuste (Perry, 1991). Sus hojas secundarias en forma de acículas se encuentran agrupadas en fascículos, son delgadas, laxas y colgantes de 15 a 25 cm de largo (Farjon y Styles, 1997). Es una especie de clima templado subtropical que se desarrolla en ambientes forestales nubosos con precipitaciones altas y suelos profundos con buen drenaje (Fuentes, 2022).

Dicha especie es endémica (Wormald, 1975) y de gran importancia en México por presentar crecimiento rápido y buena calidad de madera (Dvorak *et al.*, 2000; Velázquez *et al.*, 2004). Constituye una fuente importante de materia prima para la industria maderera y pulpa para papel en el país (Castelán y Arteaga, 2009) y ha sido plantada como especie exótica en más de 20 países (Wormald, 1975). Por tal motivo, es de interés en programas de mejoramiento genético (Salaya-Domínguez *et al.*, 2012) como los ensayos de progenie, los cuales son plantaciones establecidas con el propósito de estimar el valor genético de los individuos selectos de donde se recolectó semilla (progenitores), mediante la comparación de su desarrollo en campo (CONAFOR, 2014).

Cuando los ensayos de progenie se establecen en sitios diferentes, se genera variación entre progenies debido al ambiente (White *et al.*, 2007; Rodríguez *et al.*, 2021). Dicha variación puede indicar plasticidad fenotípica (Viveros-Viveros *et al.*, 2013) que provoca caracteres fisiológicos o morfológicos muy distintos como respuesta a diferentes ambientes o factores particulares del ambiente (Núñez *et al.*, 2003).

Las hojas son los órganos con mayor variación, al estar más expuestos al ambiente (Azcárraga *et al.*, 2010), ya que juegan un rol importante en la aclimatación y adaptación; además de ser responsables de procesos como la fotosíntesis y el intercambio de gases. Dichos componentes ajustan o modifican su morfología y estructura anatómica como respuesta para soportar cambios en el ambiente (Geadá-López *et al.*, 2021).

2.2 Marco teórico

2.2.1 Tipos de hojas del género *Pinus*

Los árboles del género *Pinus* a lo largo de su desarrollo presentan cuatro tipos de hojas; las primeras en aparecer después de la germinación de la semilla son las hojas cotiledonares; el número más alto observado en el género es de 24 cotiledones. Las hojas primarias o juveniles emergen inmediatamente después, son pequeñas, solitarias y dispuestas en espiral, solamente se producen durante la primera estación de crecimiento en la mayoría de las especies en el tallo principal. Los catáfilos son pequeñas y delgadas hojas posicionadas en la base de los fascículos. Y por último, las hojas secundarias o acículas aparecen al final de la primera estación de crecimiento, se desarrollan en brotes enanos axilares, son permanentemente verdes y metabólicamente activas y forman grupos o fascículos de 1-8 acículas (Perry, 1991, Farjon y Styles, 1997).

2.2.2 Estructuras de la hoja secundaria de *Pinus patula*

2.2.2.1 Fascículos

Los fascículos son grupos de acículas y varían en número según la especie y adaptaciones al medio (Martínez, 1992), se disponen de forma helicoidal sobre las ramillas (Pérez y Ceja, 2019). En *P. patula* los fascículos están constituidos por 3-4(-5) acículas en forma de penachos caídos que persisten de 2-3 años (Farjon y Styles, 1997).

2.2.2.2 Vaina

La vaina es el estuche que sostiene los fascículos, en algunas especies, el aspecto es escamoso o anillado. Puede ser persistente (acompañan a la hoja hasta que cae al suelo) o caediza (desaparece pronto) (Martínez, 1992). En *P. patula* son de color naranja a marrón, persistentes, de 12-15 mm de longitud (Farjon y Styles, 1997).

2.2.2 3 Acícula

Conocidas como hojas definitivas, fotosintéticas o secundarias; tienen forma de aguja (aciculares), son largas y delgadas (Martínez, 1992; Ramos, 2002). En *P. patula* su aspecto es caedizo, longitud de 10-30 cm pero generalmente se encuentran en un rango de 15-25 cm. Son de color verde pálido a verde amarillento (Fig. 1a). Presentan finas aserraciones en el margen y estomas en la cara abaxial y adaxial (Fig. 1b, 1c) (Perry, 1991; Farjon y Styles, 1997; Eckenwalder, 2009).

2.2.2.4 Estomas

Los estomas son diminutas aberturas presentes en las hojas, permiten el intercambio gaseoso (Fig. 1b, 1c). En pinos blandos, los estomas suelen encontrarse sobre la cara adaxial (epiestomático) y en pinos duros se encuentran en todas las caras de la hoja (anfiestomático), posicionados en líneas longitudinales que recorren el largo de la acícula. *P. patula* exhibe de 4-6(-7) líneas estomáticas en la cara abaxial y de 2-3(4) en la cara adaxial (Perry, 1991; Farjon y Styles, 1997).

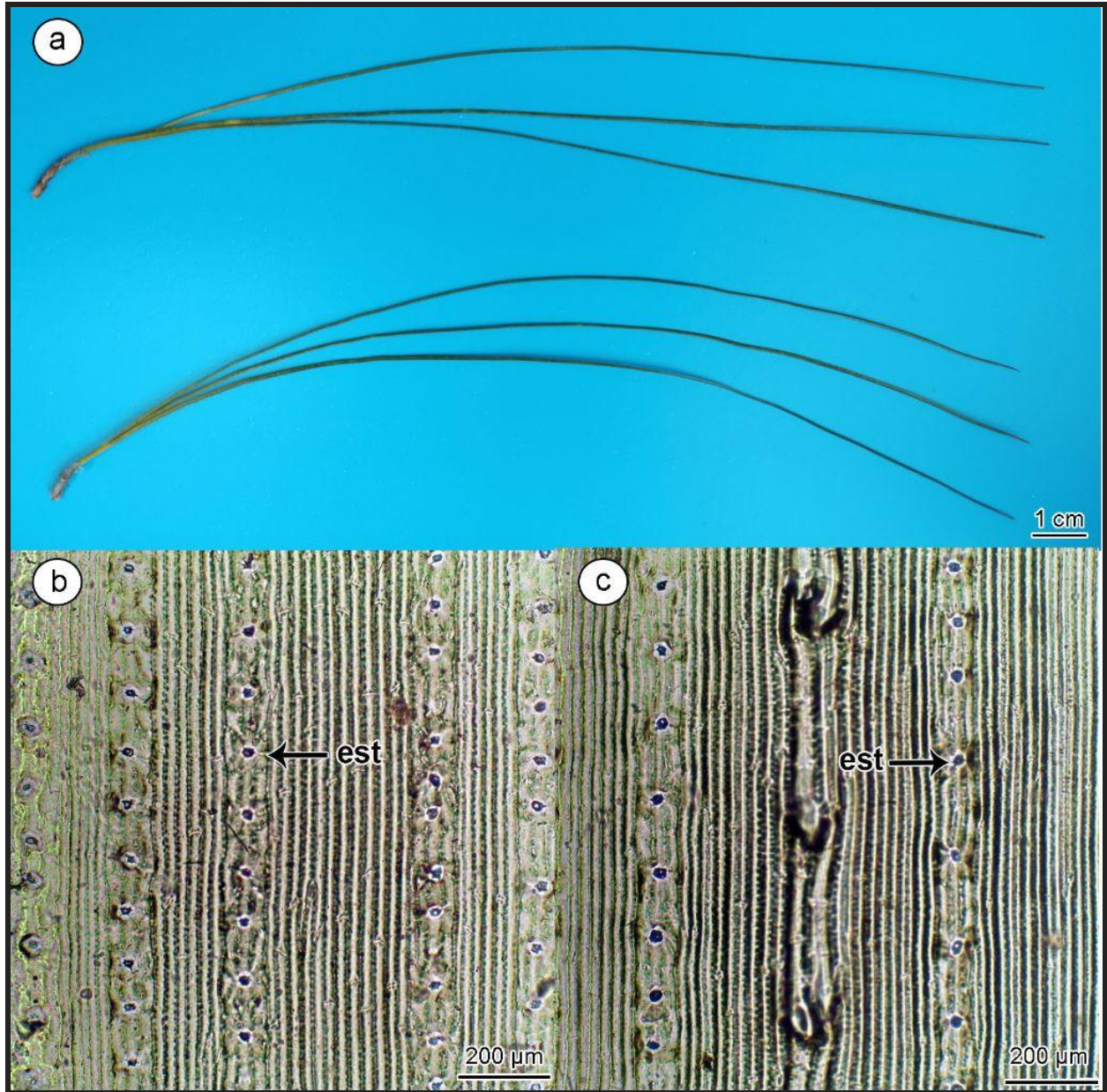


Figura 1. (a) Morfología de fascículo y acículas de *P. patula*, (b) estomas de la cara abaxial y (c) estomas de la cara adaxial. est= estoma.

2.2.3 Partes anatómicas de la hoja secundaria de *Pinus patula*

En la sección transversal de las acículas se observan tres estructuras y partes funcionales de la hoja. El tejido dérmico, conformado por la cutícula, epidermis e hipodermis. El tejido verde o mesófilo en el que se ubican los canales de resina y el tejido vascular compuesto por la endodermis, tejido de transfusión y haces vasculares con su porción de xilema y floema (Fig. 2) (Perry, 1991; Farjon y Styles, 1997).

2.2.3.1 Cutícula

La cutícula es una capa de cutina, la cual es una mezcla altamente polimerizada de lípidos y ceras que cubre por fuera la superficie de células epidérmicas. A la mayoría de las hojas le confiere un aspecto más o menos brillante (Farjon y Styles, 1997).

2.2.3.2 Epidermis

La epidermis está formada por un solo estrato de células gruesas y lignificadas, confiere protección a la hoja contra la pérdida de agua (Fig. 2) (Pérez y Ceja, 2019). La forma de las células de la epidermis puede ser cuadrada, transversal oblonga (rectangular), entre cuadrada rectangular y oblonga; variando entre especies (Farjon y Styles, 1997).

2.2.3.3 Hipodermis

La hipodermis es considerablemente más variable que la epidermis, a menudo distribuida desigualmente, en concentraciones más altas en los lados laterales y márgenes axilares de la hoja (Fig. 2). La hipodermis por la cantidad de hileras de células puede ser uniestratificada, biestratificada o triestratificada; es decir una, dos o tres hileras de células. Las células que la conforman, en algunos casos es uniforme (delgadas o gruesas), biforme (ambas delgadas y gruesas) o multiforme (con una transición gradual hacia células de pared más gruesa) (Martínez, 1992; Farjon y Styles, 1997).

2.2.3.4 Mesófilo

El mesófilo está compuesto por células grandes de pared delgada, onduladas y envolventes, cargadas de clorofila (Martínez, 1992); llena el espacio entre la hipodermis y endodermis (Farjon y Styles, 1997). En sección transversal, el mesófilo comprende aproximadamente el 50% del área de las acículas (Castillo *et al.*, 2020).

2.2.3.5 Canales de resina

Los canales de resina se encuentran en el mesófilo, rodeados por células epiteliales, su función principal es brindar protección a la planta (León, 2020). De acuerdo a su posición se describen como externos, sólo en contacto con el hipodermo; internos, solo unidos con la endodermis; medios (Fig. 2), sin tocar la hipodermis y endodermis, justo en el centro del mesófilo; o septales, en contacto con la hipodermis y la endodermis (Perry, 1991; Martínez, 1992).

2.2.3.6 Endodermis

Se localiza entre el mesófilo y el tejido de transfusión; su principal función es regular el paso de sustancias. En dicho tejido se pueden observar las bandas de Caspary (Pérez y Ceja, 2019). Esta estructura está conformada por una sola capa de células globosas a ovaladas, que separan el tejido de transfusión y los haces vasculares del mesófilo. En algunas especies se presenta engrosamiento en las paredes externas (Martínez, 1992; Farjon y Styles, 1997).

2.2.3.7 Tejido de transfusión

Conformado por parénquima y traqueidas de transfusión (Fig. 2), capaz de almacenar agua y materiales de reserva (Sánchez y Prada, 1993; Pérez y Ceja, 2019). Rodea los haces vasculares (floema y xilema) y es separado del mesófilo por la endodermis (Canny, 1993).

2.2.3.8 Haces vasculares

Los haces vasculares (floema y xilema) están localizados en la zona central de la hoja (Fig. 2). En pinos blandos (*haploxylon*) solo hay un haz vascular y en los pinos duros se

encuentran dos (*diploxyton*) (Martínez, 1992). La función principal del xilema es el transporte de agua y solutos, desde la raíz hacia el resto de los órganos, también brinda soporte a la planta. El floema transporta diferentes sustancias como azúcares, aminoácidos, micronutrientes, lípidos, entre otros, y constituye una vía de comunicación entre los órganos de las plantas y se encuentra dispuesto hacia la cara abaxial de la hoja (Azcárraga *et al.*, 2010).

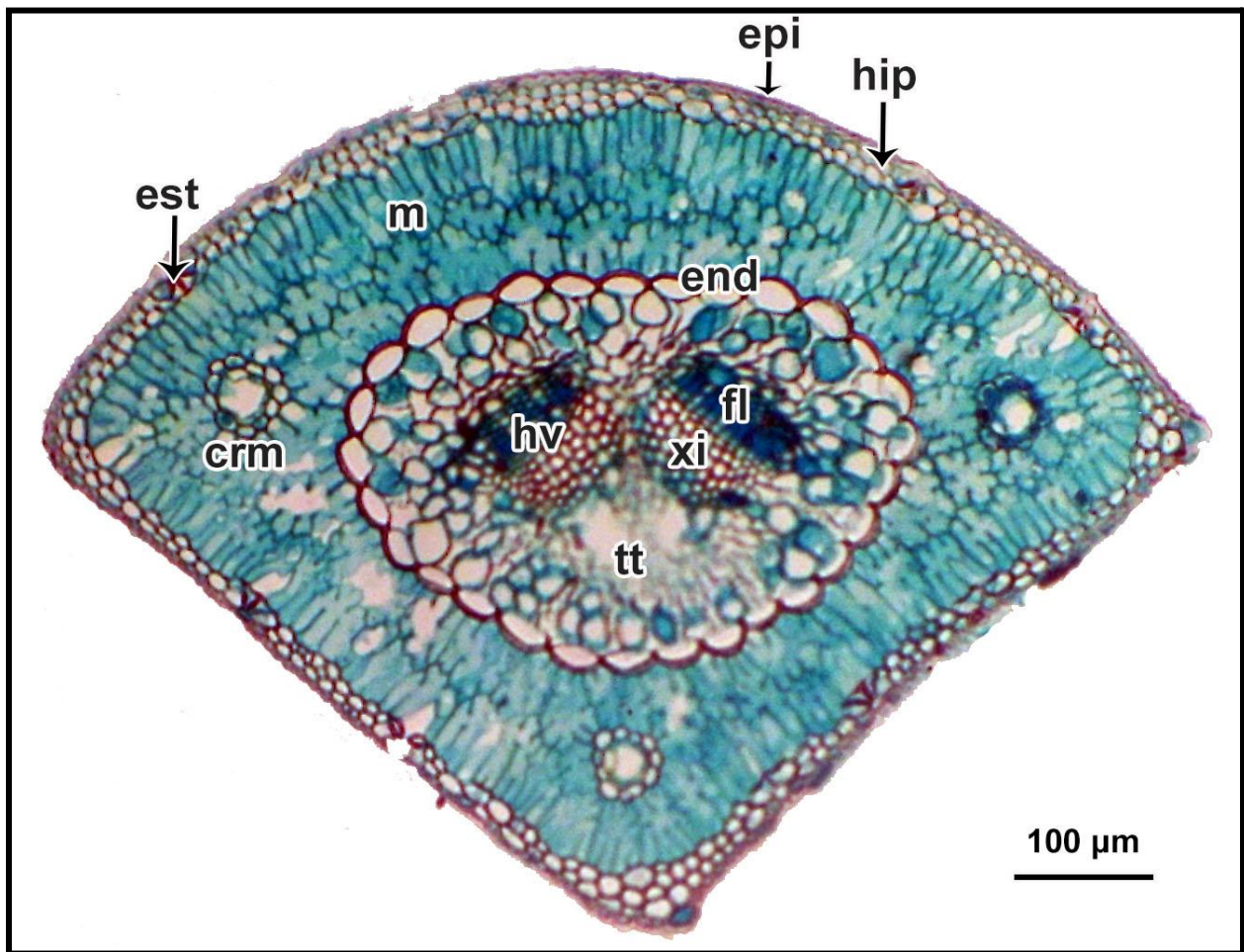


Figura 2. Corte transversal de una acícula de *P. patula*. crm= canal de resina medio, end= endodermis, epi= epidermis est= estoma, fl= floema hip= hipodermis, hv= haces vasculares, m= mesófilo, tt= tejido de transfusión, xi= xilema.

2.2.4 Histología vegetal

Algunas estructuras anatómicas de las plantas tienen coloraciones naturales que hacen visibles sus partes, sin embargo otras presentan estructuras transparentes o incoloras, las cuales deben hacerse visibles por medio de colorantes. La función de los colorantes, es teñir componentes celulares para su análisis y observación. Algunos se extraen de forma natural de vegetales o artificial de carbón mineral, estos últimos clasificados como ácidos selectivos para protoplasma, estructuras citoplasmáticas y paredes lignificadas; los colorantes básicos tales como el azul de metileno, azul toluidina, cristal violeta, fucsina básica, safranina se utilizan para destacar estructuras nucleares y paredes en proceso de lignificación (Sandoval, 2005).

2.2.4.1 Azul alciano

El azul alciano es un colorante básico. Se usa en la tinción de partes celulares incoloras como citoplasmas, nucleolos y paredes. Es uno de los colorantes más usados en la tinción celular (Beneš, 1968).

2.2.4.2 Safranina

La safranina es un colorante básico y uno de los más utilizados para la tinción de compuestos celulares. Se centra principalmente en la coloración de cromosomas, cutina, lignina, núcleos, quitina y suberina (Sandoval, 2005).

2.3 Objetivo general

Describir las características morfo-anatómicas de las acículas de *P. patula* en dos ensayos de progenie como respuesta al ambiente del sitio de plantación.

2.4 Hipótesis

Las condiciones ambientales del sitio de plantación provoca modificaciones en las características morfológicas y anatómicas de las acículas de *P. patula* dentro y entre ensayos de progenie.

2.5 Materiales y métodos

Área de estudio

Los ensayos de progenie establecidos en septiembre y octubre del 2019 constituyeron el área de estudio de esta investigación, el primero en un predio particular denominado rancho Tlatoxca (Cuadro 1), en el municipio de Zacualtipán de Ángeles en el estado de Hidalgo (Fig. 3) en un clima templado húmedo (Cuadro 2) y el segundo en el ejido Ojo de Agua (Cuadro 1) en Huayacocotla Veracruz (Fig. 3) en un clima templado subhúmedo (Cuadro 2).

Cuadro 1. Ubicación geográfica y características del sitio de dos ensayos de progenie de *P. patula* en la región centro de su distribución.

Ensayo	LN	LO	Altitud (m.s.n.m.)	Pendiente (%)
Rancho Tlatoxca	20°37'49"	98°38'10"	1910	25
Ojo de Agua	20°28'21"	98°29'56"	2310	3

LN: Latitud Norte, LO: Longitud Oeste

Cuadro 2. Características ambientales de dos ensayos de progenie de *P. patula* en la región centro de su distribución.

Ensayo	PMA (mm)*	TMA (°C)*	Clima*
Rancho Tlatoxca	1144	17.1	C(m)
Ojo de Agua	1004	14.7	C(w2)

PMA: Precipitación media anual (mm), TMA: Temperatura media anual (°C), C(m): Clima templado húmedo, C(w2): clima templado subhúmedo

*Datos obtenidos de WorldClim versión 2.1 (Fick y Hijmans, 2017) y conjunto de datos vectoriales Unidades Climáticas (INEGI, 2008) y Temperatura Media Anual (INEGI, 2006).

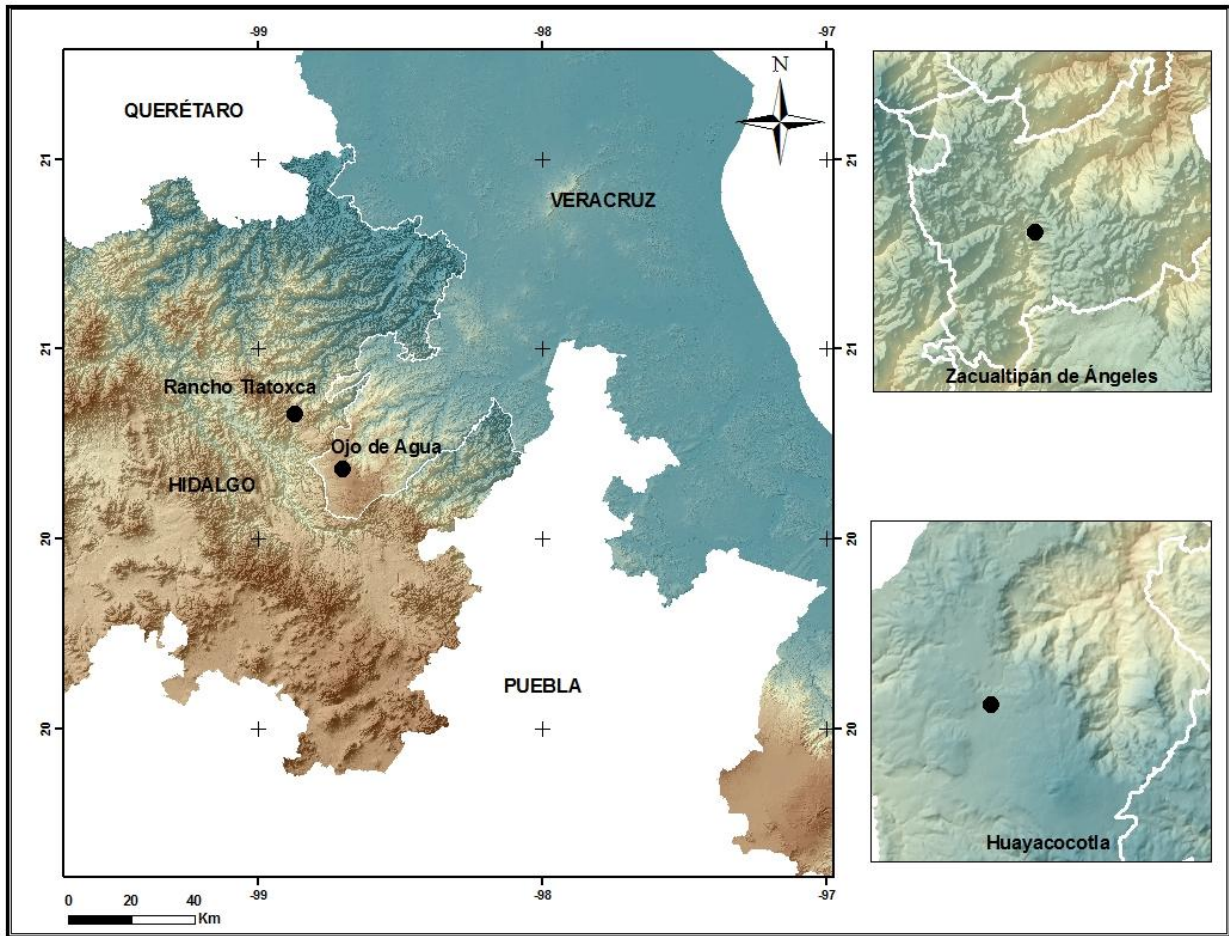


Figura 3. Ubicación de dos ensayos de progenie de *P. patula* en el predio particular rancho Tlatoxca, Zacualtipán, Hidalgo. Ejido Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz. Los puntos en el mapa indican la ubicación de los ensayos de progenie.

Colecta de acículas

Para la descripción y análisis (morfológicos y anatómicos) de la hoja, se colectaron diez acículas maduras de 40 árboles de dos años de edad de *P. patula* seleccionados al azar en el ensayo de progenie del ejido Ojo de Agua y 24 del ensayo de progenie del predio particular rancho Tlatoxca. Las acículas se obtuvieron de la parte media del árbol (iniciando la tercera porción superior de la copa), solamente en ramas de primer orden, preferentemente con mayor elongación, sin señales de decaimiento y daños por insectos. Las acículas se depositaron en frascos Disposable Scintillation Vials de 20 ml

Wheaton® (Wheaton Industries Inc, Nueva Jersey, EE. UU) que contenían FAA (Formaldehído: Ácido acético glacial: Alcohol etílico al 50%, en proporción 5:5:90) para su fijación en campo (Espinoza-Pelcastre *et al.*, 2018) y se transportaron al laboratorio de Botánica Forestal del Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Las hojas (acículas) permanecieron en FAA por tiempo indefinido.

Mediciones morfológicas de acículas

Para las mediciones morfológicas se utilizaron las mismas diez acículas de 40 árboles del ensayo de Ojo de Agua y 24 del rancho Tlatoxca, de las cuales se obtuvieron los cortes transversales para anatomía. Se contabilizó el número de acículas por fascículo y se midió la longitud completa, el ancho en la parte media de las acículas, longitud y espesor de la vaina de cada fascículo con vernier digital Mitutoyo® modelo 500-196-30 con aproximación al mm. Finalmente se contabilizaron el número de hileras estomáticas en la cara abaxial y adaxial obtenidas por medio de impresiones de cada acícula.

Impresiones estomáticas

Las impresiones estomáticas se tomaron de la parte media de diez acículas, de los 64 árboles seleccionados al azar de los ensayos de progenie (40 árboles del ejido Ojo de Agua y 24 del predio particular rancho Tlatoxca). Se aplicó una capa de esmalte efecto gel Vogue® (Fiabilia S.A, Francia) de larga duración en la cara abaxial y adaxial de la parte media de las acículas y se mantuvieron por 10 min a temperatura ambiente. Para retirar la capa de esmalte y lograr extraer la impresión de los estomas, se utilizaron segmentos de 2 a 3 cm de cinta transparente Scotch® (12 mm x 30 m) 3M® (Ciudad de México, México) y una vez adherida la impresión de los estomas a la cinta transparente, se pegaron en portaobjetos Superfrost® de 75 mm x 25 mm x 1 mm Cole parmer® (Vernon Hills, Illinois, USA) para visualizar en el microscopio IROSCOPE® modelo WB-3T y tomar fotomicrografías con una cámara Zeigen® (Ciudad de México, México) de cinco megapíxeles, acoplada al microscopio.

Cortes anatómicos de acículas

En la parte media de cinco acículas de los 64 árboles seleccionados al azar de los ensayos de progenie (40 árboles del ejido Ojo de Agua y 24 del predio particular rancho Tlatoxca), se realizaron cortes transversales a mano alzada con una navaja Gillette® (Procter & Gamble México, Ciudad de México, México) de doble filo sobre un portaobjeto Superfrost® de 75 mm x 25 mm x 1 mm Cole parmer® (Vernon Hills, Illinois, USA) y se depositaron en una caja Petri de vidrio Kimax® de 60 mm de diámetro x 15 mm de alto con 15 ml aproximadamente de agua destilada; fue necesario cambiar de navaja por corte de muestra de hojas para evitar la contaminación de las demás repeticiones, a la caja de Petri se le colocó gasa simple DIBAR® (Grupo Díaz B. Luna S.A de C.V, México) de aproximadamente 0.5 cm² para filtrar y evitar la pérdida de cortes (la gasa se mantuvo hasta el final de la tinción) (Azcárraga *et al.*, 2010).

Protocolo de tinción anatómica

Los cortes de las acículas se transparentaron con 20 gotas de hipoclorito de sodio Cloralex® (Alen del Norte S.A de C.V, Nuevo León, México) durante 30 min y con la pipeta Pasteur de plástico, el NaClO, se retiró aplicando enjuagues por cuatro repeticiones con agua destilada. Se deshidrataron con alcohol etílico de 50° (AZ®, Zapopan, Jalisco, México) por 5 min para después comenzar con la tinción de tejidos de células de pared secundaria con safranina en concentración 0.5 g de safranina (C₂₀H₁₉N₄Cl) Jalmek® (San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México), 7.7 ml de etanol de 95° AZ®, (Zapopan, Jalisco, México), 7.25 ml de agua destilada y 15 ml de etanol de 50° (AZ®, Zapopan, Jalisco, México) por un min y se aplicó un enjuague de cuatro repeticiones con agua destilada para continuar con la tinción de tejidos de células de pared primaria en concentración de 0.5 gr de Azul alcían (C₅₆H₆₈Cl₄CuN₁₆S₄) Meyer® (Alcaldía Tláhuac, México) 48.5 ml de agua destilada y 2.5 ml de ácido acético glacial (CH₃COOH) Meyer® (Alcaldía Tláhuac, México) durante un min. Para eliminar el exceso de colorante en los tejidos se mantuvieron por tiempo indefinido en alcohol etílico de 95° AZ® y con apoyo de un estereoscopio Swift® modelo SM-80 (Swift Instruments Inc) se monitorearon hasta alcanzar un tono claro. Por último, los tejidos se deshidrataron con alcohol absoluto (CH₃CH₂OH) Meyer® (Alcaldía Tláhuac, México) por un min y se

lavaron con xileno ($C_6H_4(CH_3)_2$ Jalmek[®] (San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México) (Sandoval, 2005).

Montaje de cortes anatómicos

Los cortes anatómicos de las acículas se montaron en portaobjetos de 75 mm x 25 mm x 1 mm Superfrost[®]. Se utilizó como medio de montaje una mezcla de resina sintética HYCEL[®] (Protasio Tagle, Ciudad de México, México) y Tolueno ($C_6H_5CH_3$) SIGMA-ALDRICH[®] (Missouri, Estados Unidos de América) para mantener el montaje permanente.

Descripción y análisis de caracteres morfológicos y anatómicos

Para la descripción de la epidermis, hipodermis, mesófilo, endodermis, tejido de transfusión haces vasculares y análisis de canales de resina, se tomaron fotomicrografías con un dispositivo Apple[®] adaptado a un microscopio binocular IROSCOPE[®] modelo WB3T (Iroscope[®], Naucalpan de Juárez, Estado de México, México). Las fotomicrografías se procesaron en el paquete informático Image J, versión 1.50i (Wayne R., s.f) y para la edición se utilizó Photoshop[®] versión 13.0.121 (Adobe[®], 2012).

Análisis estadísticos

Las variables evaluadas número de acículas por fascículo, largo y ancho de acícula, largo y espesor de la vaina, número de hileras estomáticas, así como el número de canales de resina, se sometieron a análisis de varianza. A las variables con diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) se les aplicó la prueba de comparación de medias Tukey para identificar la respuesta de los árboles al ambiente de cada ensayo de progenie. Los análisis estadísticos se realizaron por separado para cada ensayo de progenie y se utilizó el software Statistical Analysis System (2002) versión 9.00

2.6 Resultados y discusión

Caracteres morfológicos de la hoja

Número de acículas por fascículo

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$) dentro de cada ensayo de progenie en la variable número de acículas por fascículo (Cuadro 3). En el predio particular rancho Tlatoxca, los fascículos estuvieron constituidos principalmente por 3-4 acículas obteniendo el promedio de 3.51 (Fig. 4a); mientras que los árboles del ejido Ojo Agua presentaron de 4-5 acículas por fascículo con promedio de 4.12 (Fig 4b). Los resultados coinciden con Farjon y Styles, (1997) quienes reportaron fascículos constituidos por 3-4(-5) acículas. En un estudio realizado por Rodríguez y Capo (2005) encontraron diferencias en el número promedio de acículas por fascículo en nueve poblaciones de *Pinus arizonica* Engelm, las poblaciones a menor altitud presentaron menor número de acículas por fascículo. Andreu y Fernández (2006) atribuyen la variación de caracteres foliares a las condiciones ambientales como temperatura del sitio. Esto pudiera dar respuesta a lo encontrado en este estudio; la temperatura media anual es mayor (17.1°C) en rancho Tlatoxca y se encuentra a menor altitud (1910 m) comparado con el ensayo establecido en Ojo de Agua (14.7°C , 2310 m).

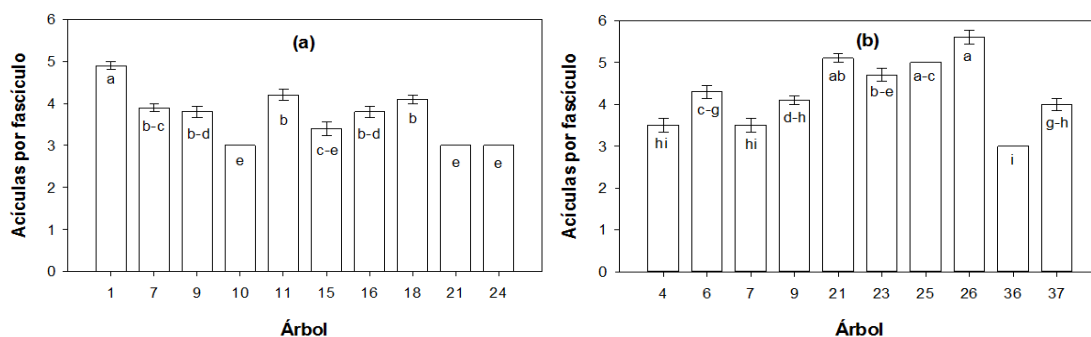


Figura 4. Valores promedio del número de acículas por fascículo en los árboles (a) del predio particular rancho Tlatoxca y (b) del ejido Ojo de Agua. Las líneas verticales sobre las barras representan el error estándar. Las barras con la misma letra son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$). Del total de árboles muestreados, se graficaron tres sobresalientes, cuatro intermedios y tres con el menor valor obtenido con Tukey ($P \leq 0.05$).

Longitud de acícula

Para la variable longitud de acícula se obtuvieron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$) dentro de los ensayos de progenie (Cuadro 3). La longitud promedio de las acículas entre ensayos presentó una ligera diferencia (Fig. 5); las muestras promediaron 15.12 cm en el predio particular rancho Tlatoxca (Cuadro 4) y 15.23 cm en ejido Ojo de Agua (Cuadro 5). Los valores promedio se encuentran dentro del rango que reporta Farjon y Styles (1997) para la misma especie de *P. patula* en un rango de entre 15-25 cm de longitud, los resultados obtenidos en este estudio se encuentran cerca del límite inferior del rango de variación natural. Lo anterior es posible que se deba a que los árboles muestreados son jóvenes (2 años) y los reportes de Farjon y Styles (1997) son de árboles maduros.

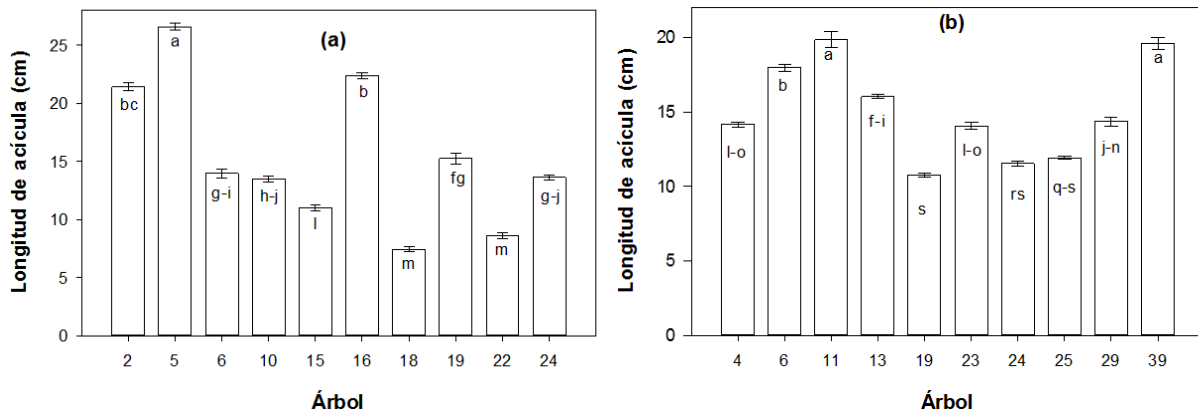


Figura 5. Valores promedio de longitud de acícula en los árboles (a) del predio particular rancho Tlatoxca y (b) del ejido Ojo de Agua. Las líneas verticales sobre las barras representan el error estándar. Las barras con la misma letra son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$). Del total de árboles muestreados, se graficaron tres sobresalientes, cuatro intermedias y tres con el menor valor obtenido con Tukey ($P \leq 0.05$).

Ancho de acícula

En el ancho de acícula se encontraron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$) dentro de los ensayos de progenie (Cuadro 3). Las acículas de los árboles que se encuentran en el ejido Ojo de Agua exhibió el valor promedio mayor (0.93 mm) mientras que el predio particular rancho Tlatoxca el menor (0.89 mm) (Cuadro 4 y 5).

Los resultados son similares a los de Farjon y Styles, (1997) quienes reportan el ancho de acículas de *P. patula* de 0.7-0.9(-1) mm. En otro estudio de Martiñón-Martínez *et al.*, (2010) reportaron reducción de biomasa verde en individuos de *Pinus pinceana* en respuesta al incremento de temperatura. Esto podría dar respuesta a lo encontrado en este estudio, ya que las condiciones de los sitios donde se establecieron los ensayos de progenie son diferentes; el sitio donde se encuentra el ensayo de rancho Tlatoxca con acículas ligeramente más delgadas presenta temperatura media anual mayor (17.1 °C) respecto al ejido Ojo de Agua (14.7 °C).

Longitud de la vaina

El análisis de varianza, exhibió diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$) en la longitud de la vaina dentro de los ensayos de progenie (Cuadro 3). Las muestras de los árboles del ensayo establecido en el ejido Ojo de Agua mostraron el promedio más alto (1.79 cm), 20.16% más de longitud que las muestras del predio particular rancho Tlatoxca (1.49 cm). Resultados similares fueron obtenidos por Viveros-Viveros *et al.*, (2013) en poblaciones naturales de *P. patula* al reportar una relación positiva entre la longitud de la vaina y altitud. En el presente estudio; el ensayo del ejido Ojo de Agua se estableció a mayor altitud (2310 m) el cual exhibió mayor longitud de la vaina que el ensayo del predio particular rancho Tlatoxca (1910 m).

Espesor de la vaina

En la variable espesor de la vaina, se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.0001$) en los ensayos de progenie (Cuadro 3). En el ejido Ojo de Agua, se encontró en promedio vainas con mayor espesor (1.44 mm) que las del predio particular rancho Tlatoxca (1.25 mm) (Cuadro 4 y 5).

Número de hileras estomáticas en la cara abaxial

Se encontraron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$) dentro de los ensayos de progenie en la variable número de hileras estomáticas en la cara abaxial (Cuadro 3). En el predio particular rancho Tlatoxca las muestras exhibieron el promedio de 5.44 (Cuadro 4), mientras que las muestras del ejido Ojo de Agua mostraron el

promedio de 5.75 (Cuadro 5). Los resultados se encuentran dentro del rango reportado por Farjon y Styles, (1997) quienes registraron de 4-6(-7) hileras estomáticas en la cara abaxial en hojas de *P. patula*.

Número de hileras estomáticas en la cara adaxial

El número de hileras estomáticas en la cara adaxial presentó diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$) dentro de los ensayos de progenie (Cuadro 3). En el predio particular rancho Tlatoxca las acículas tuvieron en promedio 4.73 (Cuadro 4), mientras que las acículas de los árboles del ejido Ojo de Agua mostraron en promedio 4.92 (Cuadro 5). En ambos ensayos se encontraron 2-3 hileras estomáticas por cada cara adaxial. Los resultados son similares a los reportados por Farjon y Styles, (1997) quienes reportan de 2-3(-4) hileras estomáticas en la cara adaxial en hojas de *P. patula*.

Cuadro 3. Significancia de variables morfológicas de acículas de los árboles de dos ensayos de progenie de *P. patula* a los 2 años de edad.

Variable	Fuente	CM	Valor de F	Pr >F
Acículas por fascículo	R. Tlatoxca	2.79	23.48	<0.0001
	Ojo de Agua	2.56	14.02	<0.0001
Longitud de acícula	R. Tlatoxca	211.33	214.45	<0.0001
	Ojo de Agua	44.07	61.74	<0.0001
Ancho de acícula	R. Tlatoxca	0.11	28.21	<0.0001
	Ojo de Agua	0.03	11.80	<0.0001
Longitud de vaina	R. Tlatoxca	0.66	22.54	<0.0001
	Ojo de Agua	0.31	17.96	<0.0001
Espesor de vaina	R. Tlatoxca	0.52	47.57	<0.0001
	Ojo de Agua	0.21	25.58	<0.0001
Hileras estomáticas en la cara abaxial	R. Tlatoxca	8.71	13.73	<0.0001
	Ojo de Agua	4.69	6.81	<0.0001
Hileras estomáticas en la cara adaxial	R. Tlatoxca	9.58	16.41	<0.0001
	Ojo de Agua	3.45	6.43	<0.0001

R. Tlatoxca: rancho Tlatoxca, CM: cuadrado de la media, Pr: probabilidad

Cuadro 4. Estadística descriptiva en variables morfológicas de acículas de los árboles de *P. patula* de 2 años de edad del ensayo de progenie del predio particular rancho Tlatoxca.

Variable/ Estadística	A/F	LA (cm)	AA (mm)	LV (cm)	EV (mm)	HAB	HAD
Mínimo	3.00	6.53	0.66	0.81	0.78	4.00	3.40
Media	3.51	15.12	0.89	1.48	1.25	5.45	4.73
Máximo	5.00	28.66	1.22	2.20	1.94	7.00	7.00

A/F: Acículas por fascículo, LA: longitud de acícula, AA: ancho de acícula, LV: longitud de la vaina, EV: espesor de la vaina, HAB: hileras estomáticas en la cara abaxial, HAD: hileras estomáticas en la cara adaxial.

Cuadro 5. Estadística descriptiva en variables morfológicas de acículas de los árboles de *P. patula* de 2 años de edad del ensayo de progenie del ejido Ojo de Agua.

Variable/ Estadística	A/F	LA (cm)	AA (mm)	LV (cm)	EV (mm)	HAB	HAD
Mínimo	3.00	10.24	0.70	1.11	0.86	3.0	2.0
Media	4.13	15.23	0.93	1.78	1.44	5.7	4.9
Máximo	6.00	23.53	1.13	2.35	2.09	11.0	7.0

A/F: Acículas por fascículo, LA: longitud de acícula, AA: ancho de acícula, LV: longitud de la vaina, EV: espesor de la vaina, HAB: hileras estomáticas en la cara abaxial, HAD: hileras estomáticas en la cara adaxial.

Caracteres anatómicos de acículas de *P. patula* en los ensayos de progenie

Epidermis

En los cortes transversales de las acículas de *P. patula*, se observó la epidermis uniestratificada (un estrato de células) con paredes gruesas y lignificadas (Fig. 6). De acuerdo con Farjon y Styles (1997), la epidermis se constituye por un solo estrato de células, en especies del género *Pinus*. Vilela y Castellanos (2000) asocian el grosor de la cutícula a las diferentes condiciones ambientales a las que los árboles están sujetos.

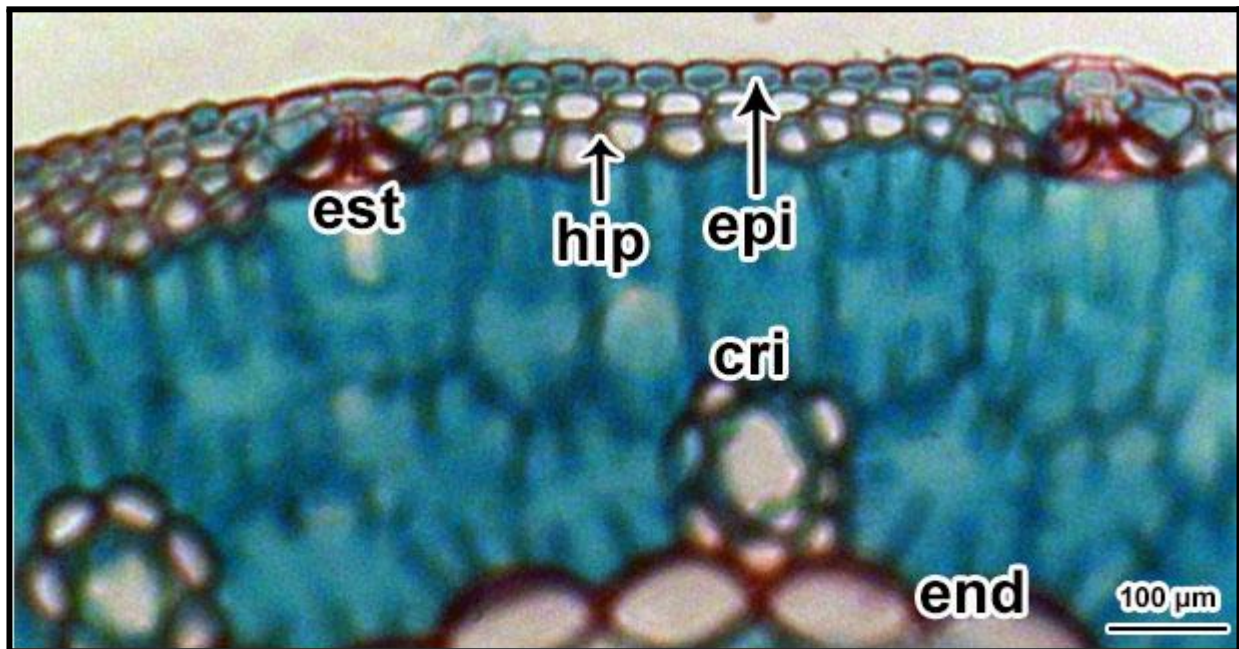


Figura 6. Corte transversal de acícula de *P. patula* mostrando la epidermis uniestratificada. cri= canal de resina interno, end= endodermis, epi: epidermis, est= estoma, hip: hipodermis.

Hipodermis

Los resultados encontrados muestran que la hipodermis fue uniestratificada (una hilera de células) y biestratificada (dos hileras de células). En el ensayo ubicado en el ejido Ojo de Agua, el 67% de las muestras presentaron hipodermis uniestratificada (Fig. 7a) y el 33% biestratificada (Fig. 7b). En contraste en el ensayo del rancho Tlatoxca, 54% de las muestras exhibieron hipodermis biestratificada y el 46% uniestratificada. En el estudio desarrollado por Grill *et al.*, (2004) encontraron un incremento en el número de células de la hipodermis al someter a individuos de *Pinus canariensis* a estrés hídrico.

Los resultados de Geada-López *et al.*, (2022) en poblaciones naturales de *Pinus tropicalis*, muestran diferencias en el grosor de la hipodermis por las condiciones de cada sitio y de acuerdo con Pérez-del Valle *et al.*, (2020) las especies de *Pinus* desarrollan sus propios mecanismos para contrarrestar el estrés. Esto podría explicar la diferencia entre ensayos de progenie, en el predio particular rancho Tlatoxca la temperatura promedio es mayor (17.1°C) y presentó menor porcentaje de hipodermis biestratificada y mayor de uniestratificada que en Ojo de Agua (14.7°C). En otro estudio de Nikolić *et al.*, (2016) han reportado un incremento en el grosor de la hipodermis, ocasionado por el tipo de suelo y pendiente del sitio. En el predio particular rancho Tlatoxca, el terreno utilizado para el establecimiento del ensayo de progenie presenta 25% de pendiente mientras que el ejido Ojo de Agua es 3 %; esto pudiera tener relación con el mayor porcentaje de muestras en el predio particular rancho Tlatoxca con incremento en el número de hileras de células de la hipodermis.

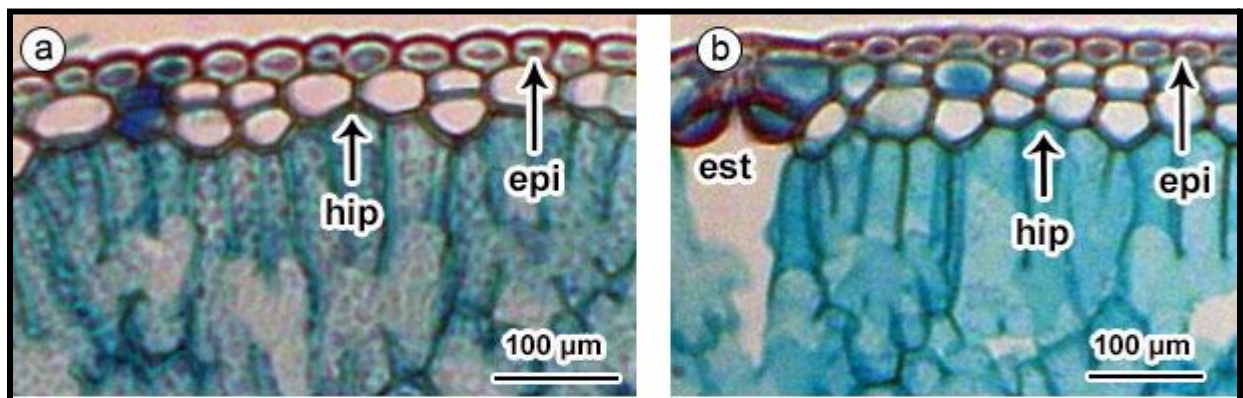


Figura 7. Secciones anatómicas transversales (a) hipodermis uniestratificada y (b) hipodermis biestratificada. epi= epidermis, est= estoma, hip= hipodermis.

Canales de resina

El número de canales de resina presentes en las acículas mostraron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$) entre los árboles dentro de los ensayos de progenie (Cuadro 6). Las acículas de los árboles del rancho Tlatoxca, presentaron canales de resina en posiciones media, interna, externa y septal (Fig. 8a-d); se obtuvieron en promedio general 3.48, el número máximo encontrado fue de 6 y el mínimo de 2 (Cuadro 7). Las muestras del ensayo del ejido Ojo de Agua, exhibieron

canales de resina en posiciones media e interna (Fig. 8a y d) es decir con menor variación; media general de 2.64, número de canales de resina máximo 4 y mínimo 0 (Cuadro 7). Geada-López *et al.*, (2022) encontraron variación en el número de canales de resina en acículas de *Pinus tropicalis* entre poblaciones, donde el número aumentó en sitios con temperatura más alta. En los resultados obtenidos por Donnelly *et al.*, (2016) asocian la disponibilidad de humedad en el suelo con la densidad de canales de resina en acículas de árboles de *Pinus sylvestris*. Aunque en el predio particular rancho Tlatoxca la precipitación es mayor (1144 mm), la pendiente del terreno (25%) dificulta la retención de agua en el suelo, lo cual podría explicar el aumento de canales de resina en las hojas de los árboles del ensayo de progenie.

Cuadro 6. Significancia de la variable número de canales de resina de los árboles de dos ensayos de progenie de *P. patula* a los 2 años de edad.

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

Cuadro 7. Estadística descriptiva de los ensayos de progenie de árboles de *P. patula* del predio particular rancho Tlatoxca y ejido Ojo de Agua.

Variable/ Estadística	Canales de resina Rancho Tlatoxca	Canales de resina Ejido Ojo de Agua
Mínimo	2.00	0
Media	3.48	2.64
Máximo	6.00	4.00

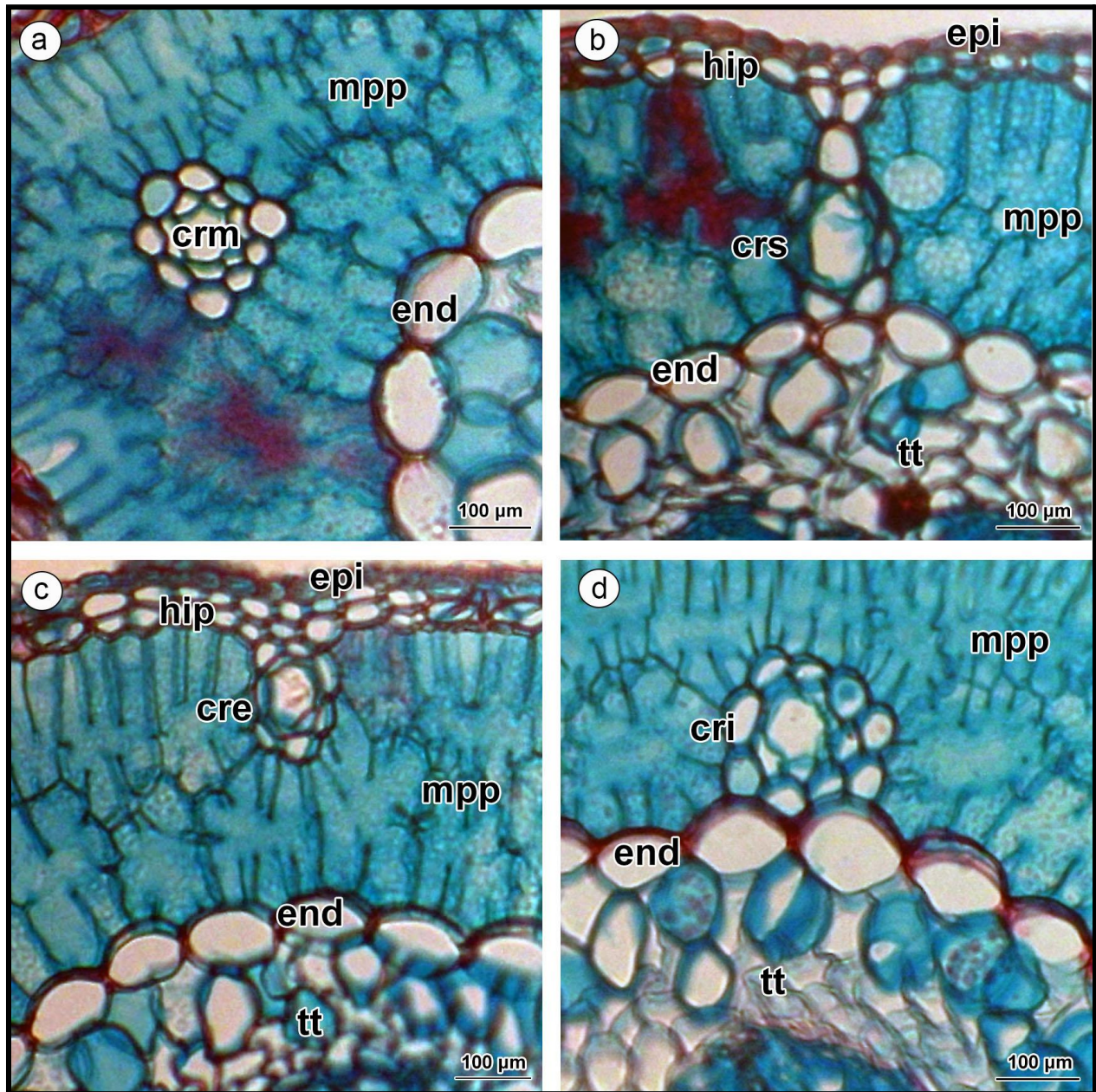


Figura 8. Cortes transversales de acúculas de *P. patula* donde se muestran (a) canal resinífero medio, (b) canal resinífero septal, (c) canal resinífero externo y (d) canal resinífero interno. cre= canal resinífero externo, cri= canal resinífero interno, crm= canal resinífero medio, crs= canal resinífero septal, end= endodermis, epi= epidermis, hip= hipodermis, mpp= mesófilo de parénquima plicado, tt= tejido de transfusión.

Endodermis

Las acículas de los árboles de los ensayos de progenie, mostraron endodermis conformada por un solo estrato de células y exhibieron un ligero engrosamiento en las paredes periclinales externas (Fig. 9a). En ambos ensayos de progenie, la mayoría de las acículas presentaron engrosamiento (Fig. 9b); en el predio particular rancho Tlatoxca el 67% mientras que en el ejido Ojo de Agua el 55%. Los resultados son similares a lo reportado por Perry (1991) en la descripción anatómica de la endodermis de *Pinus patula* donde observó un delgado a ligero engrosamiento en las paredes periclinales externas.

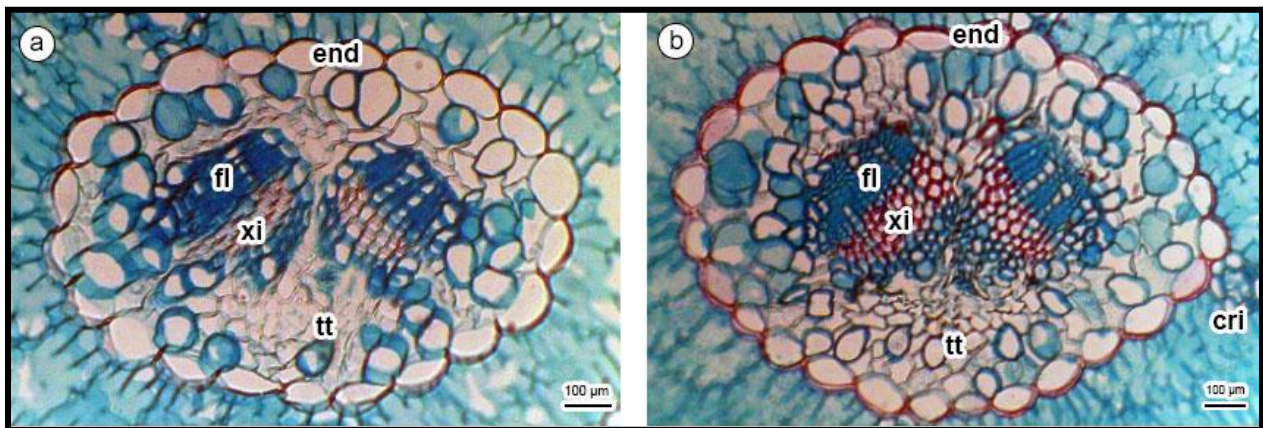


Figura 9. Corte transversal de acículas de *P. patula* donde se visualiza (a) ligero engrosamiento y (b) engrosamiento en las paredes periclinales externas de la endodermis. cri= canal de resina interno, end= endodermis, fl= floema, tt= tejido de transfusión, xi= xilema.

Tejido de transfusión

En el tejido de transfusión, fueron poco notorias las diferencias entre las acículas y entre los ensayos de progenie, el tejido no presentó esclerénquima. Los resultados coinciden con lo reportado por Farjon y Styles (1997) en la descripción anatómica de la hoja de *Pinus patula*.

Haces vasculares

Las acículas de los árboles de *P. patula* tuvieron respuesta similar en los ensayos de progenie; las acículas del ensayo ubicado en el predio particular rancho Tlatoxca, exhibieron haces vasculares separados (21%), próximos por medio del xilema (67%) y fusionados (12%) (Fig. 10); mientras que en el ejido Ojo de Agua, se observaron en la mayoría de las acículas haces vasculares próximos por medio del xilema (63%), separados (37%) sin presentarse haces vasculares fusionados. Espinoza-Pelcastre *et al.* (2018), encontraron en acículas de *P. patula* haces vasculares separados. Perry (1991), Farjon y Styles (1997) reportaron para la misma especie haces vasculares fusionados o conados por medio del xilema.

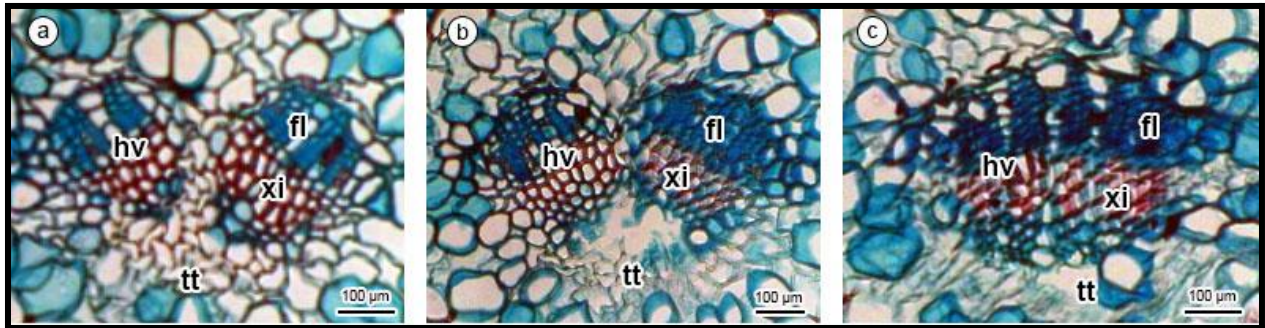


Figura 10. Cortes anatómicos transversales de acículas de *P. patula* donde se muestran los haces vasculares (a) separados, (b) próximos o fusionados por medio del xilema y (c) fusionados. fl= floema, hv= haces vasculares, tt= tejido de transfusión, xi= xilema.

2.7 Conclusiones

Las condiciones ambientales de cada sitio de plantación de los ensayos de progenie de *P. patula* promovieron modificaciones en las características morfológicas y anatómicas de las acículas de los árboles a la edad de 2 años. El ejido Ojo de Agua registró menor temperatura, precipitación y pendiente 3%, influyeron de manera positiva en el número de acículas por fascículo, tamaño de la acícula, vaina, número de hileras estomáticas en la cara abaxial y adaxial, en contraste tuvieron valores menores las acículas de los árboles en el rancho Tlatoxca.

2.8 Literatura citada

- Adobe (2012). Photoshop. (versión 13.0.121). Windows. USA
- Andreu, L. G. I., y Fernández, Y. T. (2006). Caracterización morfométrica de la población de *Pinus hartwegii* Lindl. del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Ra Ximhai: Revista Científica de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sostenible*. 2(2): 449-468.
- Azcárraga, R. M., Jacques-Ríos, M. A., Bonfil-Campos, A., y Sandoval-Zapotitla, E. (2010). Atlas de Anatomía Vegetal. *Universidad Nacional Autónoma de México*. 276 pág.
- Beneš, K. (1968). On the stainability of plant cell walls with alcian blue. *Biologia plantarum*, 10(4), 334-346.
- Canny, M. J. (1993). Transfusion tissue of pine needles as a site of retrieval of solutes from the transpiration stream. *New Phytologist*, 123(2), 227-232.
- Castelán Lorenzo, M., y Arteaga Martínez, B. (2009). Establecimiento de regeneración de *Pinus patula* Schl. et Cham., en cortas bajo el método árboles padres. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(1), 49-57.
- Castillo, R. F. D., Terrazas, T., Trujillo-Argueta, S., y Rivera-García, R. (2020). Use of remote sensing and anatomical evidence at contrasting elevations to infer climate change sensitivity: preliminary results in *Pinus patula*. *Botanical Sciences*, 98(2), 248-263.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2014). Manual técnico para el establecimiento de ensayos de procedencias y progenies. México. 140 pág. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/19/0Manual%20Te%CC%81cnico%20para%20el%20Establecimiento%20de%20Ensayos.pdf>
- Donnelly, K., Cavers, S., Cottrell, J. E., y Ennos, R. A. (2016). Genetic variation for needle traits in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Tree Genetics & Genomes*, 12, 1-10.
- Dvorak, W. S., Hodge, G. R., Kietzka, J. E., Malan, F., Osorio, L. F., y Stanger, T. K. (2000). *Pinus patula*. Conservation and testing of tropical and subtropical forest tree species by the CAMCORE Cooperative. 148-173.

- Espinoza-Pelcastre, C., Hernández-León, S., Gernandt, D. S., Arce-Cervantes, O., Rodríguez-Laguna, R., y 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. doi:<https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.167>
- Farjon, A., y Styles, B. T. (1997). Flora Neotrópica Monograph 75 *Pinus* (Pinaceae). *New York Botanical Garden*. 291 pág.
- Fick, S. E., y 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
- Fuentes Amaro, S. L. (2022). Establecimiento de dos ensayos de progenie de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl et Cham. en la zona centro de su distribución. Tesis doctoral. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo, México. 107 pág.
- Geda-López, G., Sotolongo-Sospedra, R., y 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.
- Geda-López, G., Sotolongo Sospedra, R., Pérez del Valle, L., y Ramírez Hernández, R. (2021). Diferenciación anatómica foliar en poblaciones naturales de *Pinus caribaea* (Pinaceae) en Pinar del Río y Artemisa, Cuba. *Revista del Jardín Botánico Nacional*, 42, 175-188.
- Grill, D., Tausz, M., Pöllinger, U. T. E., Jiménez, M. S., y Morales, D. (2004). Effects of drought on needle anatomy of *Pinus canariensis*. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 199(2), 85-89.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2006). Conjunto de datos vectoriales, escala 1:1,000,000. Precipitación media anual.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2008). Conjunto de datos vectoriales, escala 1:1,000,000. Unidades Climáticas.
- León Soto, H. E. (2020). Evaluación de canales resiníferos y resina en un ensayo de progenies de *Pinus pringlei* Shaw en el sitio La Calera del estado de Michoacán,

- México. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 44 pág.
- Martínez, M. (1992). *Los pinos mexicanos* (Tercera ed.). Edit. Botas. México. 341 pág.
- Martiñón-Martínez, R. J., Vargas-Hernández, J., López-Upton, J., Gómez-Guerrero, A., y Vaquera-Huerta, H. (2010). Respuesta de *Pinus pincheana* Gordon a estrés por sequía y altas temperaturas. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(3), 239-248.
- Nikolić, B., Bojović, S., y Marin, P. D. (2016). Morpho-anatomical properties of *Pinus heldreichii* needles from natural populations in Montenegro and Serbia. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 150(2), 254-263. <https://doi.org/10.1080/11263504.2014.984008>
- Núñez Farfán, J., Careaga, S. A., Fornoni, J., Ruiz Montoya, L., y Valverde, P. L. (2003). La evolución de la plasticidad fenotípica. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 6(1), 16-24.
- Pérez-del Valle, L., Geada-López, G., y Sotolongo-Sospedra, R. (2020). Anatomía foliar comparada de *Pinus caribaea* var. *caribaea* y *P. tropicalis* (Pinaceae) en asociación simpátrica. *Revista del Jardín Botánico Nacional*, 41, 163-174.
- Pérez Olvera, C. d., y Ceja, R. J. (2019). Anatomía de la hoja de seis especies de *Pinus* del estado de Durango, México. *Madera y Bosques*, 25(1). doi:<https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511698>
- Perry, J. P. (1991). *The pines of Mexico and Central America*. Portland, Oregon, USA. 231 pág.
- Ramos, J. M. (2002). El pinar. Ababol. *Revista del Instituto Cultural y de Estudios del Rincón de Ademuz*, (31), 14-17.
- Rodríguez-Laguna, R., y Capo-Arteaga, M. A. (2005). Morfología de acículas y conos en poblaciones naturales de *Pinus arizonica* Engelm. *Revista Ra Ximhai: Revista científica de sociedad, cultura y desarrollo sostenible*, 1(1), 131-152.
- Rodríguez Vásquez, M., Rodríguez Ortiz, G., Enríquez Del Valle, J. R., Campos Ángeles, G. V., Velasco Velasco, V. A., y Hernández Hernández, A. (2021). Ensayo de progenies y huertos semilleros de especies forestales en México. *Agrociencia*, 8 (1), 79-88.

- Salaya-Domínguez , J. M., López Upton , J., y Vargas Hernández , J. J. (2012). Variación genética y ambiental en dos ensayos de progenies de *Pinus patula*. *Agrociencia*, 46 (5): 519-534.
- Sánchez, L. G., y Prada, M. A. (1993). Los pinos como especies básicas de la restauración forestal en el medio mediterráneo. *Ecología*, 7, 113-126.
- Sandoval Zapotitla, E. (2005). Técnicas aplicadas al estudio de la anatomía vegetal. *Universidad Nacional Autónoma de México* (Primera ed.) Edit. UNAM. México. 278 pág
- SAS Institute (2002). Statistical Analysis System versión 9.00. The SAS institute Inc. Cary, NC, USA.
- Trópicos. (2022). *Tropicos.org. Missouri Botanical Garden*. Consultado el 18 de Octubre de 2022. Disponible en <https://tropicos.org/name/24900369>
- Velázquez, M. A., Ángeles P, G., Llanderal O, T., Román J, A., y Reyes H, J. V. (2004). Monografía de *Pinus patula*. CONAFOR/Colegio de Postgraduados. 124 p.
- Vilela, E., & Castellanos, S. A. (2000). *Pinus chiapensis*: Un enfoque ecológico de su anatomía foliar. *Polibotánica*, (11), 111-120.
- Viveros-Viveros, H., Camarillo Luna, A. R., Sáenz Romero, C., y Aparicio Rentería, A. (2013). Variación altitudinal en caracteres morfológicos de *Pinus patula* en el estado de Oaxaca (México) y su uso en la zonificación. *Revista Bosque* 34(2), 173-179.
- Wayne, R. (s.f). Image J. (versión 1.50i). National Institutes of Health, USA.
- White, T. L., Adams, W. T., y Neale, D. B. (Eds.). (2007). Forest genetics. Cabi Publishing. 661 pág.
- Wormald, T. (1975). *Pinus patula*. Tropical Forestry Paper no. 7. Department of forestry. University of Oxford. 172 pág.

Capítulo III

Características morfológicas de la copa de árboles de *Pinus patula* Schiede ex Schldl et Cham. en un ensayo de progenie para protección al suelo

Resumen

En México, los ensayos de progenie son poco comunes, están dirigidos a evaluar la calidad genética de individuos selectos y comparar su desempeño en campo; sin embargo, cumplen con otros propósitos que pueden ser evaluados como la protección al suelo. El objetivo del estudio fue evaluar las características morfológicas de los árboles en un ensayo de progenie para identificar a las familias con características deseables y protección al suelo. Al inicio del otoño-invierno 2021 y primavera-verano 2022, en campo se midieron variables de altura, diámetro y características de copa; para generar mediante ecuaciones variables compuestas como: área de proyección de copa sobre el suelo (APCS) y área de intercepción lumínica de la copa (AIRC). La plantación tuvo un diseño experimental de 21 bloques completamente al azar con 64 familias por bloque. El análisis de la varianza mostró diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$) entre familias en todas las variables y periodos de evaluación. En altura, los árboles del ensayo, incrementaron el 54.5% del otoño-2021 (208.7 cm) a verano-2022 (322.4 cm). El promedio del diámetro de la plantación aumentó el 112.7% del otoño 2021 (16.6 mm) a verano 2022 (35.5 mm); en ambas variables, las familias 21, 33, 48 y 66 exhibieron los promedios más altos para todas las evaluaciones. Referente a la cobertura del suelo los árboles de las familias 51 (1.69 m²), 29 (1.88 m² y 2.1 m²) y 55 (4.44 m²) mostraron valores mayores de APCS, superando a las medias generales de cada estación. En AIRC, las familias que mostraron los valores más altos fueron la 33, 48 y 66. Se concluye que existe variación en el ensayo de progenie, importante para la identificación de individuos con características deseables de protección al suelo en menor tiempo.

Palabras clave

Altura, copa, cobertura, diámetro, familia, morfología, procedencia, proyección de copa.

Abstract

Progeny trials are rarely established in Mexico; they are aimed at evaluating the genetic quality of selected individuals to compare their performance in the field. However, they fulfill other purposes that can be evaluated such as soil protection. The objective of the study was to evaluate the morphological characteristics of the trees in a progeny trial, to identify families with desirable characteristics at soil protection. At the beginning of autumn-winter 2021 and spring-summer 2022, variables of height, diameter and crown characteristics were measured in the field; to generate through compound variable equations such as: crown projection area on the ground, crown light interception area. The plantation had an experimental design of 21 completely randomized blocks with 64 families per block. The analysis of variance showed significant statistical differences ($P \leq 0.0001$) between families in all variables and evaluation periods. In height, the trees in the trial increased 54.5% from autumn-2021 (208.7 cm) to summer-2022 (322.4 cm). The average plantation diameter increased 112.7% from fall 2021 (16.6 mm) to summer 2022 (35.5 mm). In both variables, families 21, 33, 48 and 66 exhibited the highest averages for all evaluations. Regarding soil cover, trees from families 51 (1.69 m²), 29 (1.88 m² and 2.1 m²) and 55 (4.44 m²) showed higher crown projection area on the ground values, exceeding the general averages for each station. In the crown light interception area, the families that showed the highest values were 33, 48 and 66. It is concluded that there is variation in the progeny test, important for the identification of individuals with desirable soil protection characteristics in less time.

Keywords

Cover, crown, crown projection, diameter, family, height, morphology, origin.

3.1 Introducción

Los bosques templados, albergan especies de suma importancia que aportan bienes y servicios ambientales (Flores *et al.*, 2019). Son componentes esenciales de los ciclos biogeoquímicos, fundamentales para el ciclo y almacén temporal del agua, importantes para la captura de carbono atmosférico y refugio natural para la fauna (Moctezuma y Flores, 2020). Cumplen un rol ecológico importante como el reciclaje de nutrientes, conservación de la biodiversidad, regulación climática (Oyarzún *et al.*, 2005) y protección de los suelos por la forma y tamaño de sus copas (Domínguez *et al.*, 2006).

Diversos factores están provocando el deterioro de estos bosques, particularmente del género *Pinus* (Aguirre y Pérez, 2015). La sobreexplotación y tala ilegal, así como, el cambio de uso de suelo (aumento de zonas agrícolas, ganaderas y urbanización) (Rzedowski, 2006). Sumado a lo anterior, el desequilibrio de factores bióticos (expansión de plagas y enfermedades) provocado por el calentamiento global (Arregui y Pérez, 2015) incrementa la temperatura y disminuye la precipitación (Gutiérrez y Trejo, 2014).

Pinus patula Schiede ex Schltdl et Cham. es una especie de zonas templadas, ampliamente aprovechada para fines maderables y uno de los principales taxones con mayor volumen cosechado en México (Flores y Moctezuma, 2021). Durante los aprovechamientos de esta especie, se alteran los suelos en las áreas intervenidas y quedan desprovistas de cobertura vegetal, pero es necesario que se establezca la regeneración natural de manera homogénea para asegurar la continuidad de las masas forestales por medio de reforestación (Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, 2020) que brinde protección a los suelos a corto plazo (Gómez *et al.*, 2012).

En la actualidad existe poca información sobre el tiempo que la copa de los árboles de *P. patula* tarda en cubrir el suelo en plantaciones forestales con fines comerciales o de restauración (Gutiérrez, 2007). Sin embargo, en los últimos años, se han establecido ensayos de progenie con el propósito de evaluar individuos selectos y comparar su desempeño en campo (CONAFOR, 2014) y aunque están dirigidos a evaluar calidad genética de individuos y su descendencia (Ipinza, 1998) es importante evaluar la forma y tamaño de la copa de los árboles ya que reflejan el potencial de crecimiento y cobertura al suelo (Domínguez *et al.*, 2006). De manera que se

identifiquen árboles con copas amplias que en el menor tiempo generen cobertura y protección del suelo contra la erosión hídrica.

3.2 Objetivo general

Evaluar características morfológicas y de cobertura de suelo de árboles de *Pinus patula* en un ensayo de progenie establecido en Huayacocotla, Veracruz.

3.3 Hipótesis

Existe variación en las características morfológicas y cobertura de suelo entre familias de árboles de *Pinus patula* en un ensayo de progenie.

3.4 Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en un ensayo de progenie de árboles de *Pinus patula*, establecido en octubre del 2019, en el ejido Ojo de Agua, municipio de Huayacocotla en el estado de Veracruz, ubicado en las coordenadas 20°28'21" LN, 98°29'56" LO, a 2310 m.s.n.m (Fig. 11) con clima C(w2) templado subhúmedo (INEGI, 2008), precipitación anual de 1004 mm y temperatura media anual de 14.7°C (Fick y Hijmans, 2017).

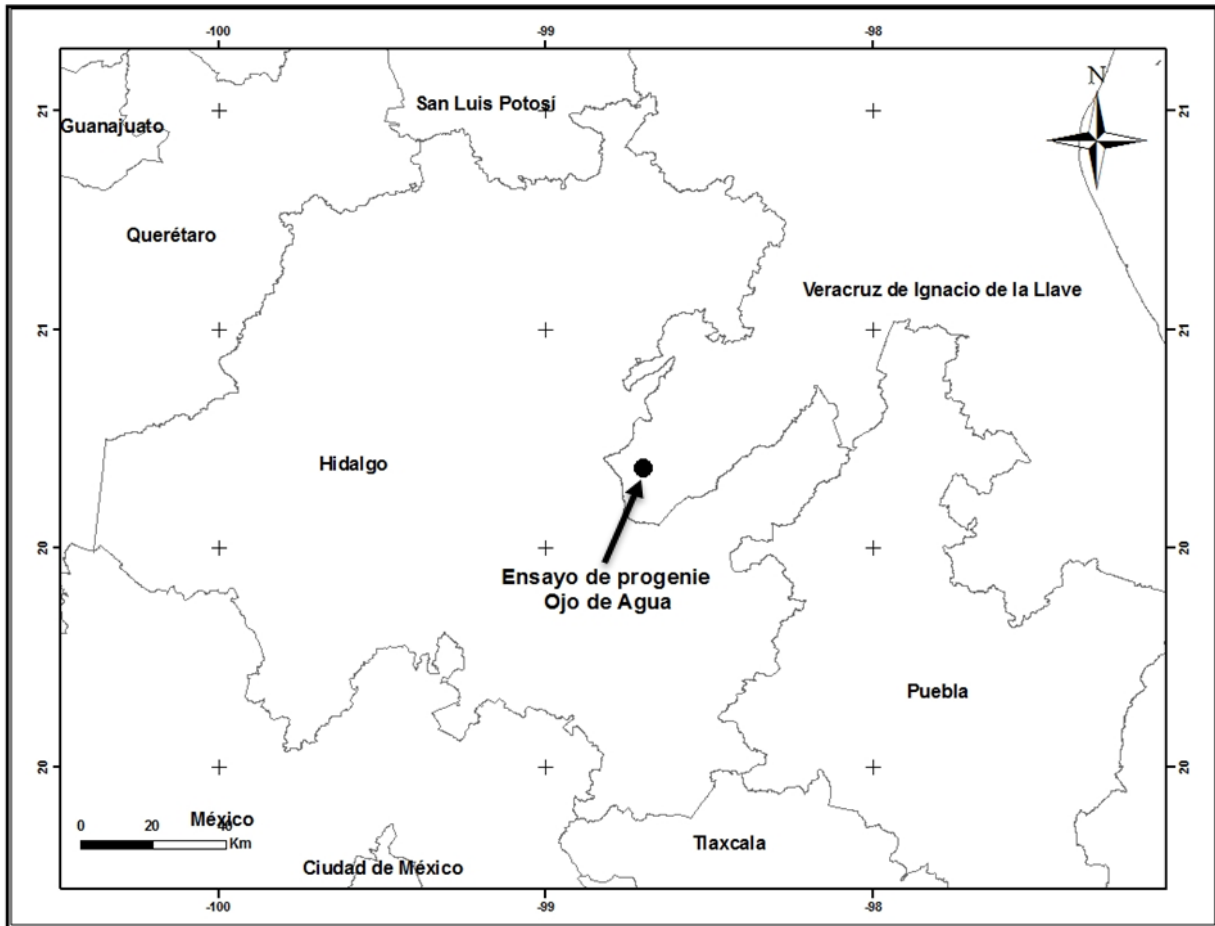


Figura 11. Localización del ensayo de progenie establecido en el ejido Ojo de Agua en Huayacocotla, Veracruz.

Antecedentes de la plantación (ensayo de progenie)

Colecta de germoplasma

El germoplasma colectado corresponde con 64 progenies de polinización abierta procedentes de rodales naturales de los estados de Hidalgo, Puebla y Veracruz (Cuadro 8). Los criterios para la selección de árboles madre (plus) fueron capacidad de autopoda, fuste recto, rápido crecimiento, libre de plagas y enfermedades; además de la presencia de estróbilos femeninos maduros. Se fijó una distancia de separación de 100 metros entre árboles, para evitar el parentesco entre individuos (CONAFOR, 2014).

Cuadro 8. Procedencia y número de árboles superiores de donde se recolectó germoplasma (progenies) para el establecimiento del ensayo de progenie.

Número de progenies	Estado	Municipios
1-25	Puebla	Ahuazotepec, Tlatlauquitepec y Zacatlán
26-35	Hidalgo	Meztitlán, Zacualtipán de Ángeles
36-60	Veracruz	Huayacocotla
61-75	Hidalgo	Acaxochitlán, Agua Blanca de Iturbide, San Bartolo Tutotepec, Tlahuiltepa y Zacualtipán de Ángeles

Las progenies 13, 14, 17, 19, 20, 25 y 26 se descartaron de plantar en el ensayo de progenie, por obtener poca semilla y porcentajes bajos de germinación en vivero.

Producción de planta

La producción de planta se realizó en contenedores de plástico negro de 320 cc en las instalaciones del vivero forestal del Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Se utilizó la mezcla de sustrato 60-15-15-10 de aserrín, tezontle, turba de musgo, vermiculita y 8 g por litro de fertilizante de liberación controlada (15-07-15+2MgO+ME) de ocho meses. La planta tenía la edad de nueve meses al momento de la plantación.

Descripción del área de estudio

El ensayo de progenie, se estableció en un terreno agrícola abandonado, con una ligera pendiente de 3%. Debido al uso anterior, en el sitio se eliminó la vegetación arbustiva y herbácea; y se pasó una rastra en dos ocasiones para dejar el suelo con características deseables de cultivo. La plantación se hizo con un diseño en marco real, se plantó en cepa común con espaciamiento de 3 m x 3 m entre planta y se estableció una hilera de árboles como franja de protección en el perímetro del ensayo.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar, con 21 bloques y 64 progenies (familias) asignadas al azar en cada bloque, la parcela experimental fue de un árbol por progenie por bloque.

Medición de características morfológicas

Se realizaron cuatro mediciones continuas que corresponden al inicio de cada estación del año, la primera fue en septiembre (otoño-2021), diciembre (invierno-2021), marzo (primavera-2022) y junio (verano-2022). En campo se midieron variables de altura total del árbol, altura a la primera rama viva de la copa y altura a la rama más amplia de la copa se utilizó un estadal graduado en centímetros. El diámetro normal se midió con vernier digital marca Mitutoyo® de 20 centímetros con aproximación al milímetro. El diámetro de la copa en dirección norte-sur y este-oeste se midió con flexómetro Cadena® modelo MGA5020 en centímetros.

Procesamiento de los datos

Con los datos de las variables medidas en campo (altura total, altura a la primera rama viva, altura a la rama más amplia de la copa, diámetro de copa en dirección N-S y E-O), se procedió a calcular algunas variables compuestas en gabinete utilizando ecuaciones para características de copa como: área de intercepción lumínica de la copa, área de proyección de copa sobre el suelo (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2009).

El área de intercepción lumínica de la copa se entiende como la parte con mayor actividad fotosintética (Jiménez *et al.*, 2002) y el cálculo se realizó con la siguiente fórmula:

$$AILC = \frac{\pi * r}{6LC^2} \left[(4LC^2 + r^2)^{\frac{3}{2}} - r^3 \right]$$

Donde:

AILC: área de intercepción lumínica de la copa (m²).

LC: longitud de la copa del árbol (m). Se obtiene de la resta de la longitud a la primera rama viva del árbol a la longitud total del árbol.

r: radio de la copa (m)

El área de proyección de copa sobre el suelo se expresa en m² y es la superficie de cobertura que ejercen los árboles sobre el suelo (Jiménez *et al.*, 2002); se estimó por medio de la siguiente ecuación:

$$APCS = \frac{\pi}{4} * DPC^2$$

Donde:

APCS: área de proyección de copa sobre el suelo (m²)

DPC: diámetro promedio de la copa (m). Se obtiene del promedio resultante de las mediciones de la copa del árbol en dirección norte-sur y este-oeste.

Análisis de datos

A los datos de altura total, diámetro normal, área de proyección de copa sobre el suelo, área de intercepción lumínica de la copa, se les realizó análisis de varianza y aquellas variables que presentaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$), se les aplicó la prueba de comparación de medias Tukey en el software SAS versión 9.0 (SAS, 2002).

3.5 Resultados

Altura

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$) entre familias para la variable altura total de los árboles en las cuatro evaluaciones realizadas en el ensayo de progenie del ejido Ojo de Agua, municipio de Huayacocotla, Veracruz (Cuadro 9).

Cuadro 9. Significancia de altura total en familias de un ensayo de progenie de *P. patula* de 2-3 años en el ejido Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver.

Evaluación	Fuente	GL	CM	Valor de <i>F</i>	<i>Pr > F</i>
Otoño 2021	Familia	63	1712.93	2.50	0.0001
Invierno 2021	Familia	63	2583.29	3.20	0.0001
Primavera 2022	Familia	63	3804.49	3.63	0.0001
Verano 2022	Familia	63	5077.04	3.53	0.0001

CM: cuadrado de la media, GL: grados de libertad.

A la edad de un año 11 meses (otoño 2021) los árboles del ensayo de progenie de *P. patula*, en general mostraron en promedio 208.7 cm en altura total. La familia 48 (procedencia del ejido La Selva, municipio de Huayacocotla) superó la media general del ensayo con el 11.2% (232.1 cm) mientras que los árboles de la familia 63 (procedencia de ejido Cumbre de Muridores, municipio de San Bartolo Tutotepec) mostraron los menores crecimientos en promedio 192.6 cm, de modo que, hubo diferencia del 21% entre las familias contrastantes (Figura 12a).

Los árboles durante la estación del otoño 2021 (evaluación inicio del invierno 2021) incrementaron en promedio 15.6 cm de altura total que corresponde al 7.5%. La altura promedio al inicio del invierno 2021 fue de 224.3 cm. Los árboles de la familia 66 (procedencia del municipio de Tlahuiltepa) registraron los valores mayores (255.1 cm)

en altura mientras que la familia 63 (procedencia de ejido Cumbre de Muridores, municipio de San Bartolo Tutotepec) presentó el valor promedio menor (203.4 cm) con diferencia entre familias del 25.4% (203.4 cm contra 255.1 cm) (Figura 12b).

La medición realizada al inicio de la primavera 2022 (periodo de invierno 2021) los árboles en general incrementaron 17.9 cm en altura total. La altura promedio de la plantación fue de 242.2 cm. Los árboles de las familias contrastantes tuvieron la diferencia de 58.5 cm en altura a la edad de 2 años 5 meses con valores de 217.8 cm y 276.3 cm que corresponden a la familia 63 (procedencia de ejido Cumbre de Muridores, municipio de San Bartolo Tutotepec) y 66 (procedencia del municipio de Tlahuiltepa) respectivamente (Figura 12c).

Los árboles durante el periodo de primavera 2022 (evaluación inicio de verano 2022) incrementaron en promedio 80.2 cm de altura total. La altura promedio de la plantación fue de 322.4 cm. Al hacer la comparación de las evaluaciones realizadas al inicio de otoño-2021 hasta inicio de verano-2022 (9 meses) los árboles incrementaron 113.7 cm en altura. A la edad de 2 años 8 meses los árboles de la familia 66 (procedencia del municipio de Tlahuiltepa) tuvieron las mayores alturas (363.14 cm) mientras que la familia 4 (procedencia del municipio de Tlatlauquitepec, Puebla) reportó el menor crecimiento (294.9 cm) en la misma fecha de evaluación (Figura 12d).

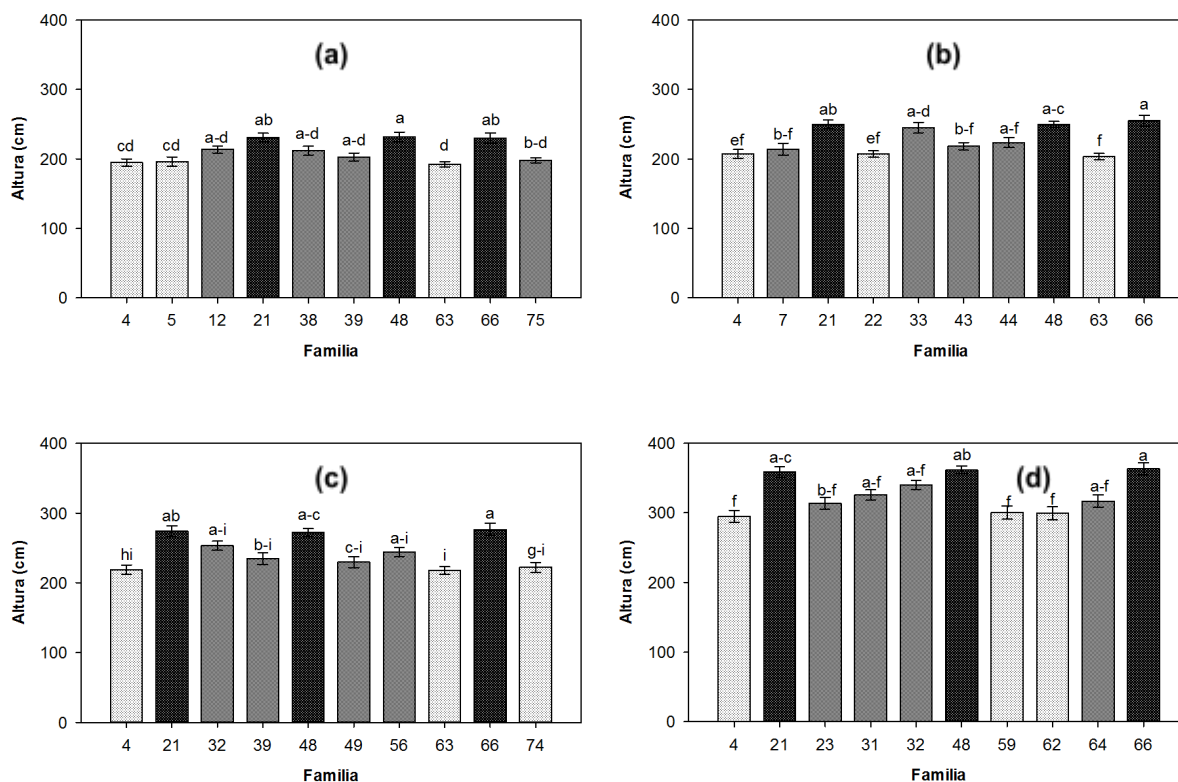


Figura 12. Altura total de árboles de un ensayo de progenie de *P. patula* en el centro de su distribución natural. (a) inicio del otoño 2021(1 año 11 meses de edad), (b) inicio del invierno 2021 (2 años 2 meses de edad), (c) inicio de primavera 2022 (2 años 5 meses de edad), (d) inicio del verano 2022 (2 años 8 meses de edad). De las 64 familias estudiadas, se graficaron tres familias sobresalientes, cuatro familias intermedias y tres familias con el menor valor. Las barras con la misma letra son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$).

Diámetro

La variable de diámetro normal mostró diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$) entre familias en las evaluaciones realizadas al inicio del otoño e invierno del 2021 e inicio de la primavera y verano del 2022 en el ensayo de progenie establecido en el ejido Ojo de Agua, municipio de Huayacocotla, Veracruz (Cuadro 10).

Cuadro 10. Significancia del diámetro normal en familias de un ensayo de progenie de *P. patula* de 2-3 años en el ejido Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver.

Evaluación	Fuente	GL	CM	Valor de <i>F</i>	<i>Pr > F</i>
Otoño 2021	Familia	63	42.99	3.75	0.0001
Invierno 2021	Familia	63	57.07	3.52	0.0001
Primavera 2022	Familia	63	79.29	3.09	0.0001
Verano 2022	Familia	63	112.45	3.18	0.0001

CM: cuadrado de la media, GL: grados de libertad.

Los árboles en el ensayo de progenie de *P. patula* plantados en el ejido Ojo de Agua, mostraron en promedio 16.6 mm en diámetro normal a la edad de 1 año 11 meses (evaluación inicio de otoño 2021). La familia 48 (procedencia del ejido La Selva, municipio de Huayacocotla) superó a la media general del ensayo con el 24.3% (20.6 mm) mientras que los árboles de la familia 63 (procedencia de ejido Cumbre de Muridores, municipio de San Bartolo Tutotepec) mostraron los menores crecimientos en promedio 14.4 mm, de modo que, hubo diferencia del 43.2% entre las familias contrastantes (Fig. 13a).

Los árboles durante la estación del otoño-2021 (evaluación invierno 2021) incrementaron en promedio 3.6 mm de diámetro normal. El diámetro promedio de la plantación al inicio del invierno-2021 fue de 20.2 mm. Los árboles de la familia 48 registraron los valores mayores (24.1 mm), mientras que los de la familia 63

presentaron el valor promedio menor (17.4 mm) con diferencia entre familias extremas del 25.4% (17.4 mm en comparación con 24.1 mm) (Fig. 13b).

El incremento durante el periodo de invierno-2021 (evaluación a inicio de primavera 2022) los árboles en general incrementaron 5.1 mm en diámetro normal . El diámetro promedio de la plantación fue de 25.3 mm. Los árboles de las familias contrastantes tuvieron la diferencia de 9.7 mm en diámetro normal a la edad de 2 años 5 meses con valores de 21.3 m y 31 mm que corresponden a la familia 63 y 48 respectivamente (Fig. 13c).

El incremento en diámetro normal de los árboles en el ensayo de progenie de *P. patula* durante el periodo de primavera-2022 (evaluación inicio de verano 2022) fue en promedio 10 mm . El diámetro promedio de la plantación fue de 35.3 mm. Al hacer la comparación de las evaluaciones realizadas al inicio de otoño-2021 hasta inicio de verano-2022 (9 meses) los árboles del ensayo de progenie de *P. patula* incrementaron 16.4 mm en diámetro. A la edad de 2 años 8 meses los árboles de la familia 48 (procedencia ejido La Selva, Huayacocotla) tuvieron los mayores diámetros (42.3 mm) mientras que la familia 22 (procedencia ejido Beristaín, municipio de Ahuazotepec, Puebla) reportó el menor crecimiento (31.5 mm) en la misma fecha de evaluación (Fig. 13d).

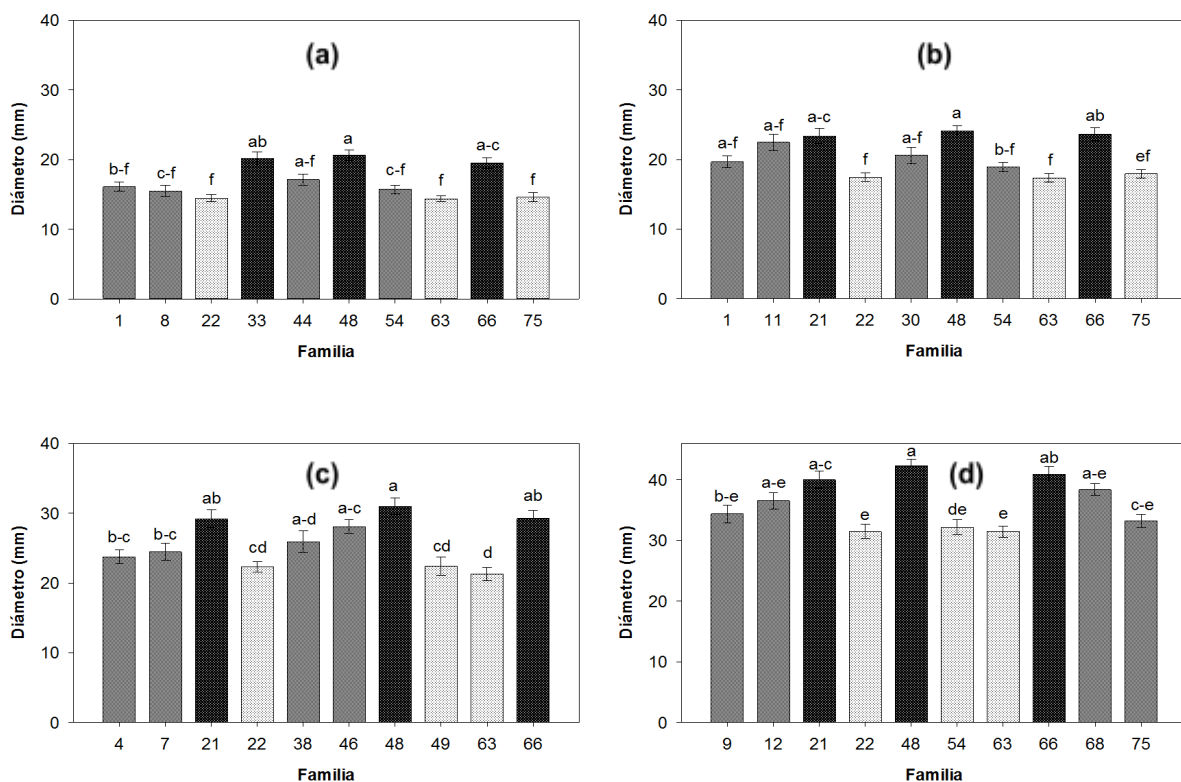


Figura 13. Diámetro normal de árboles de un ensayo de progenie de *P. patula* en el centro de su distribución natural. (a) inicio del otoño 2021(1 año 11 meses de edad), (b) inicio del invierno 2021 (2 años 2 meses de edad), (c) inicio de primavera 2022 (2 años 5 meses de edad), (d) inicio del verano 2022 (2 años 8 meses de edad). De las 64 familias estudiadas, se graficaron tres familias sobresalientes, cuatro familias intermedias y tres familias con el menor valor. Las barras con la misma letra son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$).

Área de proyección de copa sobre el suelo

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$) entre familias para la variable área de proyección de copa sobre el suelo en las cuatro evaluaciones realizadas en el ensayo de progenie establecido en el ejido Ojo de Agua, municipio de Huayacocotla, Veracruz (Cuadro 11).

Cuadro 11. Significancia en el área de proyección de copa sobre el suelo en familias del ensayo de progenie de *P. patula* de 2-3 años en el ejido Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver.

Evaluación	Fuente	GL	CM	Valor de <i>F</i>	<i>Pr</i> > <i>F</i>
Otoño 2021	Familia	63	0.308	2.51	0.0001
Invierno 2021	Familia	63	0.374	2.68	0.0001
Primavera 2022	Familia	63	0.457	2.65	0.0001
Verano 2022	Familia	63	2.41	3.27	0.0001

CM: cuadrado de la media, GL: grados de libertad.

A la edad de 1 año y 11 meses de plantados los árboles en el ensayo de progenie de *P. patula* en el ejido Ojo de Agua (evaluación inicio de otoño 2021), mostraron en promedio general 1.39 m² de área de proyección de copa sobre el suelo. Se debe aclarar que los árboles se han mantenido sin poda en la copa desde que fueron plantados. Los árboles de la familia 51 (procedencia ejido Ojo de Agua, municipio de Huayacocotla), presentaron mayor cobertura de suelo de hasta 1.69 m², la cual superó a la media general con el 21.6% (1.39 m²) mientras que la familia 22 (procedencia del ejido Beristaín, municipio de Ahuazotepec, Puebla) exhibió el promedio menor (1.11 m²), de modo que, hubo diferencia del 52.3% entre las familias contrastantes (Figura 14a). Para esta fecha en promedio general el área de proyección de copa sobre el suelo en el ensayo de progenie fue de 15.4%.

Los árboles durante el periodo de otoño-2021 (evaluación inicio del invierno 2021) incrementaron en promedio 0.13 m² de área de proyección de copa sobre el suelo. El promedio de la plantación al inicio del invierno-2021 fue de 1.52 m². Los árboles de la familia 29 (procedencia del municipio de Metztlán) registraron los valores mayores (1.88 m²), mientras que la familia 22 (procedencia del ejido Beristaín, municipio de Ahuazotepec, Puebla) presentó el valor promedio menor (1.23 m²) con diferencia entre familias del 53.2% (1.23 m² en comparación con 1.88 m²) (Figura 14b). A la edad de 2 años y 2 meses el promedio general el área de proyección de copa sobre el suelo en el ensayo de progenie fue de 16.9%.

La cobertura sobre el suelo en el periodo de invierno-2021 (evaluación inicio de la primavera 2022) los árboles aumentaron 0.23 m² en área de proyección de copa sobre el suelo. El promedio general de la plantación fue de 1.75 m². Los árboles de las familias contrastantes tuvieron la diferencia de 0.7 m² en la cobertura de suelo de 2.4 años con valores de 1.4 m² y 2.1 m² que corresponden a la familia 22 (procedencia del ejido Beristaín, municipio de Ahuazotepec, Puebla) y 29 (procedencia del municipio de Metztlán, Hidalgo) respectivamente (Figura 14c). A la edad de 2 años y 5 meses el promedio general el área de proyección de copa sobre el suelo en el ensayo de progenie fue de 19.4%.

El área de proyección de copa sobre el suelo aumentó durante el periodo de primavera-2022 (evaluación inicio de verano 2022) en promedio 1.75 m² de cobertura de suelo que corresponde al 100%. El promedio general de la plantación fue de 3.5 m² por árbol. Al hacer la comparación de las evaluaciones realizadas al inicio de otoño-2021 hasta inicio de verano-2022 (9 meses) los árboles del ensayo de progenie de *P. patula* incrementaron 2.11 m² en área de proyección de copa sobre el suelo. A la edad de 2.7 años los árboles de la familia 55 (procedencia ejido Ojo de Agua, municipio de Huayacocotla) tuvieron la mayor cobertura de suelo (4.44 m²) mientras que la familia 63 (procedencia ejido Cumbre de Muridores, municipio de San Bartolo Tutotepec) reportó el menor valor (2.95 m²) en la misma fecha de evaluación (Figura 14d). A la edad de 2 años y 8 meses el promedio general el área de proyección de copa sobre el

suelo en el ensayo de progenie fue de 38.9%. La familia 55 a la edad de 2.7 años llega a cubrir el 49.3% del suelo favoreciendo las condiciones ecológicas del sitio.

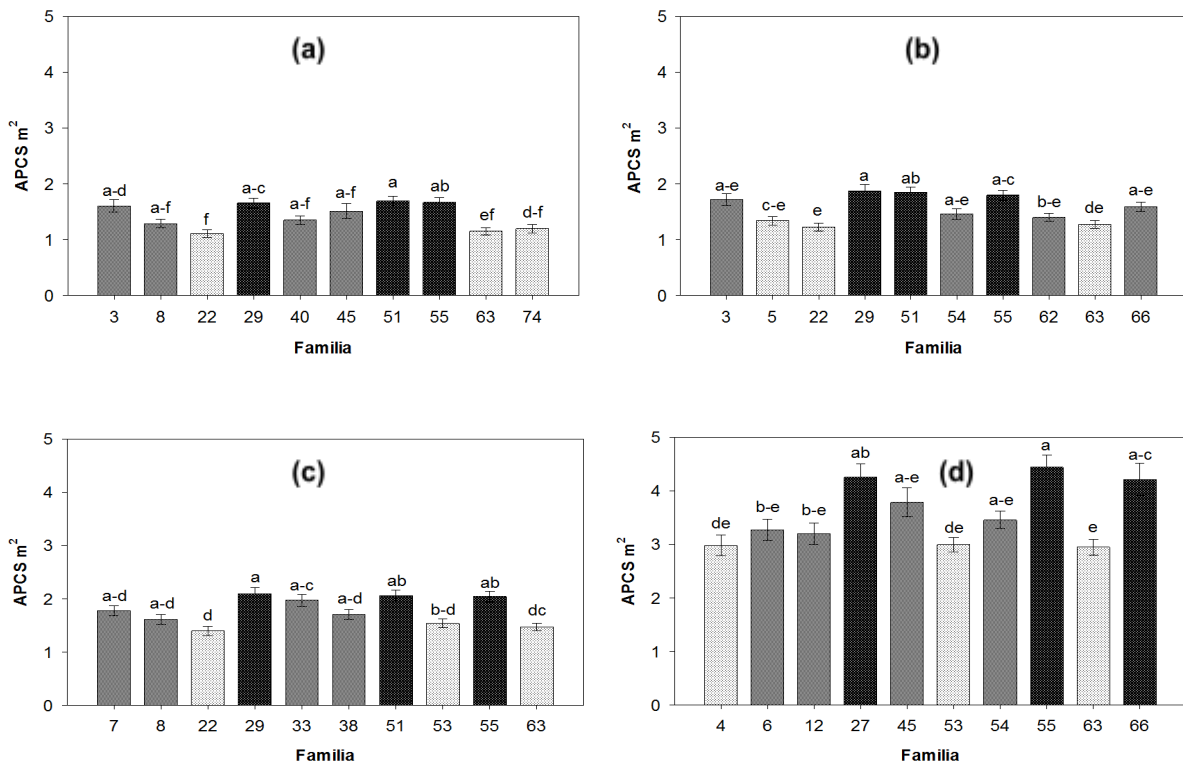


Figura 14. Área de proyección de copa sobre el suelo de árboles de un ensayo de progenie de *P. patula* en el centro de su distribución natural. (a) inicio del otoño 2021(1 año 11 meses de edad), (b) inicio del invierno 2021 (2 años 2 meses de edad), (c) inicio de primavera 2022 (2 años 5 meses de edad), (d) inicio del verano 2022 (2 años 8 meses de edad). De las 64 familias estudiadas, se graficaron tres familias sobresalientes, cuatro familias intermedias y tres familias con el menor valor. Las barras con la misma letra son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$).

Área de intercepción lumínica de la copa

El análisis de varianza, mostró diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$) entre familias para la variable área de intercepción lumínica de la copa, en las evaluaciones realizadas al inicio del otoño e invierno del 2021 e inicio de la primavera y verano del 2022 en el ensayo de progenie establecido en el ejido Ojo de Agua, municipio de Huayacocotla, Veracruz (Cuadro 12).

Cuadro 12. Significancia en el área de intercepción lumínica de la copa en familias del ensayo de progenie de *P. patula* de 2-3 años en el ejido Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver.

Evaluación	Fuente	GL	CM	Valor de <i>F</i>	<i>Pr</i> > <i>F</i>
Otoño 2021	Familia	63	2.499	2.67	0.0001
Invierno 2021	Familia	63	3.602	2.86	0.0001
Primavera 2022	Familia	63	5.605	3.20	0.0001
Verano 2022	Familia	63	22.810	3.58	0.0001

CM: cuadrado de la media, GL: grados de libertad

A la edad de 1 año 11 meses, los árboles plantados en el ensayo de progenie de *P. patula* en el ejido Ojo de Agua, mostraron en promedio 3.62 m² en área de intercepción lumínica de la copa. La familia 48 (procedencia del ejido La Selva, municipio de Huayacocotla) superó a la media general del ensayo con el 24.6% (4.51 m²) mientras que los árboles de la familia 22 (procedencia del ejido Beristán, municipio de Ahuazotepic, Puebla) mostraron los menores crecimientos en promedio 2.85 m², de modo que, hubo diferencia del 58.2% entre las familias contrastantes (Figura 15a).

Los árboles en el ensayo de progenie de *P. patula* durante el periodo de otoño-2021 incrementaron en promedio 0.62 m² de área de intercepción lumínica de la copa que corresponde al 17.2%. El promedio de la plantación al inicio del invierno-2021 fue de

4.24 m². Los árboles de la familia 48 (procedencia del ejido La Selva, municipio de Huayacocotla) registraron los valores mayores (5.27 m²), mientras que la familia 22 (procedencia del ejido Beristáin, municipio de Ahuazotepec, Puebla) presentó el valor promedio menor (3.29 m²) con diferencia entre familias del 60.4% (3.29 m² vs 5.27 m²) (Figura 15b).

En el periodo de invierno-2021 los árboles del ensayo de progenie de *P. patula* en general incrementaron 0.73 m² en área de proyección de copa sobre el suelo que representa el 17.3%. El promedio de la plantación fue de 4.97 m². Los árboles de las familias contrastantes tuvieron la diferencia de 2.38 m² en área de intercepción lumínica de la copa, a la edad de 2 años 5 meses con valores de 3.88 m² y 6.26 m² que corresponden a la familia 22 (procedencia del ejido Beristáin, municipio de Ahuazotepec, Puebla) y 48 (procedencia del ejido La Selva, municipio de Huayacocotla) respectivamente (Figura 15c).

Los árboles en el ensayo de progenie de *P. patula* durante el periodo de primavera-2022 incrementaron en promedio 5.58 m² de área de intercepción lumínica de la copa. El promedio de la plantación fue de 10.55 m². Al hacer la comparación de las evaluaciones realizadas al inicio de otoño-2021 hasta inicio de verano-2022 (9 meses) los árboles del ensayo de progenie de *P. patula* incrementaron 6.93 m² en área de intercepción lumínica de la copa. Los árboles de la familia 66 (procedencia municipio de Tlahuiltepa) tuvieron la mayor área (13.54 m²) a la edad de 2 años 8 meses mientras que la familia 4 (procedencia, municipio de Tlatlauquitepec, Puebla) reportó el menor crecimiento (8.64 m²) en la misma fecha de evaluación (Figura 15d).

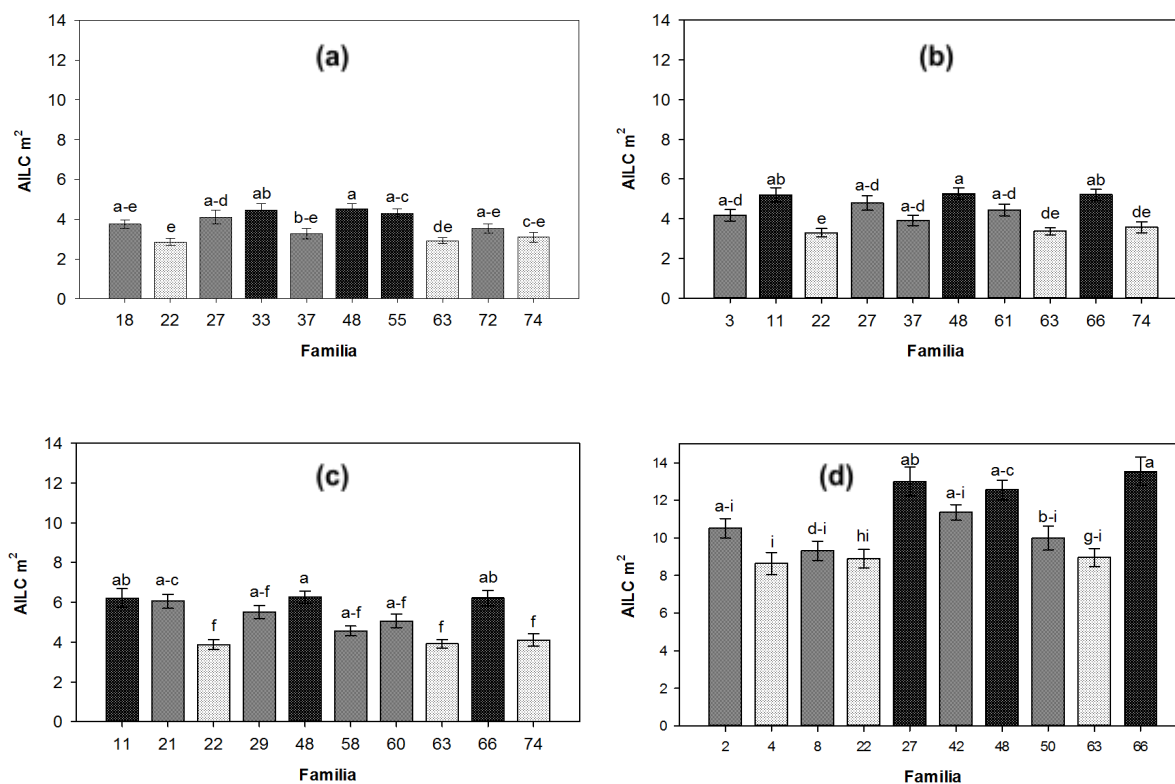


Figura 15. Área de intercepción lumínica de la copa (AILC) de árboles de un ensayo de progenie de *P. patula* en el centro de su distribución natural. (a) inicio del otoño 2021(1 año 11 meses de edad), (b) inicio del invierno 2021 (2 años 2 meses de edad), (c) inicio de primavera 2022 (2 años 5 meses de edad), (d) inicio del verano 2022 (2 años 8 meses de edad). De las 64 familias estudiadas, se graficaron tres familias sobresalientes, cuatro familias intermedias y tres familias con el menor valor. Las barras con la misma letra son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$).

3.6 Discusión

Discusión altura

Las plantas tienen capacidades diferentes para expresar rasgos morfológicos como proceso de adaptación (Chávez *et al.*, 2022). En este estudio, los resultados mostraron variación en la variable altura y se observó en algunas familias mayor crecimiento. Los resultados son similares a lo reportado por Morales *et al.* (2013) y Salaya-Domínguez *et al.* (2012) al evaluar ensayos de progenie de árboles de *P. patula* a los 4, 5 y 6 años de establecidos en campo, donde encontraron diferencias estadísticas significativas entre familias y solo algunas exhibieron mayor rendimiento. Este comportamiento se ha observado en otras especies del género *Pinus* como en el estudio de Fabián *et al.* (2020) en familias de medios hermanos de árboles de *Pinus oocarpa*, en el estudio de Arregui *et al.* (1999) en familias de árboles de *Pinus radiata* y Mendizábal *et al.* (2011) en un ensayo de procedencias con árboles de la especie de *Pinus maximinoi*. Se ha observado en otros estudios, como el de Hernández *et al.*, (2022) donde encontraron una relación positiva entre el tamaño de la copa y altura total del árbol donde los árboles más altos exhibieron mayor área de intercepción lumínica en la copa.

Discusión diámetro

Las familias de árboles de *P. patula* del ensayo de progenie presentaron variación altamente significativa en todos los periodos analizados. Los resultados difieren con Morales *et al.* (2013) donde encontraron diferencias estadísticas no significativas en progenies de árboles de *P. patula*. Pero coinciden con Camacho *et al.* (1999) en evaluaciones de dos ensayos de progenie de árboles de la misma especie, de 3 años de establecidos en campo; el diámetro reportado osciló entre 30-40 mm, semejante al presente estudio a la edad de 2 años 8 meses (35.3 mm). En otra especie, Valencia *et al.*, (2012) reportaron diferencias significativas entre procedencias de árboles de *Pinus greggii*, con valores en diámetro promedio de 27.3 mm a la edad de 2 años de establecidos en campo.

Discusión área de proyección de copa sobre el suelo

Las familias de árboles de *P. patula* mostraron diferencias estadísticas significativas en los periodos de evaluación. Algunas familias mostraron la mayor área de proyección de copa sobre el suelo (51, 29 y 55) mientras que otras el menor (22 y 63). En el estudio de Rodríguez-Laguna *et al.* (2009) reportaron diferencias estadísticas significativas en el área de proyección de copa sobre el suelo de árboles de *Pinus greggii* establecidos en un ensayo de procedencias; el promedio más alto reportado fue 0.85 m², a la edad de 4.5 años. En el ensayo de progenie de árboles de *P. patula* el promedio más alto encontrado fue 4.44 m², a la edad de 2 años 8 meses de establecidos en campo. Lo que significa tener menor riesgo de erosión de suelo en menor tiempo debido a la cobertura por las copas, además de tener menor superficie de suelo con la llegada de los rayos directos del sol provocando mayor temperatura en el sitio y mayor evaporación, condiciones ambientales que en exceso desfavorecen en el desarrollo de la vegetación.

Discusión área de intercepción lumínica de la copa

El área de intercepción lumínica de la copa de los árboles de *P. patula* del ensayo de progenie mostró diferencias estadísticamente significativas. Los resultados obtenidos por Rodríguez-Laguna *et al.*, (2009) mostraron diferencias en el AILC en un ensayo de procedencias de árboles de *Pinus greggii*. Schomaker, (2007) menciona que la dimensión de la copa está relacionada con el crecimiento y desarrollo de los árboles, ya que es el lugar donde se lleva a cabo el proceso de fotosíntesis. Hernández *et al.*, (2022), Reynoso *et al.*, (2021) encontraron una correlación positiva en árboles de *Pinus pseudostrobus*, *P. montezumae* y *P. oocarpa* entre el AILC y diámetro normal a 1.30 m. En este estudio, se observó que algunos de los árboles que presentaron el promedio mayor de AILC exhibieron diámetros más gruesos.

3.7 Conclusiones

Los árboles del ensayo de progenie de *Pinus patula* establecido en el ejido Ojo de Agua, Huayacocotla, Veracruz, tuvieron variación significativa entre las familias en las características morfológicas de la copa en el periodo de 1.9-2.7 años. Hubo árboles que a la edad de 1.9 años tuvieron 232.1 cm de altura, 20.6 mm de diámetro normal y 4.5 m² de área de intercepción lumínica de la copa (familia 48) y en un tiempo de 9 meses alcanzaron 363.1 cm de altura, 42.3 mm de diámetro (familia 48) y 13.5 m² de intercepción lumínica de la copa (familia 66). Referente a la cobertura de suelo se tuvieron árboles con 1.7 m² a la edad de 1.9 años (familia 51) y se cubría en promedio general el 15.4% de la superficie. Nueve meses después hubo árboles que cubrían 4.4 m² (familia 55) y el promedio general de la cobertura al suelo fue de 38.9% de la superficie. Las familias del ensayo de progenie de *P. patula* pueden usarse en plantaciones con fines de conservación y protección del suelo dentro del área de distribución natural de la especie ya que ofrecen mayores ventajas a corto plazo.

3.8 Literatura citada

- Arregui, A., Espinel, S., Aragonés, A., y Sierra, R. (1999). Estimación de parámetros genéticos en un ensayo de progenie de *Pinus radiata* D. Don en el País Vasco. *Inv. Agr. Sist. Rec. For.*, 8, 119-128.
- Arregui, R. Z., y Pérez, L. S. (2015). Resistencia de los pinos a plagas y enfermedades: nuevas oportunidades de control fitosanitario. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (39), 259-273.
- Camacho, V. R., Hernández, L. D. C. M., y Landa, J. A. (1999). Evaluación de familias comunes de *Pinus patula* Schl. et Cham. establecidas en dos ensayos de progenie. *Foresta veracruzana*, 1(2), 19-24.
- Chávez-García, A. S., Hernández-Ramos, J., Muñoz-Flores, H. J., García-Magaña, J. J., Gómez-Cardenas, M., y 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).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2014). Manual técnico para el establecimiento de ensayos de procedencias y progenies. Primera edición. 140 pág.
<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/19/0Manual%20Te%CC%81cnico%20para%20el%20Establecimiento%20de%20Ensayos.pdf>
- Domínguez Domínguez, M., Bravo, F., y Del Río, M. (2006). Modelos del tamaño de copa de *Pinus sylvestris* L. en bosques del centro de España. *Interciencia*, 31(3), 168-175.
- Fabián-Plesníková, I., Sáenz-Romero, C., Cruz de León, J., Martínez-Trujillo, M., y Sánchez-Vargas, N. M. (2020). Parámetros genéticos de caracteres de crecimiento en un ensayo de progenies de *Pinus oocarpa*. *Madera y Bosques*, 26(3), 1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632014>
- Fick, S. E., y 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.
- Flores, A., Pineda Ojeda, T., y Flores Ayala, E. (2019). Potencial de reforestación de seis especies de pino para la restauración de zonas degradadas. *Revista*

Mexicana de Ciencias Forestales, 10(55), 171-179.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i55.604>

- Flores, A., y Moctezuma-López, G. (2021). Cosecha de madera de 20 coníferas en zonas de movimiento de germoplasma. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(66), 122-140.
- Gómez-Romero, M., Soto-Correa, J. C., Blanco-García, J. A., Sáenz-Romero, C., Villegas, J., y Lindig-Cisneros, R. (2012). Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia*, 46(8), 795-807.
- Gutiérrez, B. (2007). Supervivencia, crecimiento inicial e interacción con el sitio de progenies de árboles plus de pino oregon *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.). *Ciencia e Investigación Forestal*, Instituto Forestal, Chile. 13(2), 273-285.
- Gutiérrez, E., y Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 179-188.
- Hernández-Ramos, J., Reyes-Hernández, V. J., Fierros-González, A. M., Buendía-Rodríguez, E., Quiñonez-Barraza, G., y Santos-Posadas, H. M. D. L. (2022). Morfometría de copa en plantaciones de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus montezumae* en Michoacán, México. *Bosque (Valdivia)*, 43(3), 311-322.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2008). Conjunto de datos vectoriales, escala 1:1,000,000. Unidades Climáticas.
- Ipinza, R. H. (1998). Mejoramiento Genético Forestal-Programa CONIF, Sobre la investigación en semillas de especies forestales nativas. *Santafé de Bogotá, Colombia*. 105 pág.
- Jiménez, J., Kramer, H., & Aguirre, O. (2002). Bestandesuntersuchungen in einem ungleichaltrigen Tannen-, Douglasien-, Kiefern-Naturbestand Nordostmexikos. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 173, 47-55.
- Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (2020). Nuevo Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 09-12-2020.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5607136&fecha=09/12/2020#sc.tab=0

- Mendizábal, H. C. L., Alba, L. J., Ramírez, G. E. O., Ramírez, J. M., y Cruz, J. H. (2011). Potencialidad de un ensayo de procedencias/progenie de *Pinus maximinoi* Moore para su uso. *Foresta Veracruzana*, 13(2), 37-42.
- Moctezuma López, G., y Flores, A. (2020). Importancia económica del pino (*Pinus* spp.) como recurso natural en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(60), 161-185. doi:<https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i60.720>
- Morales González, E., López Upton, J., Vargas Hernández, J. J., Ramírez Herrera, C., y Gil Muñoz, A. (2013). Parámetros genéticos de *Pinus patula* en un ensayo de progenies establecido en dos altitudes. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(2), 155-162.
- Oyarzún, C., Nahuelhual, L., y Núñez, D. (2005). Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. *Ambiente y Desarrollo*, 20(3), 88-95.
- Reynoso-Santos, R., Hernández-Ramos, J., Hernández-Ramos, A., Leyva-Ovalle, Á., y García-Cuevas, X. (2021). Área de interceptación lumínica de copa para *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. en Chiapas, México. *La investigación agropecuaria como aporte al uso de tecnologías sustentables*, 15 pág.
- Rodríguez-Laguna, R., Meza-Rangel, J., Vargas-Hernández, J., y Jiménez-Pérez, J. (2009). Variación en la cobertura de suelo en un ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en el cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León. *Madera y Bosques*, 15(1), 47-59.
- Rzedowski, J., (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.
- Salaya-Domínguez. J. M., López U. J., & Vargas H. J. J. (2012). Variación genética y ambiental en dos ensayos de progenies de *Pinus patula*. *Agrociencia*, 46(5), 519-534.
- SAS Institute (2002). Statistical Analysis System versión 9.00. The SAS institute Inc. Cary, NC, USA.
- Schomaker, M. (2007). Crown-condition classification: a guide to data collection and analysis (No. 102). US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 77 pág.

Valencia, M. G., del Carmen Mendizábal-Hernández, L., Alba-Landa, J., Ramírez, J. M., y Cruz-Jiménez, H. (2012). Evaluación de una prueba de procedencias/progenie de *Pinus greggii* Engelm. establecida en Villa Aldama, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*, 14(2), 25-30.